

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Electrique

Présenté par

BERRACHED Asma – GOSSA Nariman

Thème

**commande par mode glissant d'un
générateur asynchrone à double
alimentation**

- Application aux moteurs à induction –

Soutenu le ../06/2023. Devant le jury composé de :

Dr. H.....

Maitre de conférences

Président

M. TRIA Fatima Zohra

Maitre de conférences

Rapporteur

Dr. A.....

Maitre de conférences

Examineur

Année Universitaire 2022/2023

Dédicaces

الحمد لله الذي وفقنا لهذا ولم نكن لنصل إليه لو لا فضل الله علّنا

أهدي هذا العمل المتواضع

لأمي الغالية زهيرة على تضحياتها منذ أن ولدتني.

إلى والدي العزيز: جمال، الذي دعمني وساعدني في مواجهة

الصعوبات والوصول الى هذا المنصب.

إلى اخي ونور عيني

محمد صالح.

وإلى إخواني غاليات

خولة وحنان.

وشكرا الى خطيبي على دعمه لي حفظه الله

الي امي دلولة اخوالي وخالاتي اعمامي وعماتي .

إلى كل عائلة بالراشد؛ لجمييع أصدقائي واحبائي .

لجمييع طقم قسم الهندسة كهربائية

لجمييع دفعة 2023

ASMA BERRACHED

الملخص :

يقدم هذا العمل دراسة واستخدام المولدة اللاتزامنية ذات التغذية المزدوجة "GADA" في إنتاج طاقة الرياح للقيام بذلك , نقوم بإنشاء نموذج للعنفة الهوائية ثم من المولد اللاتزامني , "GADA" واعتمادنا على استراتيجية التحكم الإنزلاقي للتحكم في الطاقة الفعالة والراجعة . واختتمت هذه الدراسة بنتائج المحاكاة للتحقق من صحة النماذج التي تم الحصول عليها .

Résumé:

Cet exemple d'étude a généré un péché trophique et auto-cohérent "GADA" dans la production d'énergie éolienne pour ce faire, "GADA", et notre dépendance à l'utilisation du contrôle et de la rétroaction de l'énergie.

Summary:

This example study generated trophic, self-consistent sin "GADA" in the production of wind power to do so, "GADA", and our dependence on the use of energy control and feedback.

كلمات مفتاحية :

نظام طاقة الرياح، تحويل الطاقة، التوربينات، متزامنة ذات مغناطيس دائم، التحكم في الوضع الزلقة .

key words : Wind power system, energy conversion, turbine, permanent magnet synchronous, slippery mode control.

Tables des matières

Dédicaces	3
Tables des matières	I
Introduction générale.....	2

Chapitre I: Généralité sur les systèmes éoliens

I.1. Introduction:.....	5
I.2. Définition de l'énergie éolienne:.....	5
I.3. Composantes d'une éolienne :	5
I.4. Les différents types d'éoliennes:.....	6
I.4.1. L'éolienne horizontale:.....	6
I.4.2. L'éolienne verticale:.....	7
I.5. Avantages de l'énergie éolienne: [Sof19].....	7
I.6. Inconvénients de l'énergie éolienne :.....	7
I.7. Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie:.....	8
I.8. L'éolien à vitesse fixe:.....	8
I.9. L'éolien à vitesse variable:	9
I.10. Zones de fonctionnement à vitesse variable d'une éolienne:.....	10
I.11. Technique D'extraction du Max de puissance :.....	11
I.12. Les types des machines utilisées dans l'aérogénérateur:	11
I.12.1. Systèmes utilisant la machine synchrone:.....	11
I.12.2. Systèmes utilisant la machine asynchrone:	12
I.12.2.1. Machine asynchrone à double alimentation:	12
I.13. Avantages et inconvénients de la MADA:.....	17
I.13.1. Avantages de la MADA: [Lak22]	17
I.13.2. Inconvénients de la MADA: [sal07]	17

Conclusion:.....	18
Chapitre II: modélisation et simulation de la GADA et de la turbine avec MPPT	
II.1 Introduction.....	21
II.2. Description de les MADA:	21
II.3. Structure de MADA:.....	21
II.4. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation:.....	22
II.5. La modélisation de la machine GADA:.....	23
II.5.1. Hypothèses simplificatrices:	23
II.5.2. Les équations électriques de la machine:	23
II.5.3. Les équations magnétiques de la machine:	25
II.6. La transformation de Park :	26
II.7. Représentation de la MADA dans un repère biphasé (dq):	28
II.8 .Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état	29
II.9. Simulation de la machine asynchrone à double alimentation:.....	30
II.9.1. Résultat de simulation de la MADA:.....	30
II.9.2. Interprétation de résultat de simulation:.....	32
II.10. Modélisation de la turbine:	32
II.10.1. La puissance d'une éolienne.....	33
II.10.2.Le coefficient de puissance:	33
II.10.3. Modèle du multiplicateur:	34
II.10.4. Equation dynamique	34
II.11. Stratégies Commande MPPT:.....	35
II.11.1. Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique:.....	36
II.11.2. Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique:	37
II.12. Résultats de simulation:.....	35
Conclusion:.....	38

Chapitre III: La commande vectorielle de la GADA connecté au système éolien globale

III.1. Introduction:	41
III.2. Commande vectorielle de la machine:	41
III.2.1. Principe de la commande vectorielle de la MADA :	41
II.2.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	42
III.3. Modèle de la MADA pour le control des puissances statorique:	44
III.3.1. Expressions des puissances actives et réactive statoriques:	44
III.3.1.2. Expressions des tensions rotoriques:	45
III.4. Contrôle indépendant des puissance active et réactive:	46
III.4.1. Commande directe:	46
III.4.2. Commande indirecte:	47
III.4.2.1. Commande en boucle ouvert:	47
III.4.2.2. Commande en boucle fermé:	48
III.5. Modélisation et commande du convertisseur de puissance côté machine:	49
III.6. Stratégie de commande MLI sinus – triangle:.....	51
III.7. Structure globale d’une chaine de conversion éolienne :	52
III.8.Simulations	52
III.8.1. Résultats:.....	53
II.9. Conclusion	58

Chapitre IV: La command par mode glissant de la GADA connecté au système éolien globale

IV.1. Introduction:	61
IV.2. Principe de la commande par mode de glissement:	61
IV.3.Conception de la commande par mode de glissement :	62
IV.4. Choix des surfaces de la commande par mode de glissement:	62

Tables des matières

IV.5. Conditions d'existence et de convergence	63
IV.5.1.Fonction de Lyapunov :.....	63
IV.5.2. Approche directe :	63
IV.6. Loi de commande par mode de glissement:	64
IV.6.1. La commande équivalente	64
IV.6.2. La commande discontinue	65
IV.7. Application de la commande par mode glissant sur la MADA:	67
IV.7.1. Choix de la surface de commutation:	67
IV .8. Simulation et Interpretation des résultats:	71
Conclusion.....	75
Conclusion générale :	78
Références bibliographies	79
Annexes	84

Liste des Figures

Liste des Figures

Chapitre I: Généralité sur les systèmes éoliens

Figure (I.1): Principe de la conversion de l'énergie éolienne.	5
Figure (I.2): Composante d'une éolienne de forte puissance.	6
Figure (I.3): Éoliennes à axe vertical(a) et à axe horizontal(b)	6
Figure (I.4): Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol.	8
Figure (I.5): Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.	9
Figure (I.6): Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.	10
Figure (I.7): Zones de fonctionnement d'une éolienne.	10
Figure (I.8): Structures de commande de la turbine.	11
Figure (I.9): Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.	13
Figure (I.10): Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation – régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation.	13
Figure (I.11): Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	14
Figure (I.12): Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.	15
Figure (I.13): Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.	15
Figure (I.14): Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.	16
Figure (I.15): Modes de fonctionnement de la MADA.	17

Chapitre II: modélisation et simulation de la GADA et de la turbine avec MPPT

Figure (II.1): Description de la machine asynchrone à double aliment.....	21
Figure (II.2): Structure de la machine.	22
Figure (II.3): Représentation de la transformation dq de la machine.	26
Figure (II.4): Schéma bloc de la simulation de la MADA.	30
Figure (II.5): Les tensions statorique.....	30
Figure (II.6): La puissance réactive statorique	31

Liste des Figures

Figure (II.7): La puissance active statorique	31
Figure (II.8): Les courants statorique avec zoom	31
Figure (II.9): Les courants statorique	31
Figure (II.10): Les courants rotorique	31
Figure (II.12): Le flux statorique à l'axe q.....	32
Figure (II.11): Le flux statorique à l'axe d.....	32
Figure (II.13): Schéma de la turbine éolienne.	33
Figure (II.14): Coefficient de puissance	33
Figure (II.15): Schéma bloc du modèle de la turbine.	35
Figure (II.16): le coefficient de puissance	35
Figure (II.17): La vitesse spécifique λ	35
Figure (II.18): Puissance mécanique produite par la turbine	35
Figure (II.19): La vitesse de la turbine et sa référence	35
Figure (II.20): Schéma bloc sans asservissement de la vitesse.	37
Figure (II.21): Schéma bloc avec asservissement de la vitesse.	38

Chapitre III: La commande vectorielle de la GADA connecté au système éolien globale

Figure (III.1): Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.....	42
Figure (III.2): Orientation de la tension et de flux statorique.....	43
Figure (III.3): Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.	46
Figure (III.4): Schéma bloc de la commande directe.	46
Figure (III.5): Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.....	47
Figure (III.6): Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.	48
Figure (III.7): schéma bloc d'un onduleur MLI.	49
Figure (III.8): schéma bloc d'une MLI sinus triangle.....	51
Figure (III.9): signal de porteuse et signaux de référence.	52

Liste des Figures

Figure (III.10): Schéma bloc Structure globale d'une chaîne de conversion éolienne	52
Figure (III.11): schéma bloc de simulation La commande vectorielle de la GADA connecté au système éolien.....	53
Figure (III.12): La puissance active.....	54
Figure (III.13): <i>La puissance active Avec zoom</i>	54
Figure (III.14): La puissance réactive.....	54
Figure (III.15): Les courants statatorique	55
Figure (III.16): Les courants <i>rotorique</i>	55
Figure (III.17): Le courant rotorique selon l'axe q.....	55
Figure (III.18): Le courant rotorique selon l'axe q Avec zoom	55
Figure (III.19): Le courant rotorique selon l'axe d.....	56
Figure (III.20): Flux statorique d.....	56
Figure (III.20): Flux statorique q.....	56
Figure (III.21): Le courant statorique selon l'axe d.....	57
Figure (III.22): Le courant statorique selon l'axe q.....	57
Figure (III.23): Le coefficient de puissance	57
Figure (III.24): La vitesse spécifique	57
Figure (III.25): Le couple électromagnétiques	57
Figure (III.26): L vitesse du vent.....	57
Figure (III.27): La vitesse de la Générateur	58
Figure (III.28): La vitesse de la turbine et sa référence.....	58

Chapitre IV: La command par mode glissant de la GADA connecté au système éolien globale

Figure (IV.1): Modes de fonctionnement dans le plan de phase.	61
Figure (IV.2): La commande équivalente.....	65
Figure (IV.3): Fonction sign.....	65
Figure (IV.4): Fonction de saturation (Commande adoucie).	66

Liste des Figures

Figure (IV.5): Commande intégrale	66
Figure (IV.6): Schémas block de la commande par mode glissant d'un générateur GADA par MATLAB Simulink.....	71
Figure (IV.7): La puissance active	72
Figure (IV.8): La puissance active avec zoom	72
Figure (IV.9): La puissance réactive	72
Figure (IV.10): Les courants statatorique.....	73
Figure (IV.11): Les courant.....	73
Figure (IV.12): Le courant rotorique selon l'axe q	73
Figure (IV.13): Le courant rotorique selon l'axe q avec zoom	73
Figure (IV.14): Le courant rotorique selon l'axe d	73
Figure (IV.14): Flux statorique d en wb	74
Figure (IV.15): Flux statorique q en wb	74
Figure (IV.16): Le coefficient de puissance	74
Figure (IV.17): La vitesse spécifique	74
Figure (IV.18): Le couple electromagnetique	75
Figure (IV.19): La vitesse du vent m /s	75
Figure (IV.20): La vitesse de la Générateur	75
Figure (IV.21): La vitesse de la turbine et sa référence.....	75

Notations

MADA	M achine A synchrone à D ouble A limentation	(_)
GADA	G énératrice A synchrone à D ouble A limentation	(_)
MLI	M odulation de L argeur d'Impulsion.	(_)
MPPT	M aximum P ower P oint T racking	(_)
MCC	M achine <i>Courant contin</i> t	(_)
CMG	commande par m ode de g lisement	(_)
PI	P roportionnel intégral	(_)
$V_{as} V_{bs} V_{cs}$	<i>Tensions statoriques.</i>	(V)
$V_{ar} V_{br} V_{cr}$	<i>Tensions rotorique</i>	(V)
R_s	résistances statorique par phase	(Ω)
R_r	résistances rotorique par phase	(Ω)
$I_{as} I_{bs} I_{cs}$	<i>Courants statoriques</i>	(A)
$I_{ar} I_{br} I_{cr}$	<i>Courants rotoriques.</i>	(A)
$\varphi_{as} \varphi_{bs} \varphi_{cs}$	<i>Flux statoriques</i>	(Wb)
$\varphi_{ar} \varphi_{br} \varphi_{cr}$	<i>Flux rotoriques</i>	(Wb)
L_s	Inductances propres statorique	(H)
L_r	Inductances propres rotorique	(H)
M_r	Inductances mutuelles entre deux phases rotoriques	(H)

M_s	Inductances mutuelles entre deux phases statoriques	(H)
C_{em}	Couple électromagnétique	(N.m)
C_r	Couple résistant	(N.m)
j	Moment d'inertie des parties tournantes	(Kg.m ²)
Ω	la vitesse mécanique	(rad/s)
f	Fréquence du réseau électrique	(Hz)
$\varphi_{sd}\varphi_{sq}$	Composantes du flux statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q)	(Wb)

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique.[MAS2014]

L'augmentation importante de la consommation d'électricité produite à partir des énergies fossiles ou nucléaires et également la conscience écologique naissante ont fortement augmenté l'intérêt pour les énergies renouvelables. [Lin10]

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergies dont la consommation ne diminue pas la ressource à l'échelle humaine [GAS11]. Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes, Énergie solaire, Énergie éolien, Géothermie Énergie hydraulique, biomasse

Parmi ces sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important. La puissance des éoliennes installées dans le monde augmentant de plus en plus tous les ans, les systèmes éoliens ne peuvent plus se comporter comme uniquement des générateurs de puissance active dans les réseaux de distribution ou de transport, selon la puissance installée. En effet, ils seront certainement amenés, à court terme, à fournir des services systèmes (compensation de la puissance réactive par exemple) comme les alternateurs de centrales classiques et/ou à participer à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique (filtrage des courants harmoniques en particulier)[Bou12].

L'éolienne à génératrice asynchrone à double alimentation (**GADA**) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types de machines à vitesse variable. En effet, le convertisseur d'énergie utilise, afin de redresser - onduler les courants alternatifs du rotor, une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur. Ceci implique moins de pertes par commutations, un coût de production du convertisseur moins élevé et une réduction de la taille des filtres passifs impliquant ainsi une réduction des coûts et des pertes additionnelles [KAI13].

Dans ce mémoire, nous nous intéressons à la commande en puissance

Notre étude s'est divisée en trois chapitres :

Le premier chapitre: Nous présentons une généralité sur la MADA, concernant sa description et les différents modes de fonctionnement, ses inconvénients et ses avantages.

Le deuxième chapitre: Nous présenterons la modélisation classique de la MADA dans le repère de Park lié au champ tournant. Ensuite, nous donnerons un aperçu sur la commande à modulation de largeur d'impulsion des onduleurs de tension.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la technique de commande vectorielle appliquée au flux rotorique de la MADA munie d'un réglage de vitesse par un PI classique. Les performances de cette commande vectorielle seront montrées par des résultats de simulation.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation de l'application de la commande par mode glissant pour la régulation des puissances statoriques. Les performances de cette commande seront montrées par des résultats de simulation.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résumera l'ensemble des résultats obtenus,

Chapier I:
***Généralité sur les systèmes
éoliens***

I.1. Introduction:

Dans ce chapitre nous avouas présent l'état des systèmes éolienne .Spéciales épars les deux parties partie mécanique la turbine éolienne. Ainsi le partie électrique est un les générateurs de type synchrone et asynchrone.

I.2. Définition de l'énergie éolienne:

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Cette énergie est « renouvelable » c'est-à-dire non dégradé. De plus, c'est une énergie verte car elle ne produit aucun rejet atmosphérique déchet radioactif. Un aérogénérateur, appelé souvent éolienne, est un dispositif qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique Comme le montre **la Figure I.1.**

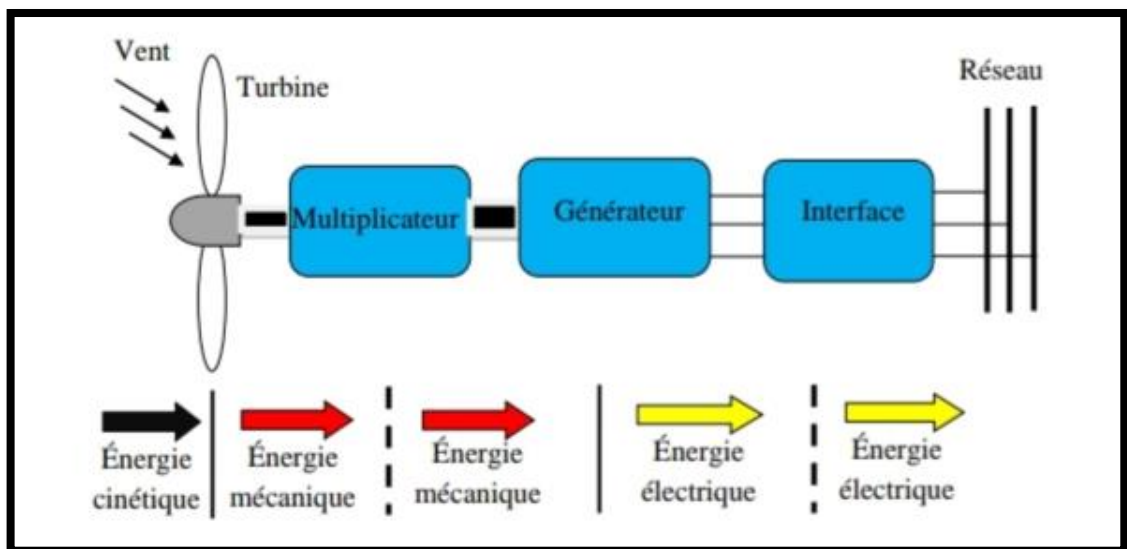


Figure (I.1): Principe de la conversion de l'énergie éolienne.

I.3. Composantes d'une éolienne :

Une installation est généralement constituée d'une éolienne, d'une tour avec de solides fondations et d'un ensemble d'équipements électriques pour le stockage de l'énergie produite ou pour gérer la connexion avec le réseau électrique local. **La figure (I.2).** [Nab22]

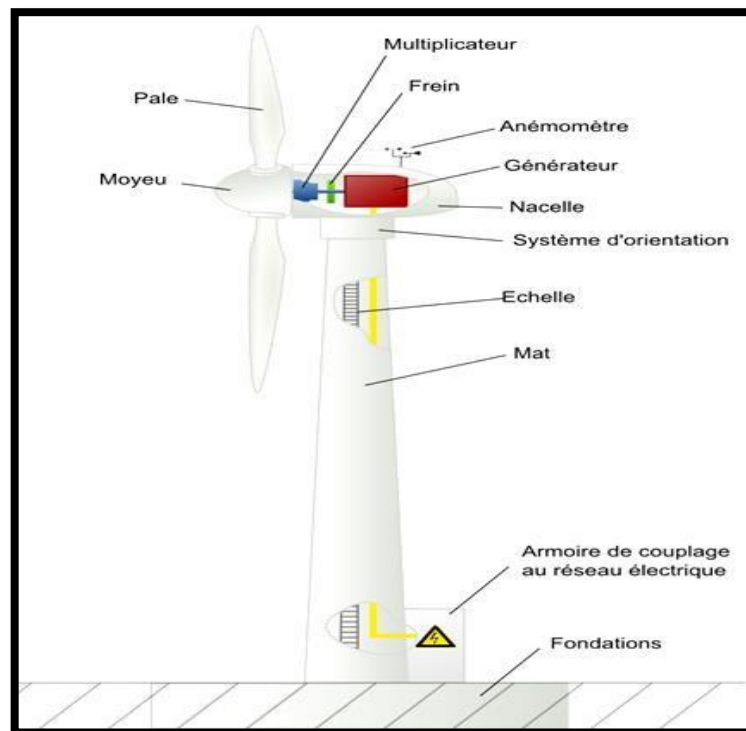


Figure (I.2): Composante d'une éolienne de forte puissance.

I.4. Les différents types d'éoliennes:

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.



(a) Éoliennes à axe vertical

(b) Éoliennes à axe horizontal

Figure (I.3): Éoliennes à axe vertical(a) et à axe horizontal(b)

I.4.1. L'éolienne horizontale:

L'éolienne horizontale est le modèle le plus répandu. Elle capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice. Celles-ci tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol. Le générateur, actionné par la rotation de

l'hélice, et situé en haut de l'éolienne. C'est la plus utilisée par les particuliers car son rendement* est plus important. Comme le montre la **Figure I.3. [Www]**

I.4.2. L'éolienne verticale:

Les pales de l'éolienne verticale tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Elle peut capter des vents plus faibles ce qui lui permet d'être plus fréquemment exploitée. Elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale. Elle s'adapte donc mieux aux bâtiments. Elle peut fonctionner quel que soit le sens du vent. Par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne horizontale Comme le montre **la Figure I.3. [Www]**

I.5. Avantages de l'énergie éolienne: [Sof19]

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses du vent (augmentation du rendement énergétique).
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Elles réduisent le bruit lors du fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente.
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevées. En conséquence, pour de faible vitesse de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien.

I.6. Inconvénients de l'énergie éolienne :

- Convertisseur de puissance complexe.
- Gestion du transfert de puissance entre le redresseur MLI et l'onduleur et le placement au point de puissance optimal de l'éolienne.
- Utilisation des machines spéciales.

I.7. Evaluation de l'Energie Eolienne en Algérie:

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en **figure I.7**. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Béjaia et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s, [Kas 01]. En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran. [BEK14]

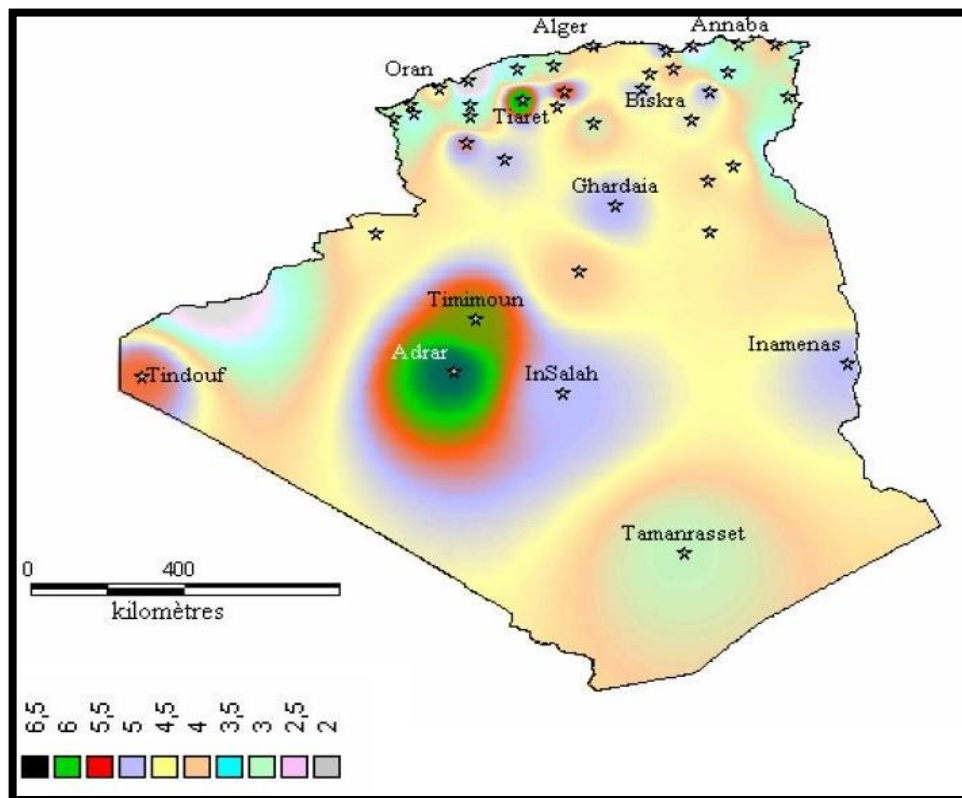


Figure (I.4): Atlas de la vitesse moyenne du vent (en m/s) de l'Algérie estimée à 10 m du sol.
[BEK14]

I.8. L'éolien à vitesse fixe:

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, le multiplicateur de vitesse et de la génératrice. [isl20]

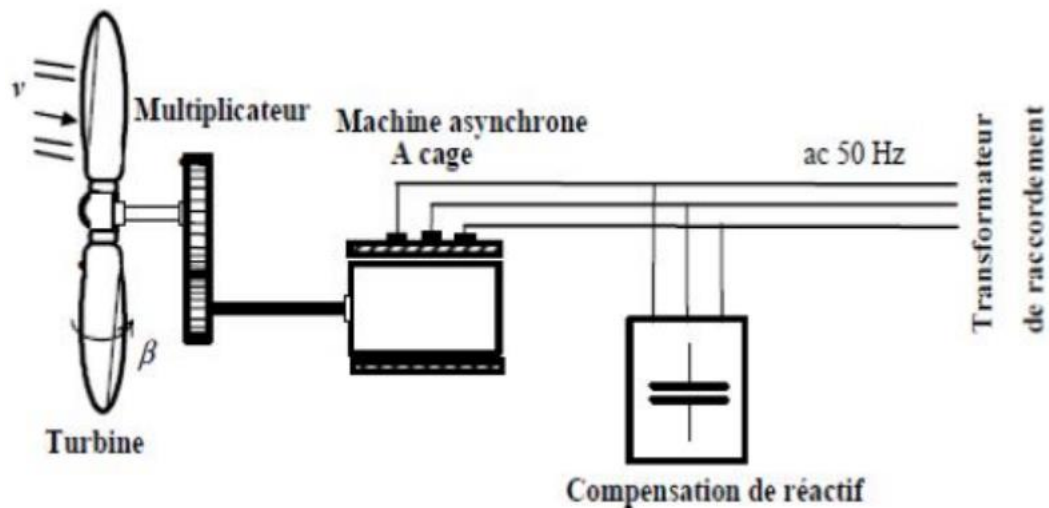


Figure (I.5): Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.

I.9. L'éolien à vitesse variable:

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ , qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance. Comme le montre le tableau ci-dessous, les principales avantages des turbines à vitesse variable sont leurs rendements de conversion d'énergie élevé, une énergie électrique de bonne qualité et qui ne présente aucune nuisance pour le réseau électrique, et finalement le stress mécanique réduit sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Leurs principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance. Toutefois, ce coût additionnel et les pertes sont compensés par la forte production d'énergie électrique. [isl20]

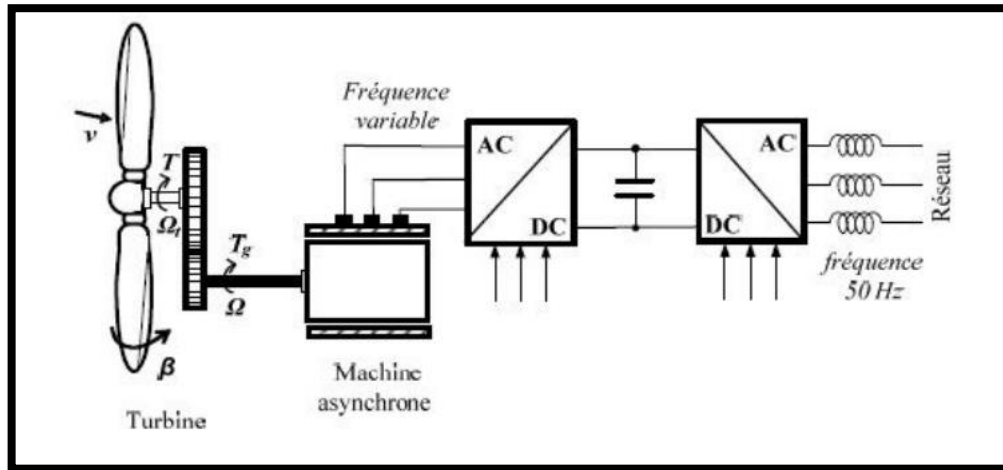


Figure (I.6): Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.

I.10. Zones de fonctionnement à vitesse variable d'une éolienne:

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent [LAV05] :

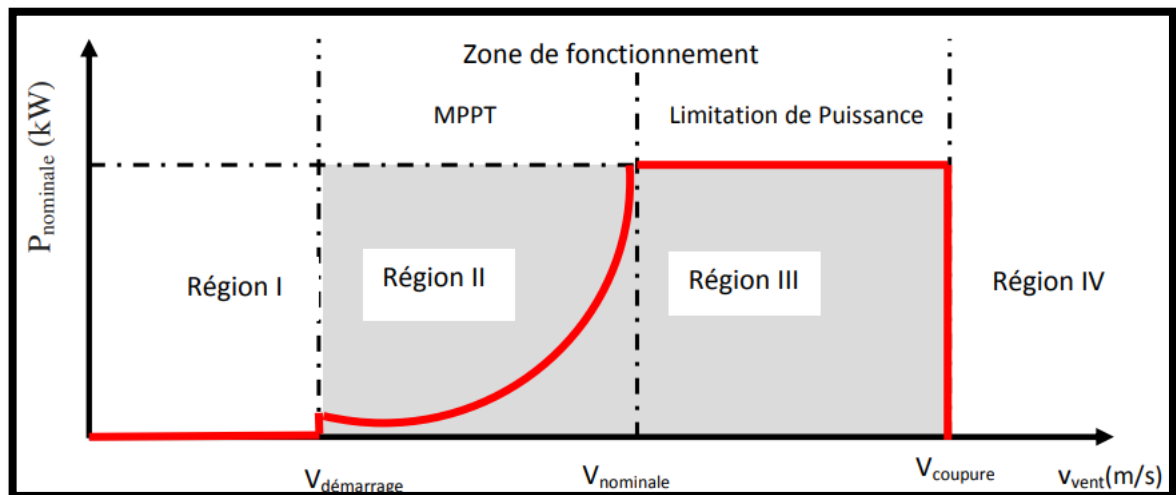


Figure (I.7): Zones de fonctionnement d'une éolienne. [Mer19]

- La région I : $V_{vent} < V_{démarrage}$ où $P = 0$: phase d'attente (la turbine ne fonctionne pas) .
- La région II : $V_{démarrage} < V_{vent} < V_{nominale}$: la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent (production normale jusqu'à atteindre la puissance nominale) .
- La région III : $V_{nominale} < V_{vent} < V_{coupure}$: la vitesse de rotation est maintenue constante (régulation de puissance à sa valeur nominale)
- La région IV : $V_{vent} > V_{coupure}$ (environ 90 km/h) : le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie (arrêt de l'éolienne). [Mer19]

I.11. Technique D'extraction du Max de puissance :

Le but de la commande à vitesse variable de la GADA est d'extraire le maximum de puissance de l'éolienne. On distingue deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite [Tar19] :

- la commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.
- la commande MPPT par asservissement de la vitesse mécanique.

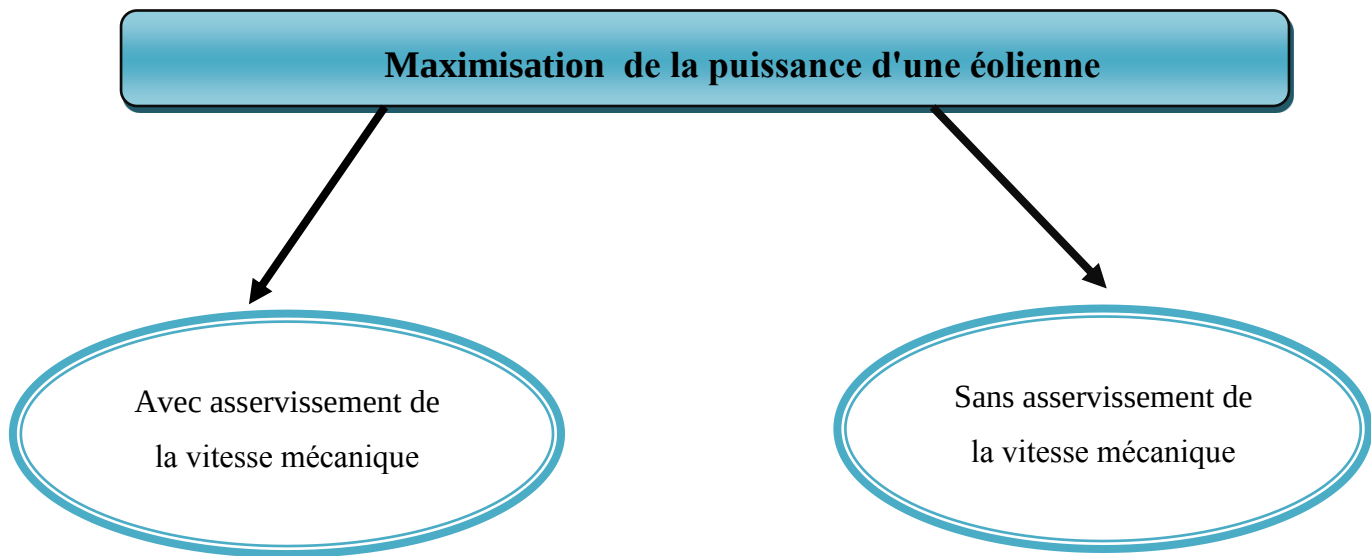


Figure (I.8): Structures de commande de la turbine.

I.12. Les types des machines utilisées dans l'aérogénérateur:

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I.12.1. Systèmes utilisant la machine synchrone:

Systèmes Utilisant la Machine Synchrone Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Leur proportion est en augmentation constante (un peu plus de 5 % en 2001). La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'entraînement direct, c'est-à-dire lorsque la liaison mécanique entre la turbine éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que cette génératrice soit nécessairement raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence.

I.12.2. Systèmes utilisant la machine asynchrone:

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit.

Ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator..Il existe plusieurs types de configurations utilisant la machine asynchrone dans toutes ses formes (Machine asynchrone à rotor bobiné, Machine asynchrone à cage, Machine asynchrone à double stator, MADA...etc.) [isl20]

I.12.2.1. Machine asynchrone à double alimentation:

Avec les génératrices asynchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor. **[MIR05]**

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines. Les vitesses de rotation nominales de ces machines sont d'habitude un peu moins élevées par rapport aux machines à cage d'écureuil alors le rapport de multiplicateur de vitesses peut être moins important. La **Figure (I.9)** 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 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. **[MIR05]**

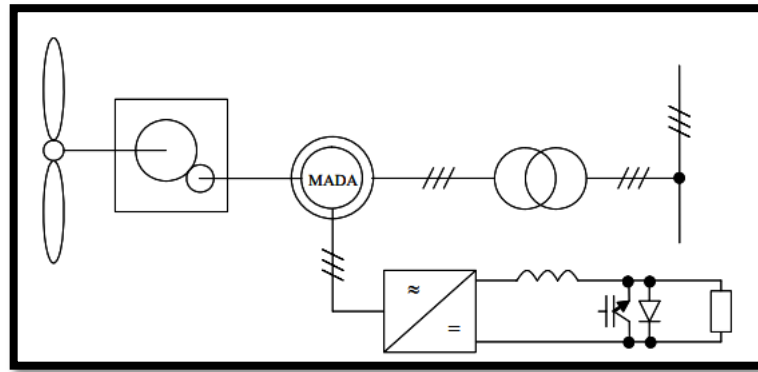


Figure (I.9): Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.

Une autre solution très intéressante et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau (cf. **Figure (I.10)**). En général, le dimensionnement de la chaîne rotor se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse. C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau. [MIR05]

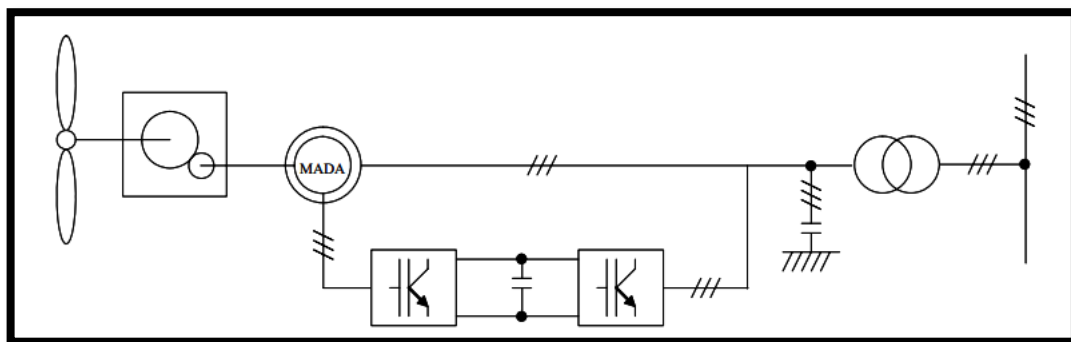


Figure (I.10): Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation – régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation.

I.12.2.1.2. Mode de fonctionnement de MADA:

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Le principe de la commande de la MADA en ces modes peut être compris à travers **la figure (I.10)**. Dans cette dernière, P_s , P_r , et P_m désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique. [bra19]

I.12.2.1.2. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone:

La puissance est fournie par le réseau au stator, et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme, **figure (I.11)**. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor. [Mor22]

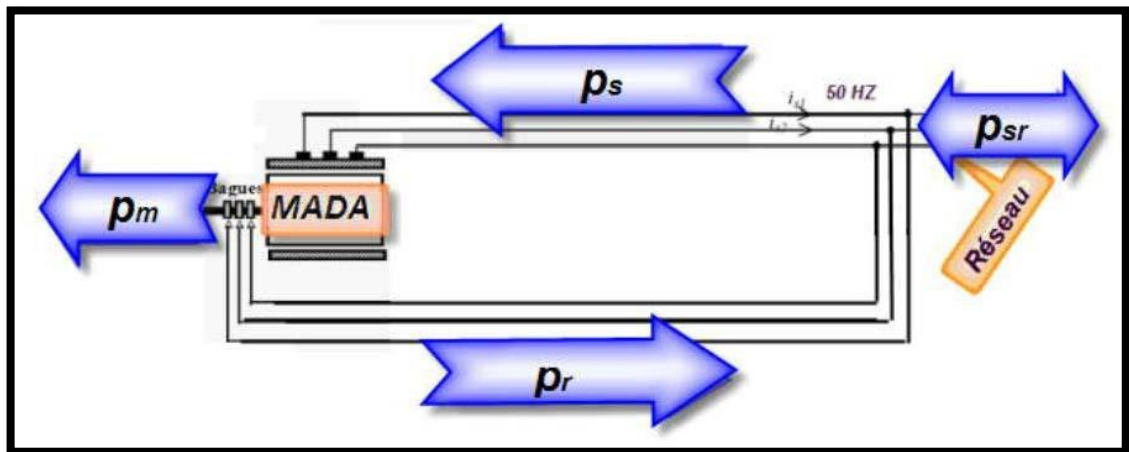


Figure (I.11): Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone. [Lot17]

I.12.2.1.3. Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone:

La figure (I.7.b) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a alors un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme. [BOU22]

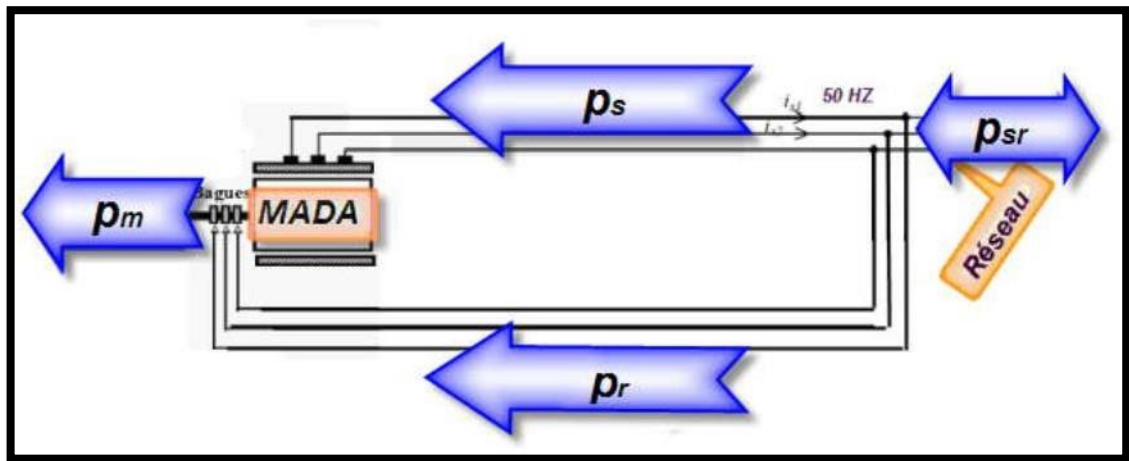


Figure (I.12): Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone. [Lot17]

I.12.2.1.4. Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone:

La **Figure (I.13)** montre que la puissance fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement. [Lot17]

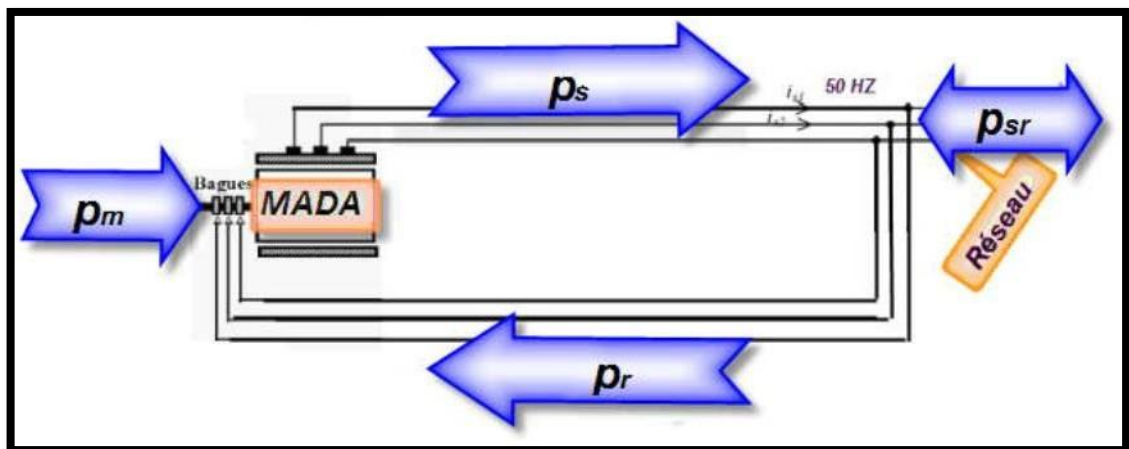


Figure (I.13): Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone. [Lot17]

I.12.2.1.5. Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone:

La **Figure (I.14)** montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator est la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en perte Joule dans le rotor. [Lot17]

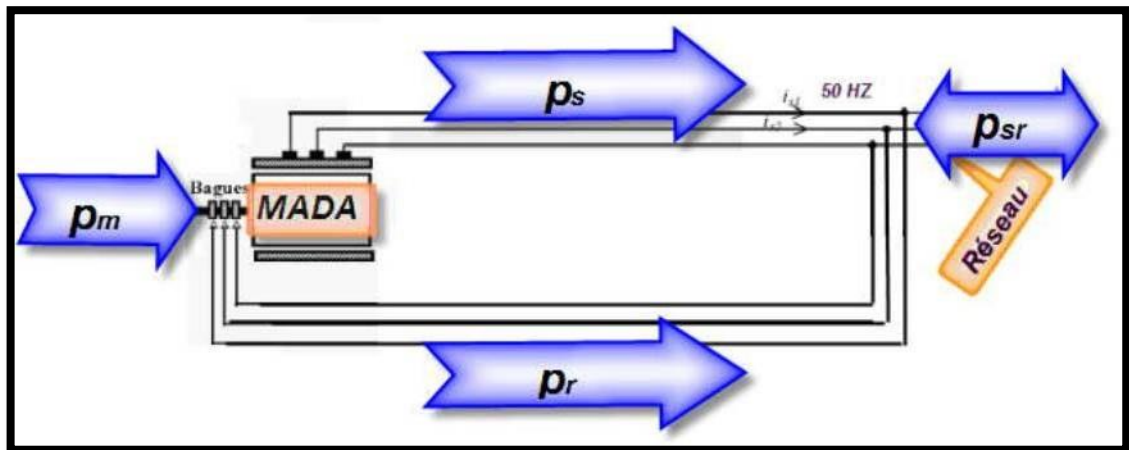


Figure (I.14): Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone. [Lot17]

On peut remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique: la production de puissance électrique quelle que soit la vitesse de rotation (hypo ou hyper synchrone) et la récupération de la puissance de glissement. [Lot17]

Pour une utilisation dans un système éolien, les modes 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au-delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale.

Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage

On peut résumer ces différents modes dans le tableau suivant :

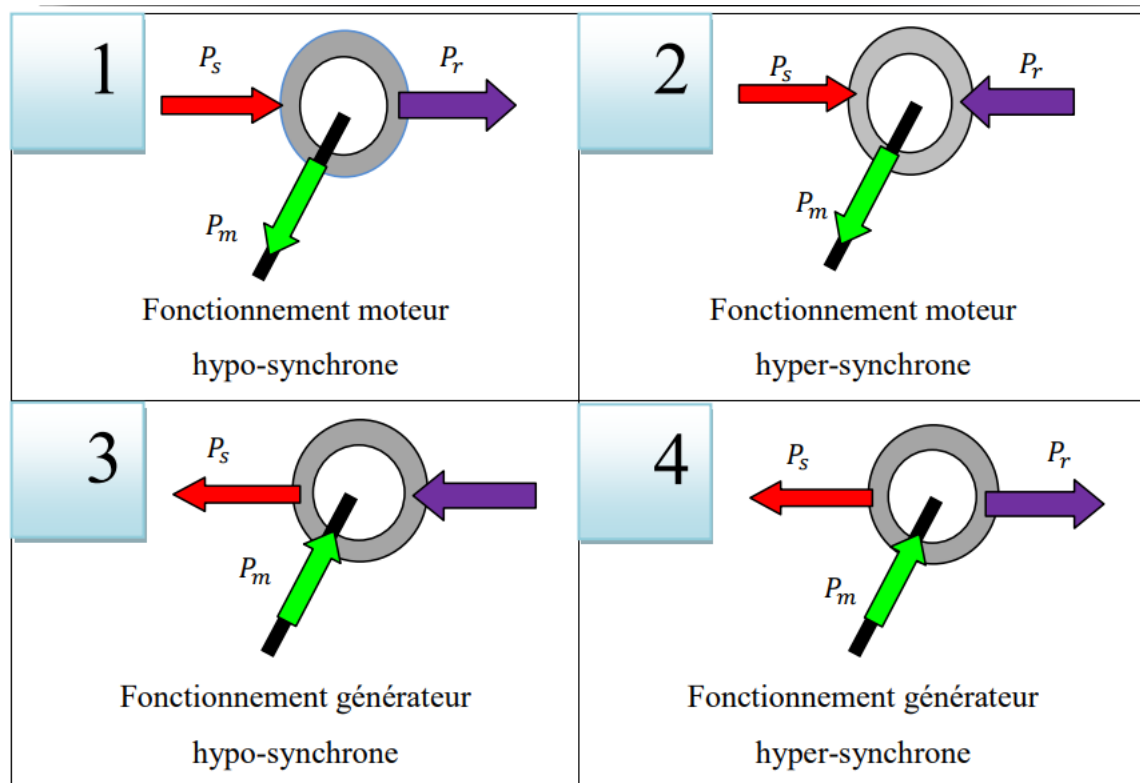


Figure (I.15): Modes de fonctionnement de la MADA. [bra19]

I.13. Avantages et inconvénients de la MADA:

I.13.1. Avantages de la MADA: [Lak22]

- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que l'autre Machines (MCC, MAS, MS...) à grandes puissances. [Lak22]
- Un fonctionnement en régime dégradé, continue MADA de travailler si l'un des deux onduleurs tombe en panne, et rester souple que la machine à simple alimentation.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, Il donne une plus grande facilité et plus de précision pour contrôler le débit et le couple électromagnétique.

I.13.2. Inconvénients de la MADA: [sal07]

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).

- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA.

I.14.Conclusion:

Après la présentation des que lequel théine que dans les parties qui constitues les systèmes éoliennes, dans notre travaille non avons intruse à l'utilisation des machine à double alimentation (MADA) dans les systèmes éoliennes. Ce pour cela il faut passer à la modélisation de ce type de machine.

Chapitre II

modélisation et simulation de la GADA et de la turbine avec MPPT

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va étudier la modélisation de la MADA dans un référentiel à champ tournant et cela pour obtenir un modèle mathématique qui nous permettra de valider notre modèle en boucle ouverte. Au début on modélisera notre machine dans le repéré triphasée (A, B, C) tout on donnant les équations électriques et magnétiques, puis on introduit la transformer de Park qui nous permettons de passer du système triphasé au système biphasé ce qui nous permet de faire un contrôle des puissance statorique de la GADA. Après nous avons présenté les déférant courbes obtenu par MATLAB Simulink de la GADA, ainsi les résultats obtenu de la turbine éolien avec la commande MPPT.

II.2. Description de les MADA:

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques (A_s B_s C_s) décalées entre elles par un angle de $\theta = (3/2\pi)$, et aussi trois bobines rotoriques identiques de répartition et similaire à celles du stator (A_r B_r C_r)

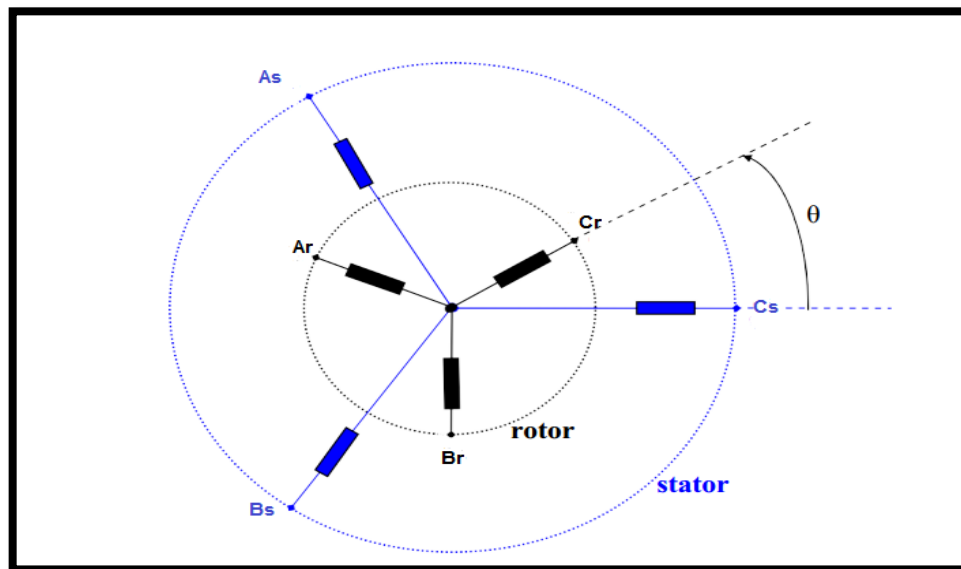


Figure (II.1): Description de la machine asynchrone à double aliment.

II.3. Structure de MADA:

Une MADA a un stator identique à celui (d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone). C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimant ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques. On peut voir sur la figure (II.2) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants

(balais-bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor. [Che12]

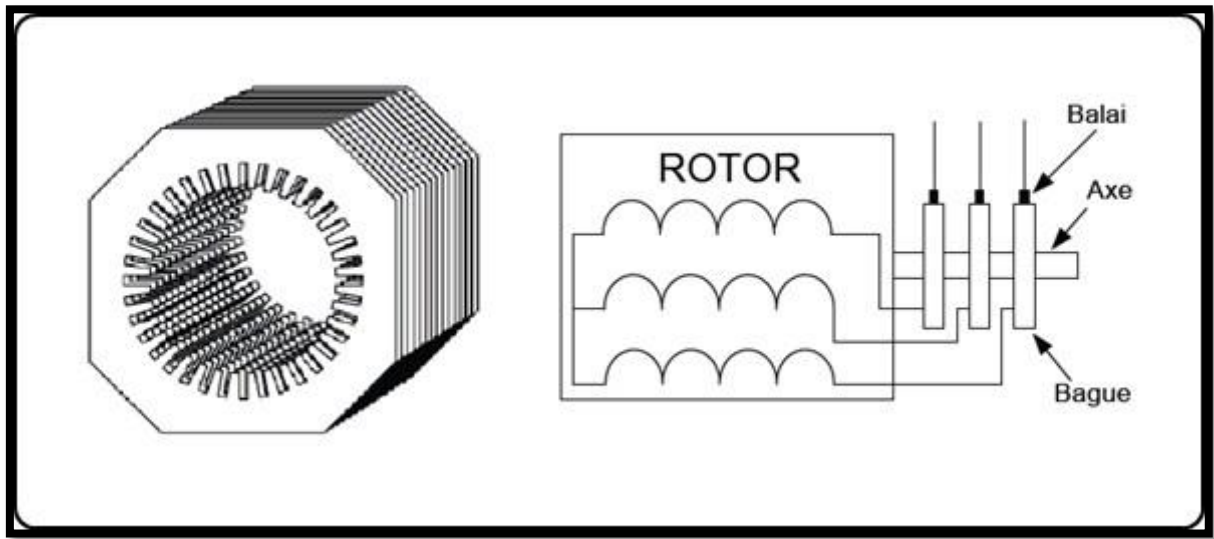


Figure (II.2): Structure de la machine. [Che12]

II.4. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation:

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de fmms des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi \cdot f_s$, et le rotor tourne avec la vitesse ω_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des fmms des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g \quad (\text{II.1})$$

Où :

g : est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur résultant des fmms par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de

$$\omega_{gl} = 2\pi \cdot f_r \quad (\text{II.3})$$

c'est à dire :

$$f_r = f_s \cdot g \quad (\text{II.4})$$

II.5. La modélisation de la machine GADA:

II.5.1. Hypothèses simplificatrices:

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, on suppose les hypothèses simplificatrices:

- ✚ La machine est de constitution symétrique.
 - ✚ On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaire (absence d'effet pelliculaire)
 - ✚ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
 - ✚ On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.
 - ✚ On considère que la force magnétique créée par chacune des phases statorique et rotorique est à répartition sinusoïdale.
 - ✚ L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé, les inductances propres sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotorique et statorique
- La machine asynchrone à double alimentation doit être représentée dans le système triphasé. [Mor22]

II.5.2. Les équations électriques de la machine:

En vertu de la loi de Faraday, nous pouvons écrire :

- pour les enroulements statoriques :

$$\begin{aligned} V_{as} &= R_s I_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ V_{bs} &= R_s I_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} &= R_s I_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

- pour les enroulements rotoriques :

$$\begin{aligned} V_{ar} &= R_r I_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ V_{br} &= R_r I_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ V_{cr} &= R_r I_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

Ou sous forme matriciel :

- Statorique :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

- rotoriques :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

D'où les formes matricielles condensées

- Statorique :

$$[V_s] = R_s [I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (\text{II.9})$$

- rotoriques :

$$[V_r] = R_r [I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad (\text{II.10})$$

$[V_s] = [V_{as} V_{bs} V_{cs}]^T$: vecteur de tension statorique.

$[I_s] = [I_{as} I_{bs} I_{cs}]^T$: vecteur de courant statorique.

$[\varphi_s] = [\varphi_{as} \varphi_{bs} \varphi_{cs}]^T$: vecteur de flux statorique.

$[R_s]$: respectivement la résistance statorique.

II.5.3. Les équations magnétiques de la machine:

L'expression matricielle des trois équations des flux statoriques est donnée comme suit :

$$[M_{sr}] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Ou sous forme condensée :

$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II.13})$$

Pour laquelle ont défini :

$[L_s]$: la matrice des coefficients d'inductances statoriques.

$[M_{sr}]$: la matrice des coefficients d'inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

De façon analogue, on définit au rotor les coefficients d'inductance suivants :

$[L_r]$: coefficient d'inductance propre d'une phase statorique.

$[M_r]$: coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$[M_{sr}]=[M_{rs}]$: valeur maximale des coefficients d'inductances mutuelles entre phases rotorique et statorique.

L'équation matricielle des flux rotoriques prend la forme suivante :

$$[M_{sr}] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Ou sous forme condensée:

$$[\varphi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{II.16})$$

Pour laquelle ont défini :

$[M_{rs}]$: la matrice des coefficients d'inductances mutuelles entre le rotor et le stator.

La matrice $[M_{rs}]$ est de même une matrice circulante, et on remarque qu'elle est la matrice transposée de la matrice analogue du stator :

$$[M_{rs}] = [M_{rs}]^T \quad (\text{II.17})$$

En remplaçant les équations (II.14) et (II.16) dans (II.4) on obtient les expressions matricielles suivantes :

$$\begin{cases} [V_s] = R_s[I_s] + [L_s] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d}{dt} ([M_{sr}][I_r]) \\ [V_r] = R_r[I_r] + [L_r] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d}{dt} ([M_{rs}][I_s]) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

II.6. La transformation de Park :

La transformation de Park est définie comme la substitution de trois enroulements immobiles, dont les axes magnétiques (a, b, c) sont décalés dans l'espace de 120° et alimentés par un système de courant triphasé, par deux enroulements orthogonaux (d, q) mobiles et alimentés par des courants constants. Dans les deux cas on aura un champ magnétique tournant. [Abd12]

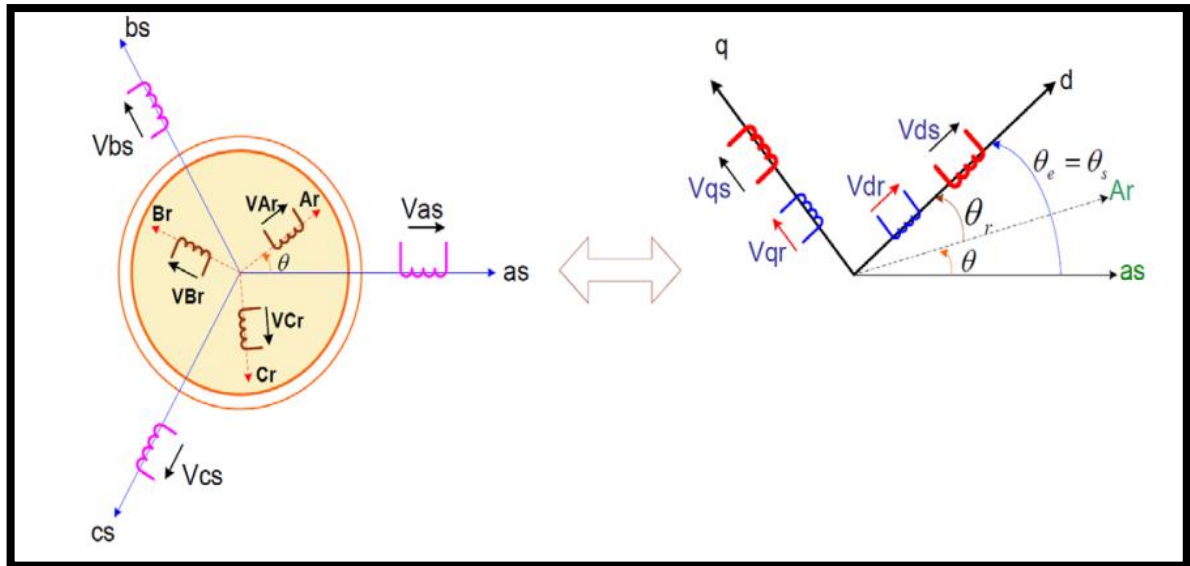


Figure (II.3): Représentation de la transformation dq de la machine.

θ : est le déphasage entre les axes O_{as} et O_{ar}

θ_s : est le déphasage entre les axes O_d et O_{as}

θ_r : est le déphasage entre les axes O_d et O_{ar}

On définit les différentes vitesses du repère de Park comme suit :

$w_a = \frac{d\theta_s}{dt}$: La vitesse du référentiel (O_d, O_q) par rapport au stator

$w_m = \frac{d\theta}{dt}$: La vitesse du rotor par rapport au stator

$w_a - w_m = \frac{d\theta_r}{dt}$: La vitesse du référentiel (O_d, O_q) par rapport au rotor

La transformation de Park(a , b , c) vers (d q o) est défini comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [A(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$

Le transformé de Park inverse (d q o) vers (a , b , c) est défini comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [A(\theta)]^T \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix}$$

Ou :

X_d : est la composante direct

X_q : est la composante quadratique

X_o : est la composante homopolaire (elle est nulle si le système (a, b, c) est équilibré)

La matrice de transformation de Park est définie comme suite :

$$[A(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Et la transformation inverse de Park est donnée par :

$$[A(\theta)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

II.7. Représentation de la MADA dans un repère biphasé (dq):

• Equation électriques:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{sq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

• Equations magnétiques

Les flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

• Equation mécanique

$$C_{em} = \frac{p_m}{\Omega_s} \quad ; \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad ; C_{em} = p \frac{P_m}{\omega_s}$$

$$C_{em} - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (\text{II.23})$$

Le couple électromagnétique C_{em} peut être exprimé, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = p \cdot (\varphi_{sd} \cdot I_{sq} - \varphi_{sq} \cdot I_{sd}) \quad (\text{II.24})$$

En remplaçant les flux par leurs expressions données par les relations (II.23) on peut établir d'autres expressions pour le couple :

$$\begin{aligned} C_{em} &= p \cdot (\varphi_{rd} \cdot I_{rq} - \varphi_{rq} \cdot I_{rd}) \\ C_{em} &= p \cdot M (I_{sq} \cdot I_{rd} - I_{sd} \cdot I_{rq}) \\ C_{em} &= p \cdot \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} \cdot I_{sq} - \varphi_{rq} \cdot I_{sd}) \\ C_{em} &= p \cdot \frac{M}{L_s} (\varphi_{sq} \cdot I_{rd} - \varphi_{sd} \cdot I_{rq}) \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

II.8 .Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état

Dans la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions dans le stator ainsi dans le rotor. En considérant les courant statoriques et les courants rotoriques comme des vecteurs d'état. Les équations (II.26) peuvent être disposées sous la forme d'une représentation d'état comme suite :

$$L \cdot \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot U \quad (\text{II. 26})$$

Avec :

x: Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de la commande.

U: Vecteur du système de commande.

Où :

$$X = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq}]^T$$

$$U = [V_{sd} \quad V_{sq} \quad V_{rd} \quad V_{rq}]^T$$

Pour la représentation matricielle :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & M & 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega)M & -R_r & (\omega_s - \omega)L_r \\ -(\omega_s - \omega)M & 0 & -(\omega_s - \omega)L_r & -R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 27}) \end{aligned}$$

II.9. Simulation de la machine asynchrone à double alimentation:

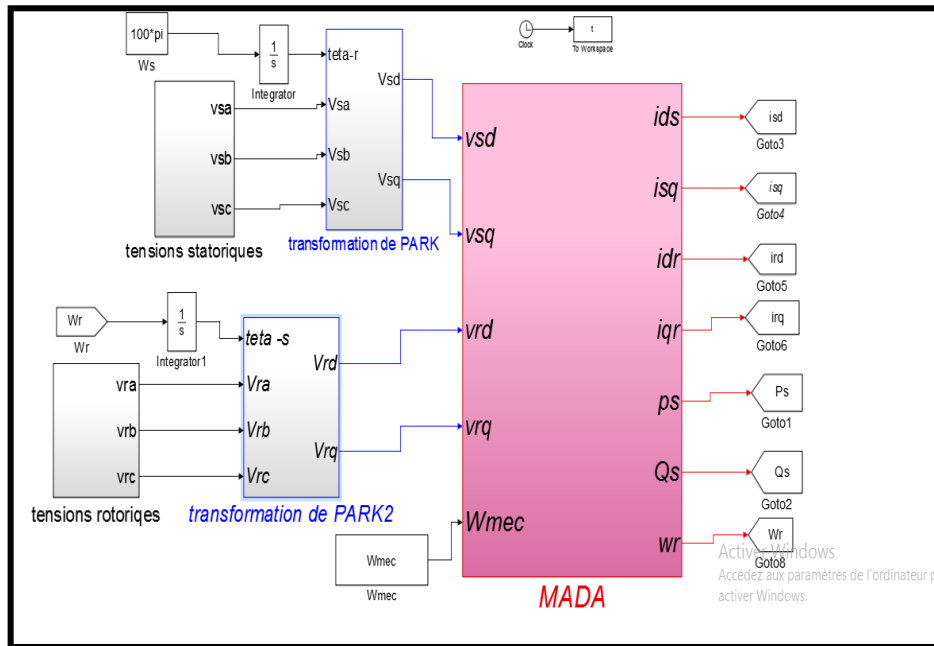


Figure (II.4): Schéma bloc de la simulation de la MADA.

II.9.1. Résultat de simulation de la MADA:

A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement générateur illustré dans la figure ci-dessous. Son modèle est basé sur les équations obtenues à partir de la transformation de Park (a, b, c à d, q)) lié au champ tournant.

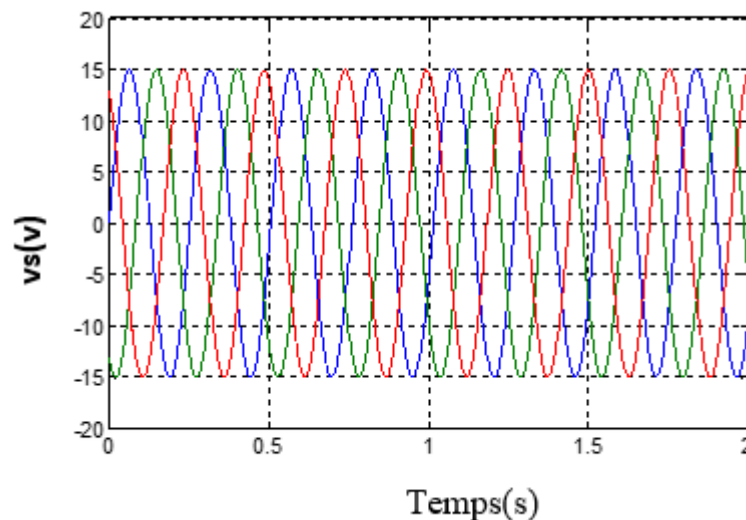


Figure (II.5): Les tensions statorique.

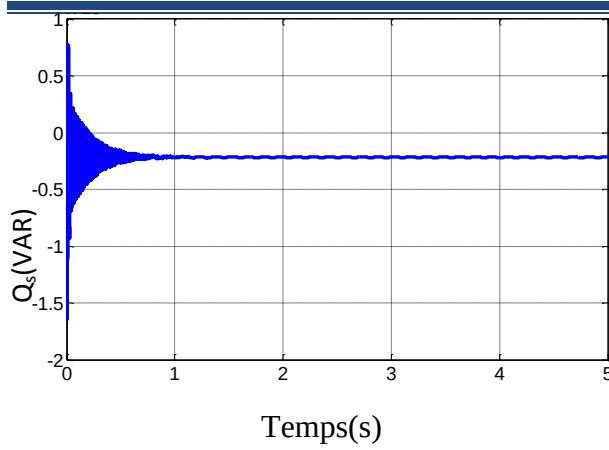


Figure (II.6): La puissance réactive

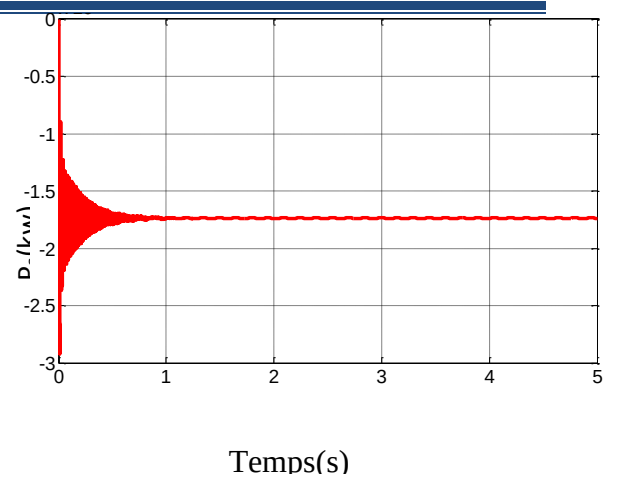


Figure (II.7): La puissance active

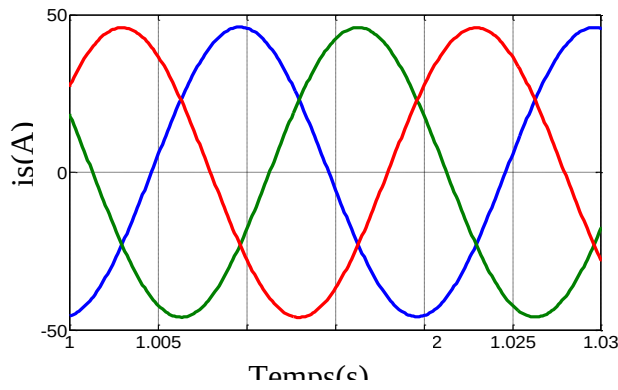


Figure (II.8): Les courants statorique avec zoom

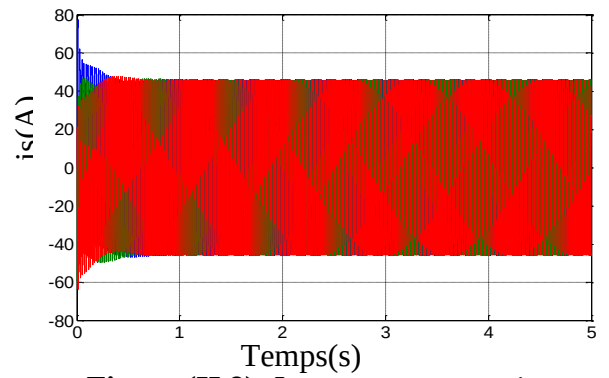


Figure (II.9): Les courants statorique

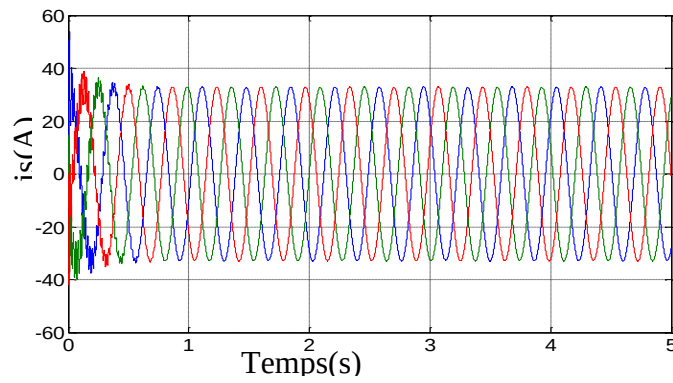


Figure (II.10): Les courants rotorique

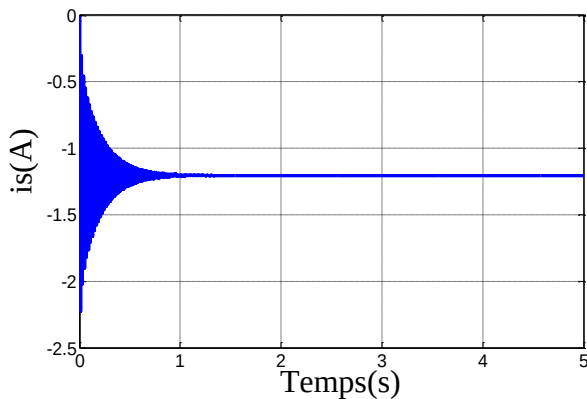


Figure (II.11): Le flux statorique à l'axe d

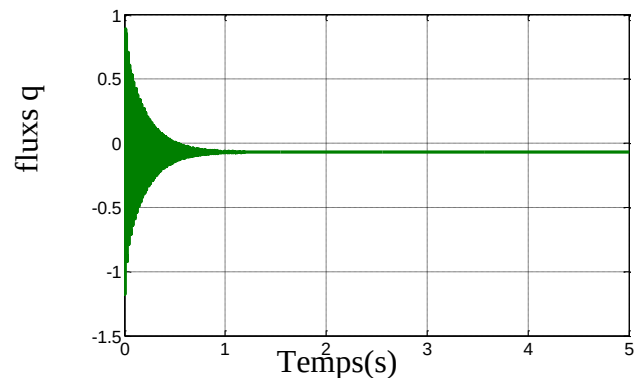


Figure (II.12): Le flux statorique à l'axe q

II.9.2. Interprétation de résultat de simulation:

Les résultats montrés sur les *Figure II.4* sont ceux obtenus par le modèle d'une MADA de puissance 7.5KW.

Les résultats de simulation sont obtenus pour le modèle de MADA, alimentée directement par deux sources de tension triphasées (le stator et le rotor), l'une coté stator avec une fréquence de 50Hz et d'amplitude =220v, et l'autre source coté rotor avec une amplitude de 10v et une fréquence égale à la fréquence rotorique est égale $g \cdot \omega_s$.

Le rotor de la MADA entraînée à une vitesse fixe égale à 1600 tr/min.

Les résultats de simulation obtenus montrent que pendant le régime dynamique, la puissance délivrée au réseau est négatif atteint une valeur de 1.7 KW.

On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environs 0,05s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques.

II.10. Modélisation de la turbine:

Un système éolien transforme l'énergie de la masse d'aire mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée parla vitesse de rotationnelle couple mécanique.

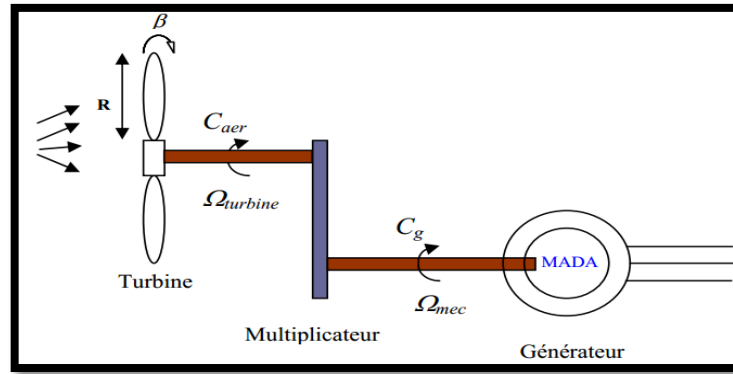


Figure (II.13): Schéma de la turbine éolienne. [Mou12]

II.10.1. La puissance d'une éolienne:

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante:

$$P_V = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (II.28)$$

Nous constatons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent:

$$P_{aéro} = C_P \cdot P_V = C_P(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (II.29)$$

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales (la vitesse de rotation de la turbine) et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (II.30)$$

II.10.2. Le coefficient de puissance:

Le coefficient de la puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend du nombre de pales du rotor et de leurs formes géométriques et aérodynamiques de la turbine (longueur, profil des sections).

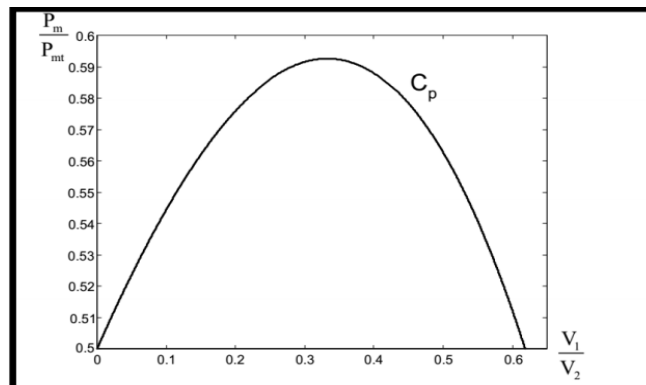


Figure (II.14): Coefficient de puissance

II.10.3. Modèle du multiplicateur:

La boîte de vitesse (multiplicateur) permet de convertir la vitesse réduite des pales en une vitesse élevée nécessaire pour la machine électrique selon le rapport de multiplication de transmission G . Cet élément définit le couple mécanique et la vitesse de rotation de la machine comme suit:

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.31})$$

Pour le couple, on aura :

$$\Omega_g = \frac{\Omega_{a\acute{e}re}}{G} \quad (\text{II.32})$$

II.10.4. Equation dynamique:

La transmission de puissance est composée de l'inertie du rotor de la turbine et de l'inertie de la génératrice. Le schéma mécanique équivalent proposé intègre ces deux inerties.

L'accélération de l'ensemble est modélisée par une équation différentielle du premier ordre :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \Sigma \text{descouple} = C_{mec} \quad (\text{II.33})$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est déterminé directement par:

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.34})$$

J_t : C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

Le couple résistant qui résulte des frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \Omega_{mec}$$

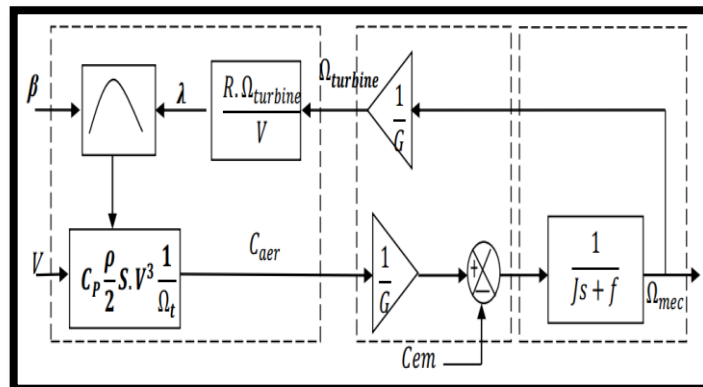
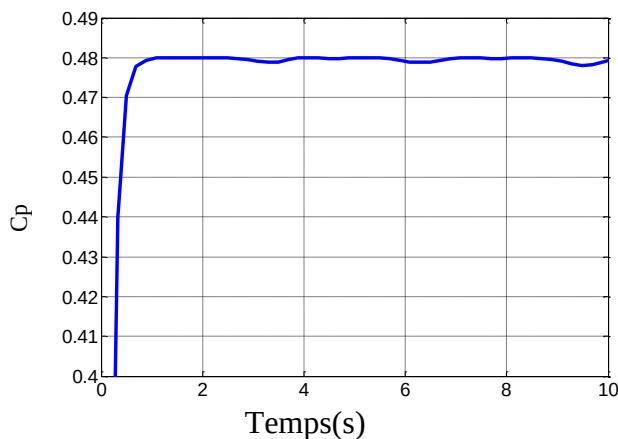
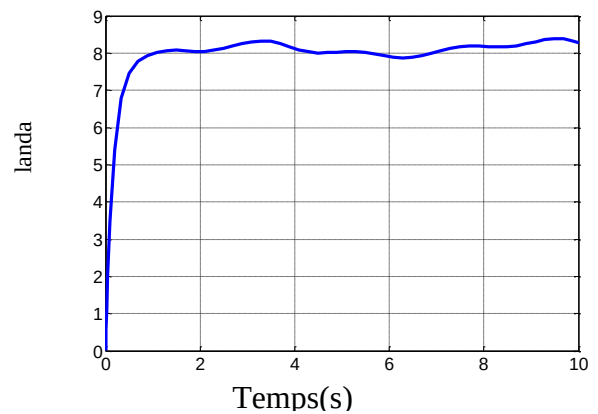
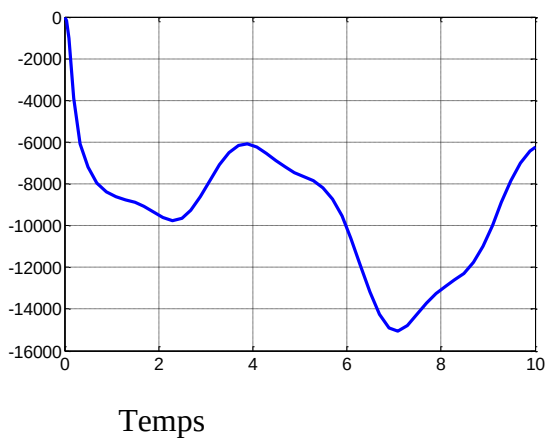
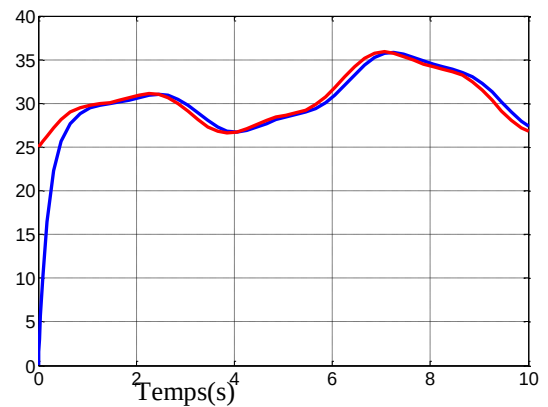


Figure (II.15): Schéma bloc du modèle de la turbine.**II.12. Résultats de simulation:**

Nous présentons la simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne turbine avec MPPT avec asservissement de la vitesse figure. II.21 . Les simulation ont été faits dans l'environnement MATLAB/SIMULINK pour une turbine de 300kw dont les paramètres sont donnés dans l'annexe. Le coefficient de puissance est donne un Lambda optimale = 8.1, ainsi le Coefficient C_p atteint une valeur maximale de 0.48.

**Figure (II.16):** le coefficient de puissance**Figure (II.17):** La vitesse spécifique λ **Figure (II.18):** Puissance mécanique produite par la turbine**Figure (II.19):** La vitesse de la turbine et sa référence

Les résultats de simulation que nous allons présenter dans les figure II .16, figure II .17, figure II .18, figure II .19 . Ces résultats obtenus basées sur la structure de commande avec asservissement de la vitesse.

II.11. Stratégies Commande MPPT:

II.11.1. Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique:

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine (II.33), on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [MAM13]:

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. On considère que le couple mécanique C_{mec} est nul.

$$C_{mec} = 0 = J_T \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.35)$$

Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} = 0$), on obtient $C_g = C_{em}$

A partir d'une estimation du couple éolien, on réalise le réglage du couple électromagnétique :

$$C_{em-est} = \frac{C_{are-est}}{K} \quad (II.36)$$

Donc à partir l'équation (II.6), on obtient

$$C_{are-est} = C_{P2} \frac{1}{2} \rho S V^3 \frac{1}{\Omega_{tur-est}} \quad (II.37)$$

Une estimation du $\Omega_{tur-est}$ est donnée à partir de la mesure de Ω_{mec}

$$\Omega_{tur-est} = \frac{\Omega_{mec-est}}{k} \quad (II.38)$$

Une estimation de la vitesse du vent au niveau de la turbine est donnée selon l'équation (II.30)

$$V_{est} = \frac{\Omega_{tur-est} \cdot R}{\lambda_{opt}} \quad (II.39)$$

Alors pour extraire le maximum de la puissance générée, on doit fixer le ratio de vitesse à la valeur C_{pmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance, Figure (II.3).

A partir des équations précédentes, on obtient une relation globale de contrôle de l'expression C_{em-ref} en fonction de la vitesse mécanique.

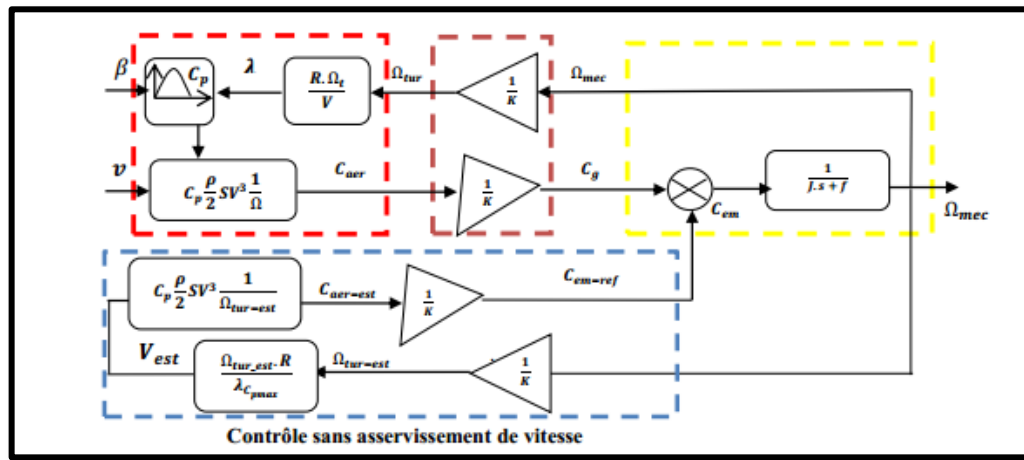


Figure (II.20): Schéma bloc sans asservissement de la vitesse. [Tar19]

II.11.2. Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique:

Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, on utilise un régulateur asservissement de la vitesse, alors C_{em-est} est obtenu par une relation inverse indirecte[Tar19].

$$C_{\text{em-est}} = \text{PI}(\Omega_{\text{mec-ref}} - \Omega_{\text{mec}}) \quad (\text{II.40})$$

où

PI est le régulateur de vitesse.

En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{\text{mec-ref}} = K \Omega_{\text{tur-ref}} \quad (\text{II.41})$$

Selon la Figure (II.3) du coefficient de puissance C_p en fonction (λ , β), on constate que lorsque $\beta = 2$ on obtient la valeur maximale du C_p . La référence de la vitesse de la turbine s'exprime par :

$$\Omega_{\text{tur-réf}} = \frac{\lambda_{\text{Cpmax}} \cdot V}{R} \quad (\text{II.42})$$

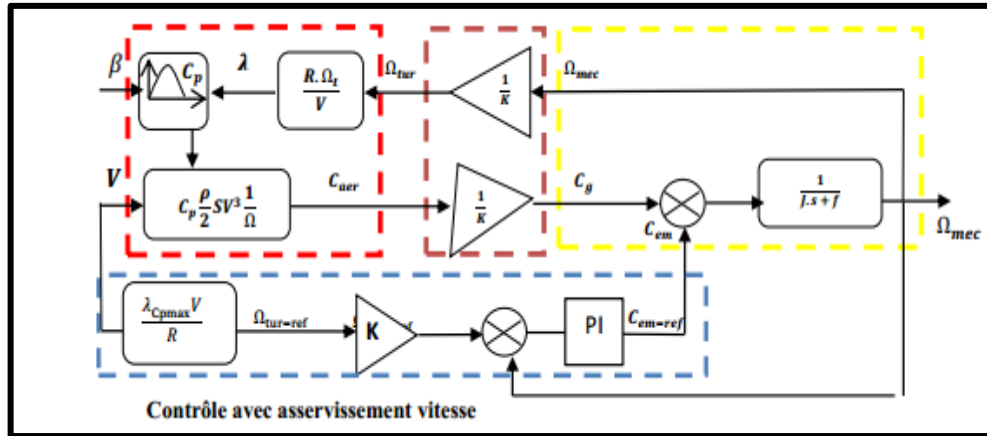


Figure (II.21): Schéma bloc avec asservissement de la vitesse. [Tar19]

II.12.Conclusion:

Dans ce chapitre on a étudié le modèle de la MADA qui été établi en passant du système réel triphasé du modèle vers un système biphasé de Park. Ce système permet de contrôler les puissances actives et réactive statorique dans le générateur. Ainsi nous avons réalisé la modélisation d'une turbine éolienne et sa commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique pour la maximisation de la puissance à partir de la variation de la vitesse du vent. Dans le chapitre prochain, on va utiliser une stratégie de commande basée sur un régulateur PI.

Chapitre III

la command par mode
glissant de la GADA
connecté au système
éolien globale

III.1. Introduction:

La commande de la MADA est une opération délicate à cause du couplage existant entre leurs différentes variables d'état et du nombre important des variables de commande. Contrairement à la machine à courant continu qui présente l'avantage de la simplicité de sa commande. Afin d'obtenir avec les machines à double alimentation qui peuvent être à base de moteurs asynchrones à rotor bobiné, des performances semblables à celles du MCC, il était nécessaire de séparer le contrôle du flux (le courant d'excitation) et le contrôle du courant générant le couple électromagnétique (le courant d'induit). Ce pour cela dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la commande vectorielle en puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation fonctionnement génératrice intégrée avec une turbine éolien [Hou]. Dans une partie nous avons adopté la technique de régulateur PI.

III.2. Commande vectorielle de la machine:

III.2.1. Principe de la commande vectorielle de la MADA :

Cette commande est l'une des méthodes utilisées pour optimiser la qualité d'énergie produite et injectée au réseau. Dans cette technique, nous proposons un algorithme de commande basé sur l'orientation du flux statorique de la machine qui met en évidence les relations entre les grandeurs des puissances statoriques et les tensions rotoriques générées par l'onduleur. Ces relations permettent l'action sur les signaux rotoriques afin de contrôler indépendamment l'échange des puissances active et réactive générées au stator de la machine.

Le principe de cette commande est similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée ; à savoir le contrôle indépendamment des puissances active et réactive générées au stator de la machine. La puissance active dépend uniquement du courant rotorique i_{qr} , et la puissance réactive dépend uniquement du courant i_{dr} (**figure III.1**) [Far18]

Prenons l'une des quatre expressions du couple électromagnétique trouvées dans le chapitre précédent, par exemple l'équation suivante :

$$C_e = p(\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (\text{III.1})$$

Si on suppose que le flux statorique est orienté suivant l'axe d du repère de Park, on aura :

$$\phi_s = \phi_{ds} \quad \Rightarrow \quad \phi_{qs} = 0$$

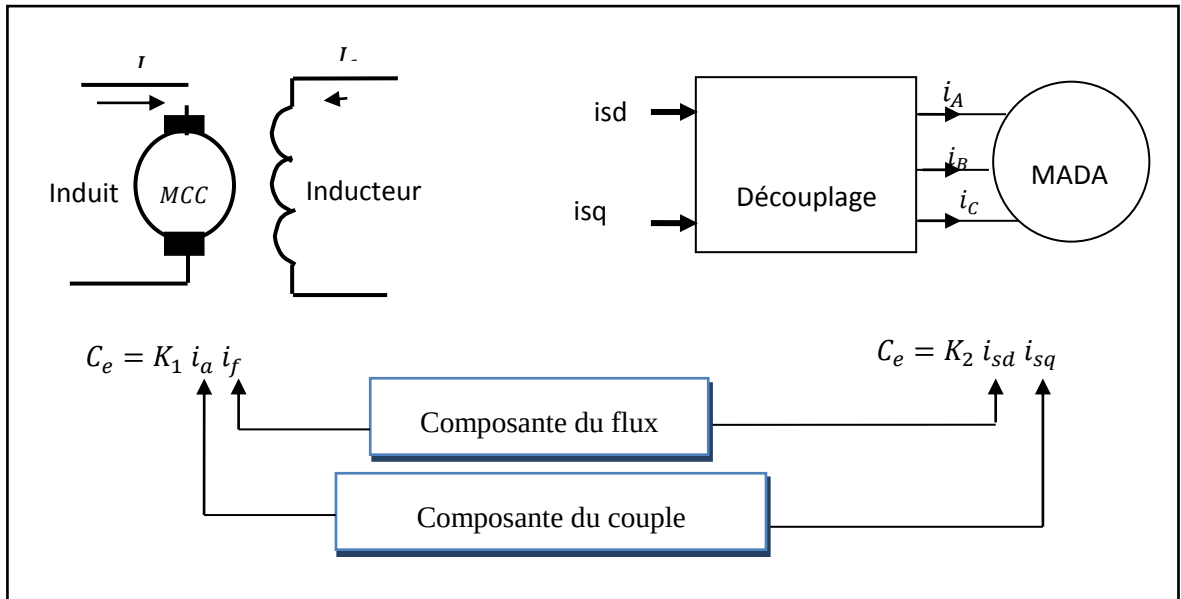


Figure (III.1): Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.

Donc l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_e = p\phi_{ds} \cdot i_{qs} \quad (\text{III.2})$$

II.2.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine.

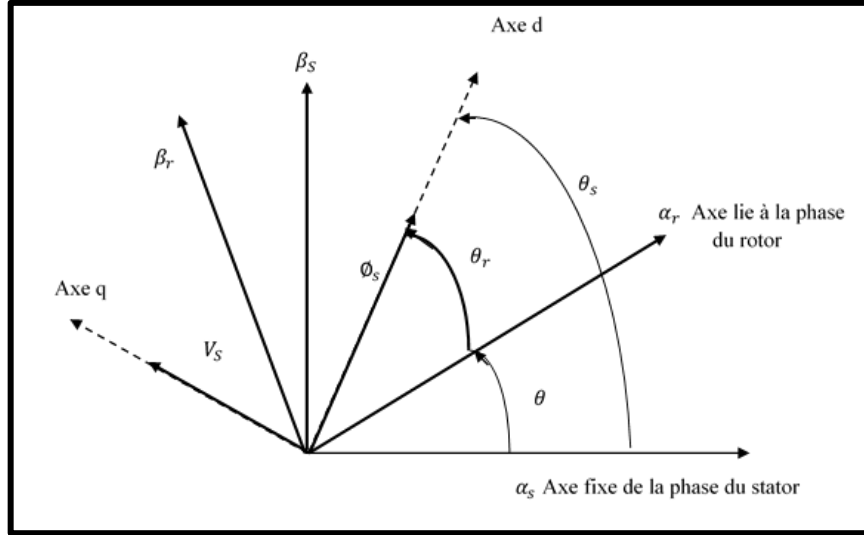


Figure (III.2): Orientation de la tension et de flux statorique.

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Dans les systèmes d'équations (III. 3), on néglige la résistance des statoriques, c'est un hypothèse pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne

Ce système se réduit à la forme suivante:

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Les équations des flux :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ 0 = L_s \cdot i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_e = p \frac{v_s}{\omega_s} i_{qs} \quad (\text{III.6})$$

III.3. Modèle de la MADA pour le control des puissances statorique:

III.3.1. Expressions des puissances actives et réactive statoriques:

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère q d, s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme:

$$\begin{cases} P_s = v_s i_{qs} \\ Q_s = v_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Les puissances active P_s et réactive Q_s sont donc fonction des courants statoriques i_{qs} et i_{ds} respectivement, sur les quels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{v_s}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{cases} P_s = -\frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = \frac{v_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Il ressort de l'expression (II.10) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, 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 $\frac{v_s^2}{\omega_s \cdot L_s}$ imposée par le réseau.

III.3.2. Expressions des tensions rotoriques:

A partir du système d'équation (II.5) les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M \cdot v_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (III.4), on trouve :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

v_{dr} et v_{qr} : sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

$L_r - \frac{M^2}{L_s}$ est le terme de couplage entre les deux axes ;

$g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Les équations (3.10), (3.12) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler **figure (III.3)**.

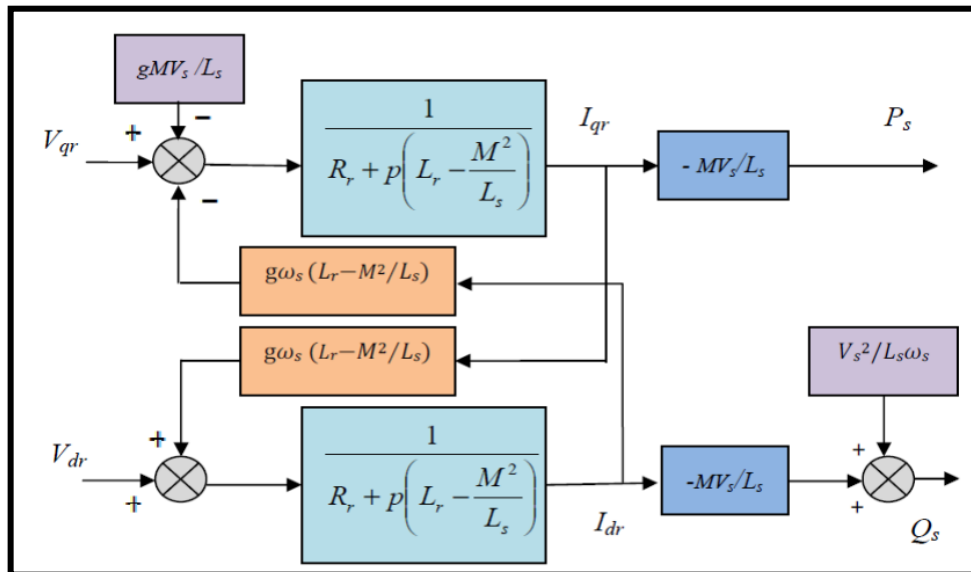


Figure (III.3): Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.**III.4. Contrôle indépendant des puissance active et réactive:**

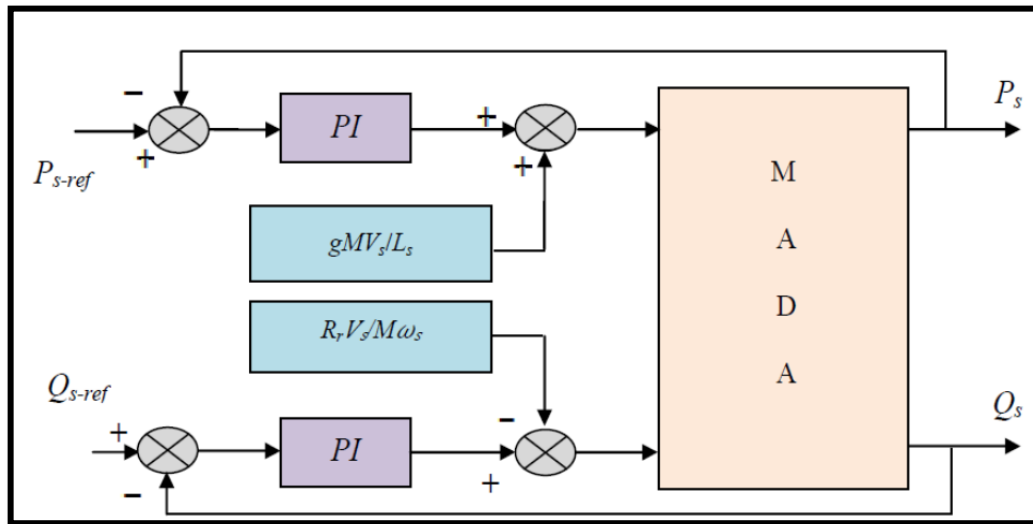
Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

III.4.1. Commande directe:

Si l'on observe les équations (III.13), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{M.v_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (III.15) disparaissent en régime permanent. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + g \frac{M \cdot v_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

v_{dr} et v_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus

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

L'effet du terme de couplage $g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. En revanche, le terme $g \frac{M \cdot v_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas

négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe.

III.4.2. Commande indirecte:

III.4.2.1. Commande en boucle ouvert:

La commande en boucle ouvert est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence. Elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q. A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système (III.13) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations [Ahm11]:

$$\begin{cases} i_{qr_ref} = -\frac{L_s}{M \cdot v_s} \cdot P_{s_ref} \\ i_{dr_ref} = -\frac{L_s}{M \cdot v_s} \cdot Q_{s_ref} + \frac{v_s}{\omega_s \cdot M} \end{cases} \quad (III.14)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

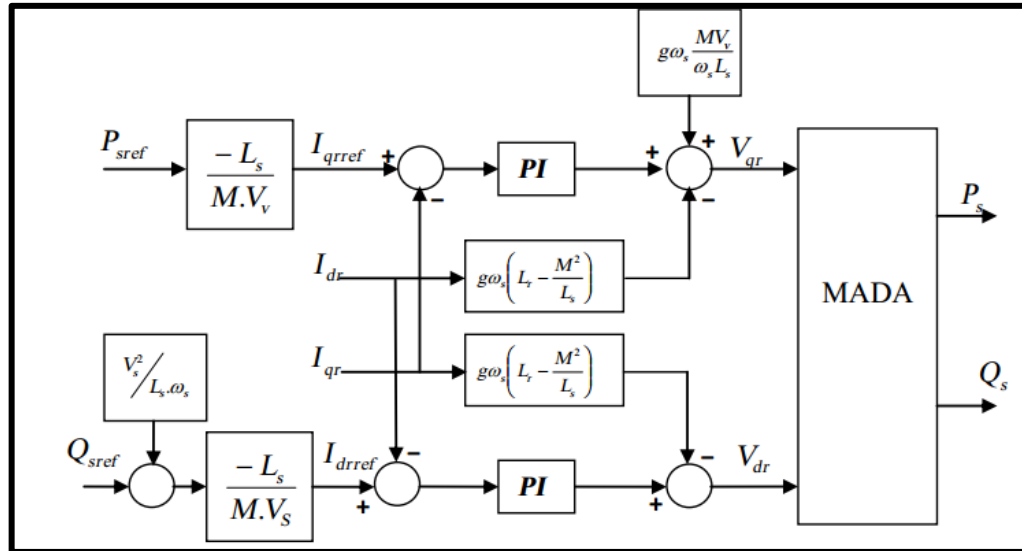


Figure (III.5): Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive

III.4.2.2. Commande en boucle fermé:

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante [Ahm11]:

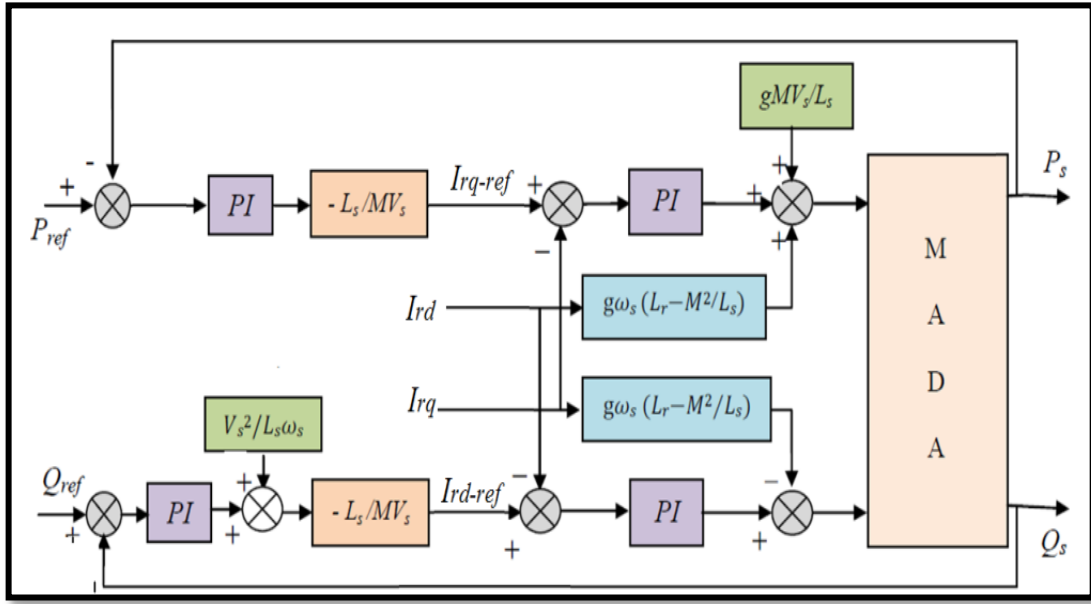


Figure (III.6): Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toutefois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers.

Cette structure que nous allons traiter dans notre travail. La synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée. Le dimensionnement du régulateur PI est présenté dans l'annexe [Ahm11].

III.5. Modélisation et commande du convertisseur de puissance côté machine:

La structure générale d'un onduleur de tension deux niveaux est représentée par la Figure. III.7 L'onduleur triphasé de tension deux niveaux est constitué de 02 interrupteurs (IGBT) par bras. Ces derniers ont la particularité d'être bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Chaque IGBT est placé en antiparallèle avec une diode afin d'assurer la circulation du courant dans les deux sens. [D KAUIROUS]

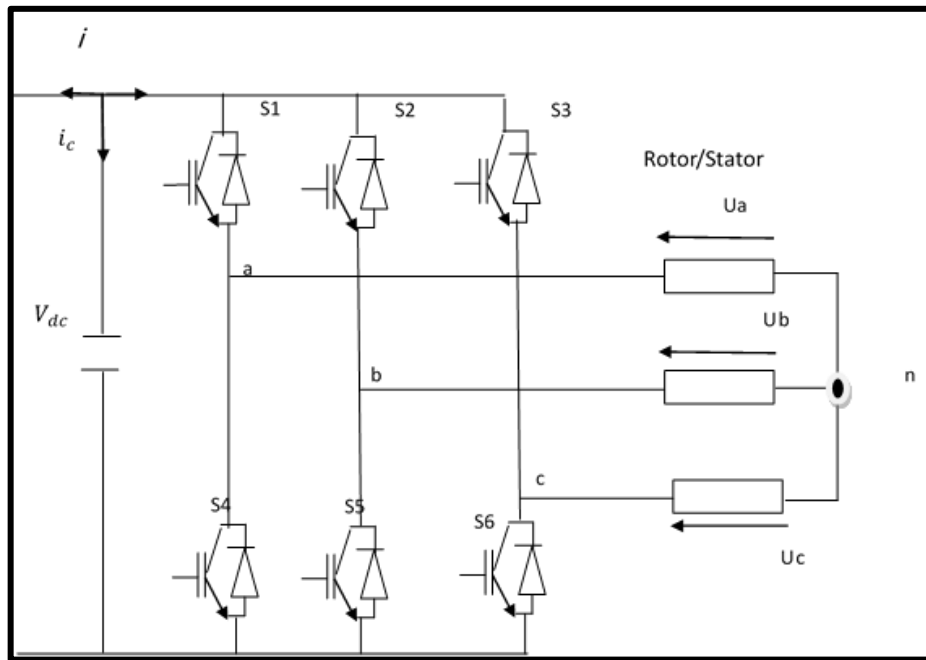


Figure (III.7): schéma bloc d'un onduleur MLI.

• Pour le branche 1

$$S_a = 0 \text{ dans le cas de } (S_1 \text{ passante et } S_4 \text{ bloquée})$$

• Pour le branche 2

$$S_b = 0 \text{ dans le cas de } (S_2 \text{ passante et } S_5 \text{ bloquée})$$

• Pour le branche 3

$$S_c = 0 \text{ dans le cas de } (S_3 \text{ passante et } S_6 \text{ bloquée})$$

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$U_a + U_b + U_c = 0 \quad (\text{III.15})$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} U_a = \frac{V_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ U_b = \frac{V_{dc}}{3}(S_a - 2S_b - S_c) \\ U_c = \frac{V_{dc}}{3}(S_a - S_b - 2S_c) \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

Sa Sb Sc représentent 'état de commutation des l'interrupteurs dans l'onduleur pour régler simultanément la fréquence et la valeur efficace de tension de sortie de l'onduleur. Il ya plusieurs techniques comme:

Il existe plusieurs types de commandes, leur but est d'améliorer les formes des grandeurs de sortie des onduleurs tel que la tension et le courant, c'est-à-dire de les rendre le plus sinusoïdales possible.

Parmi ces types de commandes on cite :

- La commande pleine onde.
- La commande MLI Vectorielle (Modulation de Largeur d'Impulsion).
- Commande MLI triangle- sinusoïdales.

III.6. Stratégie de commande MLI sinus – triangle:

La modulation triangulo sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion figure (III .8) puisque son principe repose sur l'intersection entre deux signaux figure (III .9).

Premièrement signale est l'onde modulante, dite tension de référence, généralement sinusoïdale.

Deuxièmes c'est l'onde porteuse de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale. [RAHAB yacine]

Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs dans le convertisseur de puissance c à d $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$

Cette comparaison est caractérisée par deux paramètre :

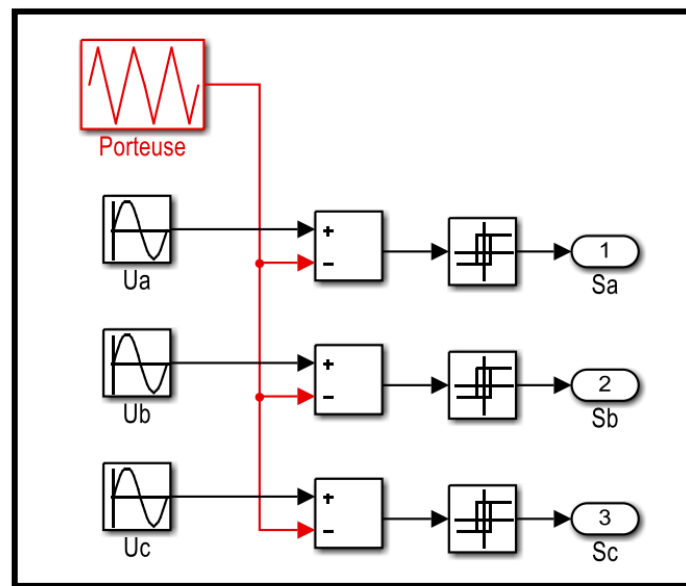


Figure (III.8): schéma bloc d'une MLI sinus triangle.

L'indice de modulation m :

qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f de la référence : $m = f_p / f$

• **Le taux de modulation r :**

(ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse: $r = V_r / V_p$.

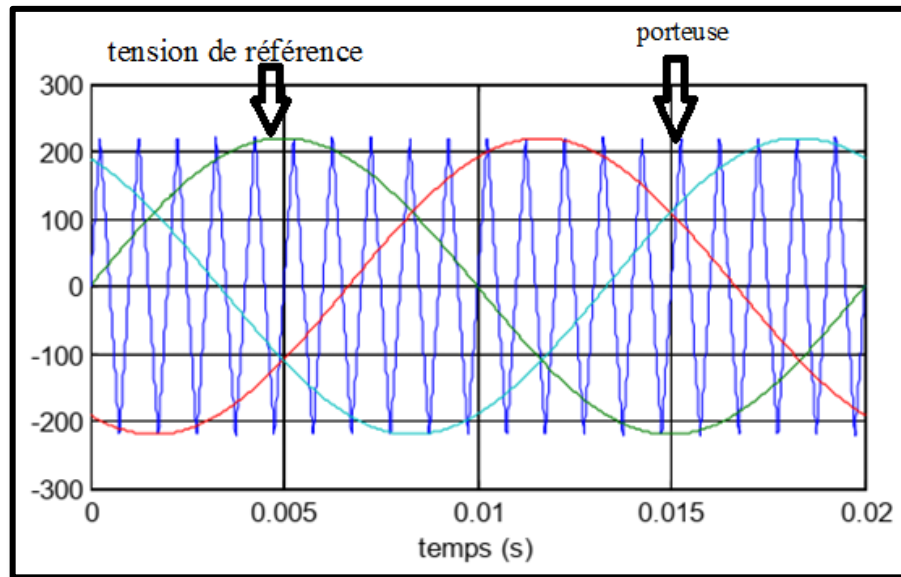


Figure (III.9): signal de porteuse et signaux de référence.

III.7. Structure globale d'une chaîne de conversion éolienne :

La chaîne de conversion éolienne globale **Figure III.10** est constituée par les éléments suivants; un générateur asynchrone à double alimentation à rotor bobiné GADA connecté directement au réseau électrique, avec une turbine éolienne commandée par la stratégie de l'extraction de maximisation de la puissance MPPT.

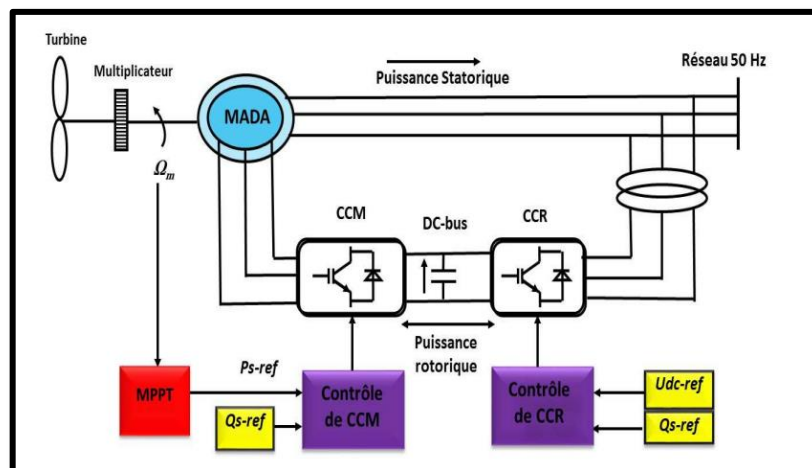


Figure (III.10): Schéma bloc Structure globale d'une chaîne de conversion éolienne

III.8. Simulations

A l'aide du logiciel MATLAB, les résultats de simulation obtenus d'un réglage Des puissances statoriques d'un système éolien basé sur une MADA figure III .10, ou la

commande en puissances est basé sur la commande direct en boucles fermé figure (III .6). Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur utilisée dans la simulation sont reportés en annexe.

Dans ce type de commande nous avons adopté la régulation classique PI dans les quatre boucles de régulations, deux pour les courants rotorique, et deux pour les puissances statorique . Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

Les figures suivant montrent les performances de régulation des système éolien global figure .III.10, face aux variations de profile de vent figure III.26 qui prend les valeurs 5, 7 et 9 m/s aux instants 0s, 3s, 5s et 8s respectivement :

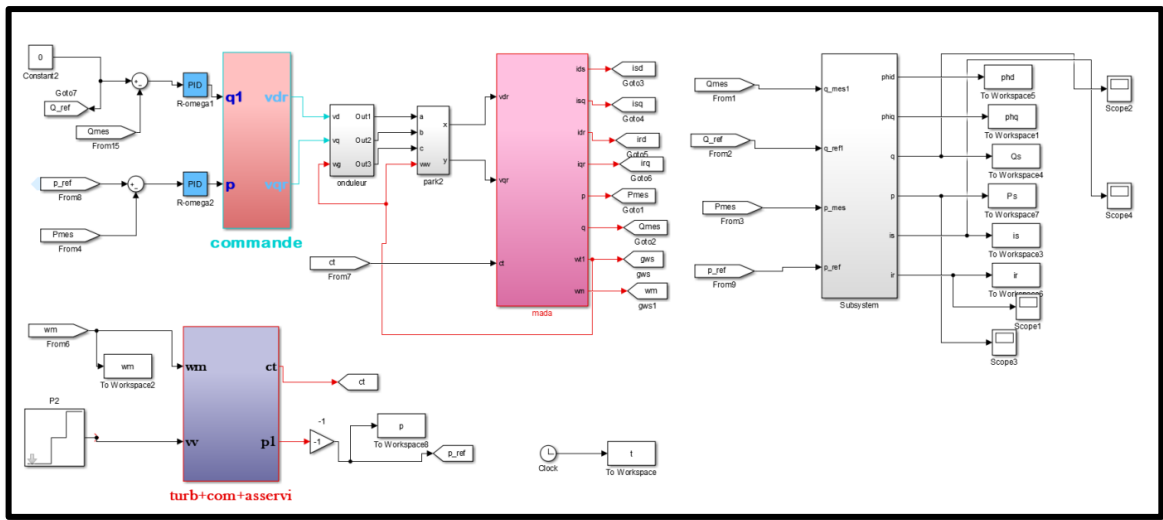


Figure III.11: schéma bloc de simulation La commande vectorielle de la GADA connecté au système éolien.

III.8.1. Résultats:

- Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique i_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe i_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.
- Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.

- La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA.
- La puissance réactive est nulle, c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire.

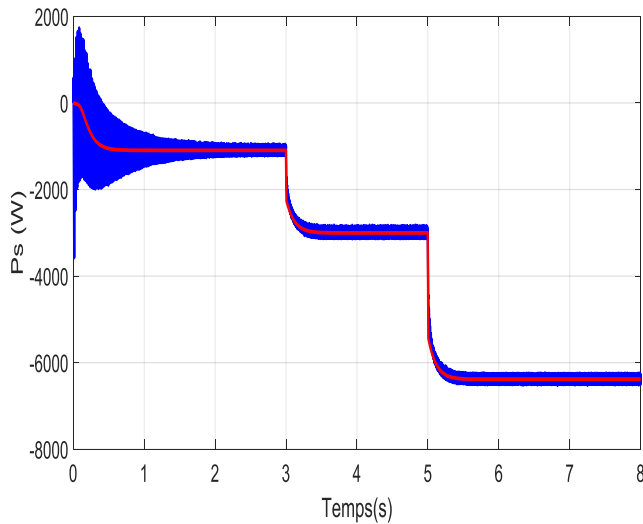


Figure (III.12): La puissance active statorique

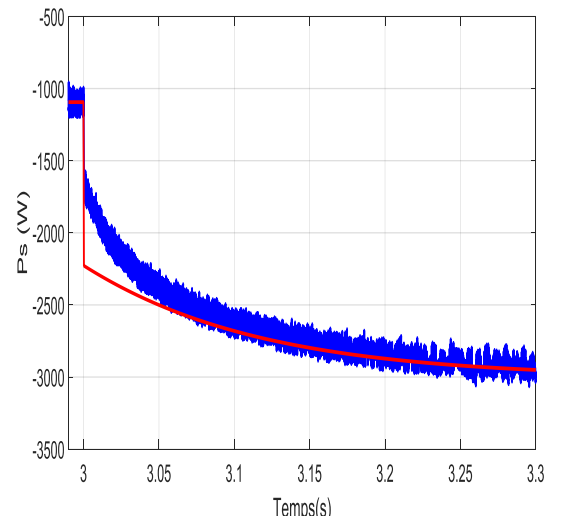


Figure (III.13): La puissance active Avec zoom

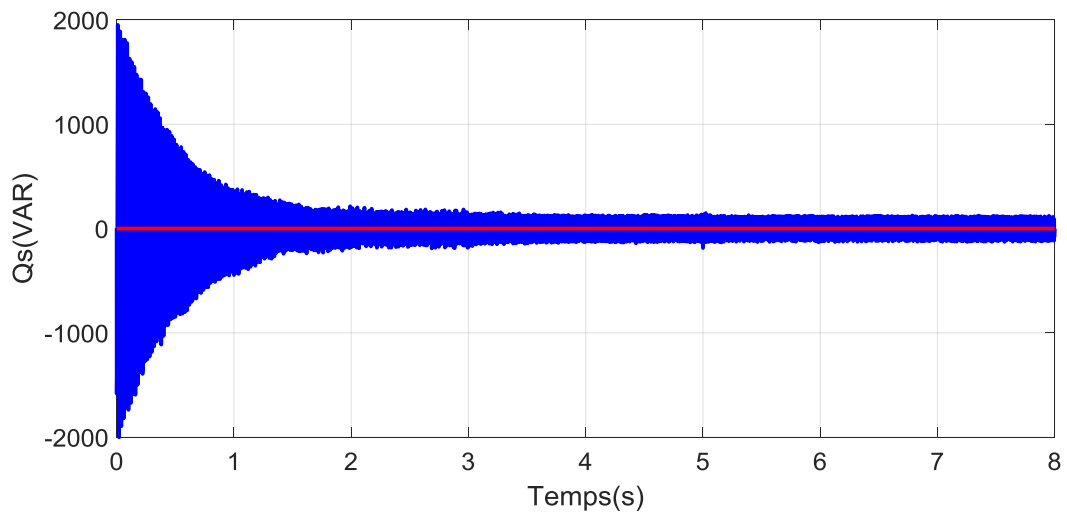


Figure (III.14): La puissance réactive statorique

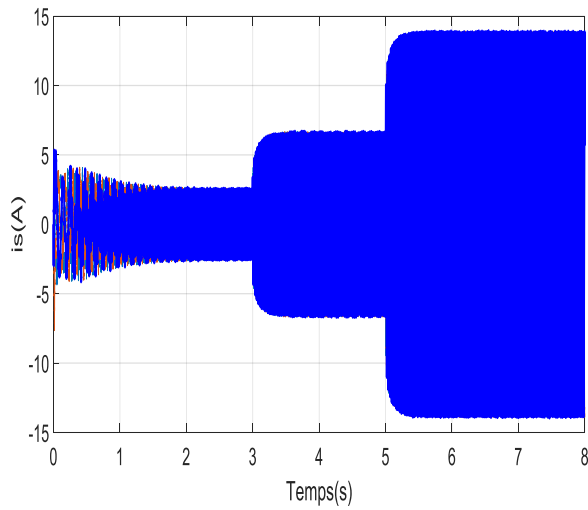


Figure (III.15): Les courants statatorique

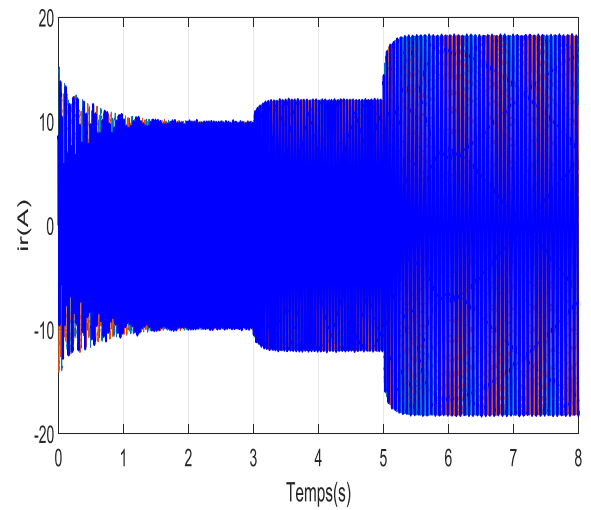
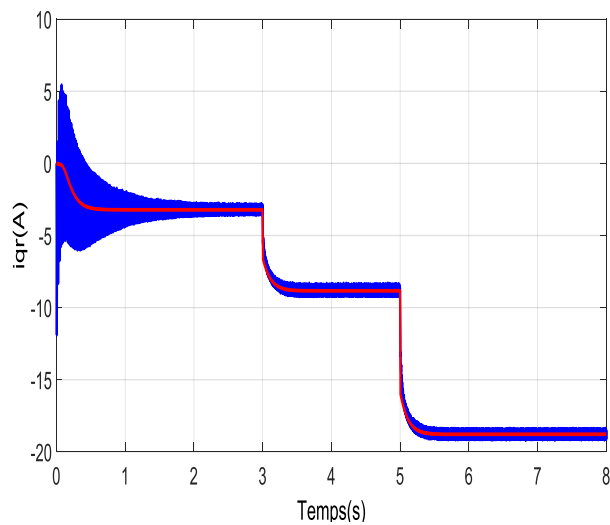
Figure (III.16): Les courants *rotorique*

Figure (III.17): Le courant rotorique selon l'axe q

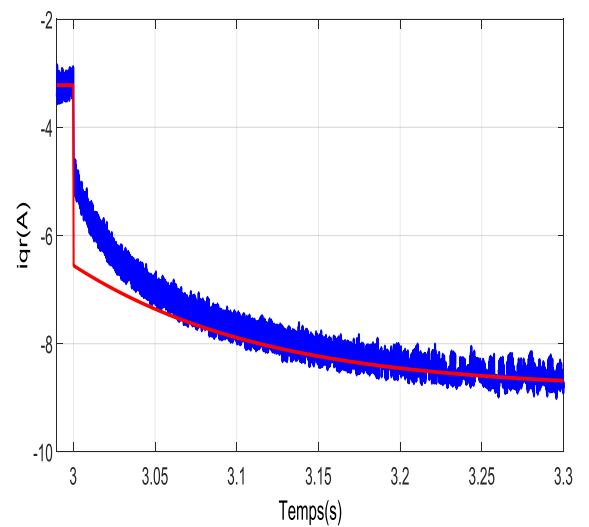


Figure (III.18): Le courant rotorique selon l'axe q Avec zoom

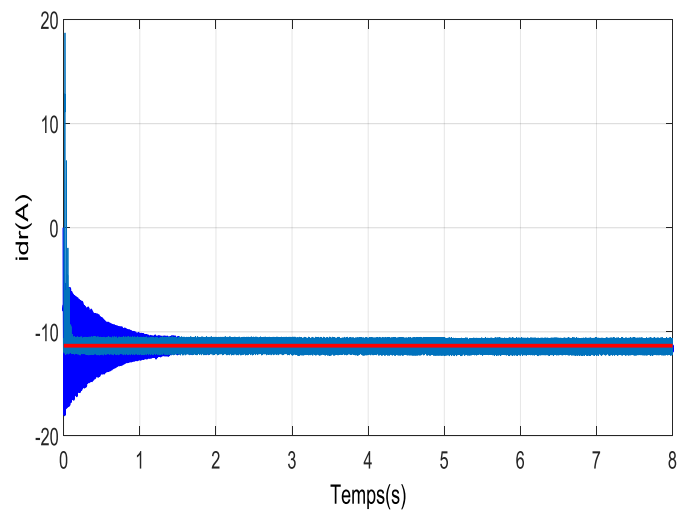


Figure (III.19): Le courant rotorique selon l'axe d

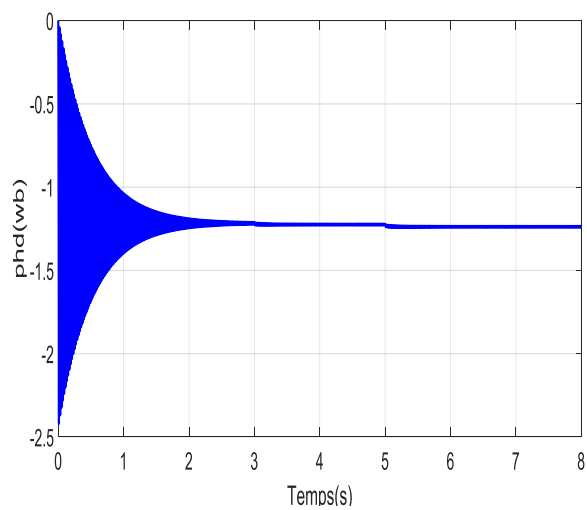


Figure (III.20): Flux statorique d

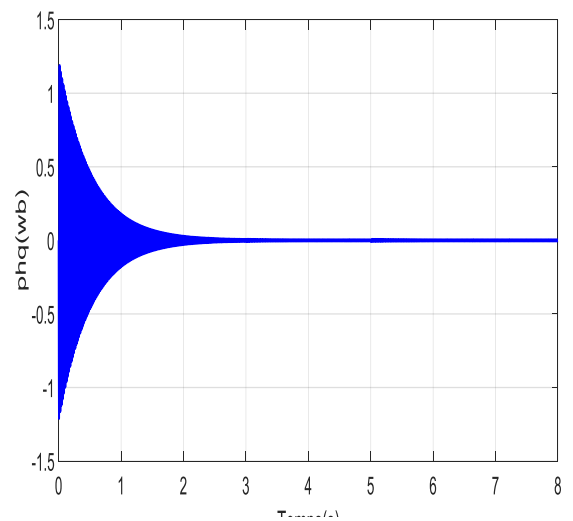


Figure (III.20): Flux statorique q

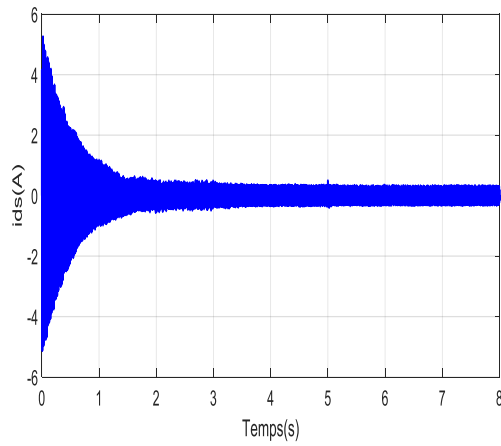


Figure (III.21): Le courant statorique selon l'axe d

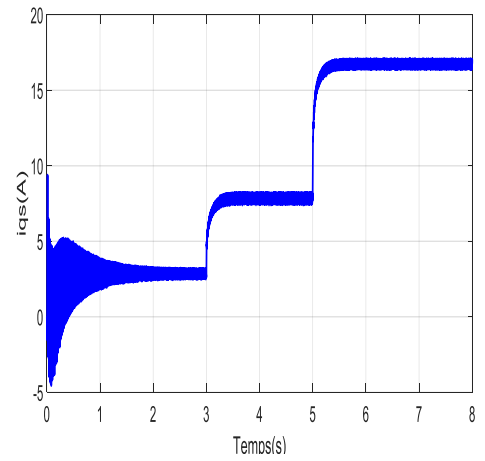


Figure (III.22): Le courant statorique selon l'axe q

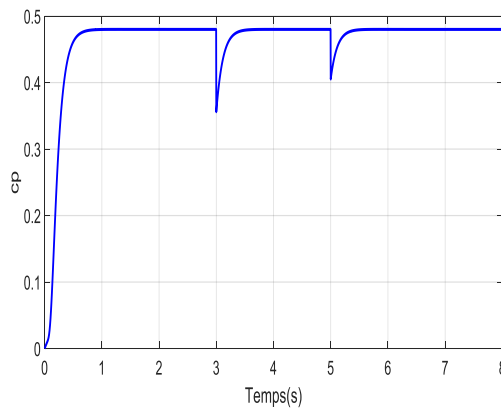


Figure (III.23): Le coefficient de puissance

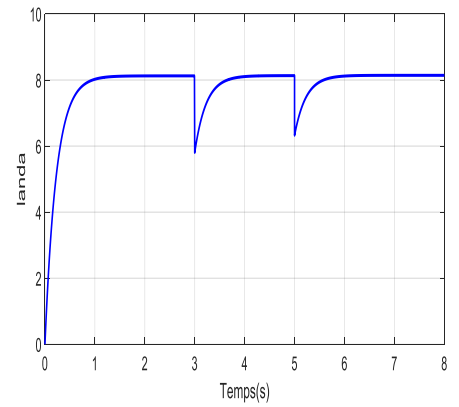


Figure (III.24): La vitesse spécifique

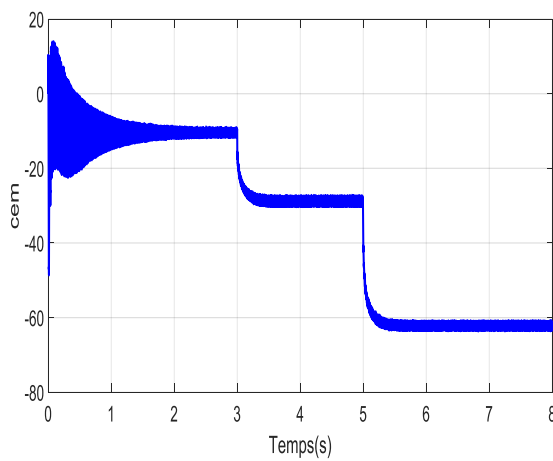


Figure (III.25): Le couple électromagnétiques

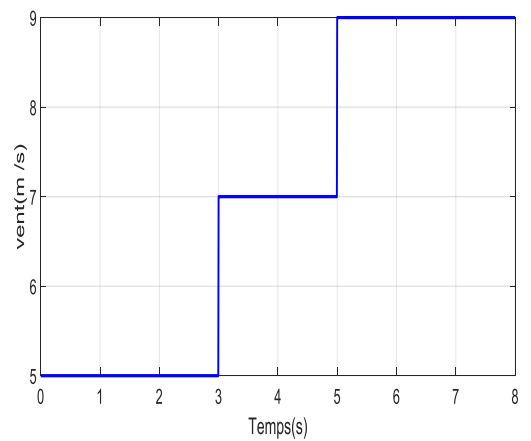


Figure (III.26): L vitesse du vent

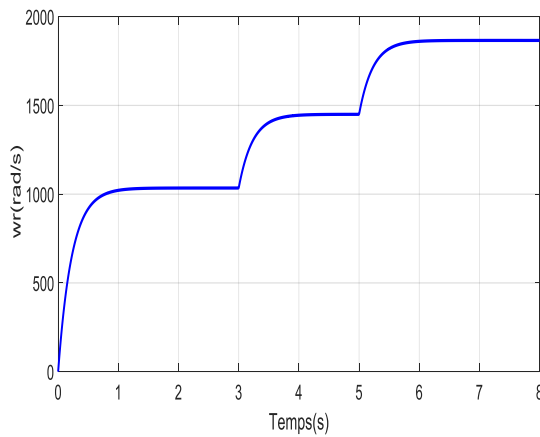


Figure (III.27): La vitesse de la Générateur

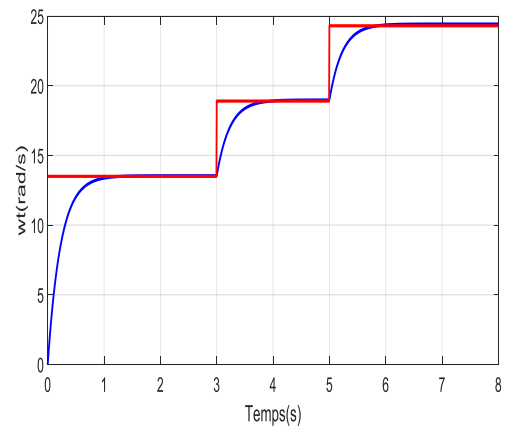


Figure (III.28): La vitesse de la turbine et sa référence

II.9. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active.

CHAPITRE IV

*la command par mode
glissant de la GADA
connecté au système éolien
globale*

IV.1. Introduction:

Les techniques de commande classiques (régulateurs PI et PID par exemple), nécessitent une parfaite connaissance du modèle du système à régler. Ces approches conduisent à des lois de commande dont les performances sont fortement liées à la fidélité du modèle dynamique utilisé pour décrire le comportement du système.

Des erreurs de modélisation ou des variations paramétriques du système peuvent détériorer les performances du réglage puisqu'elles interviennent directement au calcul de la commande.

Parmi plusieurs types de commandes modernes qui ont attiré l'intention de beaucoup de chercheurs on trouve la commande par mode de glissement.

Dans ce chapitre, nous montrons comment la commande par mode de glissement peut être appliquée au contrôle de la GADA.

IV.2. Principe de la commande par mode de glissement:

Etant un cas particulier de la commande à structure variable, la commande par modes glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. Ce succès est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien et le glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase comme montré sur la figure (IV.1) [Aym09].

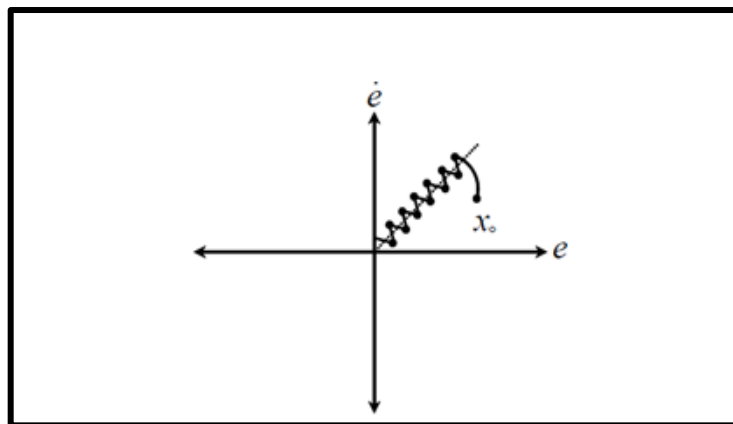


Figure (IV.1): Modes de fonctionnement dans le plan de phase.

La trajectoire dans la phase (exemple système d'ordre deux) est constituée de trois parties distinctes :

- Le mode de convergence (MC): durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quelle point initiale dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode de glissant (MG): durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine de plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x) = 0$.
- Le mode de régime permanent (MRP) : il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine de plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et la performance de la commande. [KAI13]

IV.3.Conception de la commande par mode de glissement :

La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par[AMI08] :

- Choix des surfaces de la commande par mode de glissement ;
- Conditions d'existence et de convergence ;
- Loi de commande par mode de glissement .

IV.4. Choix des surfaces de la commande par mode de glissement:

On considéré le modèle d'état suivant :

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = A.X + B.U \quad (\text{IV.1})$$

Ou :

[X] est le vecteur d'état.

[U] est le vecteur de commande.

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande [U].

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence x_d , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \delta \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{IV .2})$$

δ : gain positif ;

r : degré relatif ;

$e(x) = x_d - x$: écart de la variable à réguler.

IV.5. Conditions d'existence et de convergence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence [Nao17]:

IV.5.1.Fonction de Lyapunov :

Il s'agit de choisir une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$. Cette fonction de Lyapunov est définie comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{IV .3})$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x)$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires.

IV.5.2. Approche directe :

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro, elle est donnée sous la forme :

$$\dot{S}(x) \cdot S(x) < 0$$

IV.6. Loi de commande par mode de glissement:

IV.6.1. La commande équivalente :[AMI08]

Un vecteur de commande équivalente U_{eq} se définit comme étant les équations du régime glissant idéal. Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande du système défini dans l'espace d'état par l'équation (IV.1). Le vecteur U est composé de deux grandeurs U_{eq} et U_n soit [Kha20] :

$$U = U_{eq} + U_n$$

La première étape, est de définir une entrée U_{eq} , de telle façon que la trajectoire d'état reste sur la surface de commutation $S(x)$.

La dérivée de la surface $S(x)$ est :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} A(x) + \frac{\partial S}{\partial x} B(x) u_{eq} + \frac{\partial S}{\partial x} B(x) u_n \quad (\text{IV .4})$$

La commande équivalente est déterminée durant la phase de glissement et la phase du régime permanent en identifiant que $S(x) = 0$, et par conséquent $\dot{S}(x) = 0$, et $u_n = 0$

Dans ces conditions la solution de l'équation (IV.4) et alors :

$$u_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} B(x) \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} A(x) \quad (\text{IV .5})$$

Avec la condition que:

$$\frac{\partial S}{\partial x} B(x) \neq 0.$$

Une fois U_{eq} définit, (4.9) est substituée dans le système (4.8), pour avoir la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) u_n \quad (\text{IV .6})$$

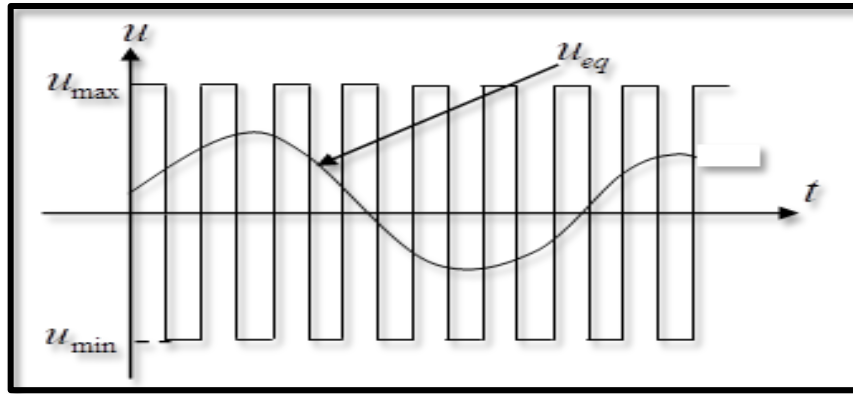


Figure (IV.2): La commande équivalente.

IV.6.2. La commande discontinue: [AMI08]

La commande u_n , est définie durant le mode de convergence et doit satisfaire la condition:

$$\dot{S}(x)S(x) < 0$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de u_n doit être opposé à celui de:

$$S(x) \frac{ds}{dt} B U_n < 0$$

La commande u_n , est donnée par la forme de base qui est celle d'un relais représenté par la fonction « sign » (figure. IV.2) :

$$u_n = K \cdot \text{sign}(S(x)) \quad (\text{IV.7})$$

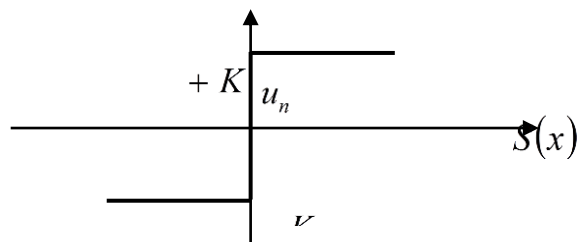


Figure (IV.3): Fonction sign

Cependant l'utilisation de la commande de type relais peut provoquer des dynamiques indésirables caractérisées par le phénomène de chatter. Figure (IV.2): la fonction « sign » première méthode est proposée pour limiter le phénomène de hating, on utilise pour la

commande par régulateurs à mode glissant la commande dite douce à un seul seuil, elle est donnée par le système (4.12) et représentée sur la figure.4.6.

$$u_n = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} K.S(x) & \text{si } |S(x)| < \varepsilon \\ K.\text{sign}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

Cette fonction est connue aussi par, la fonction saturation « sat »

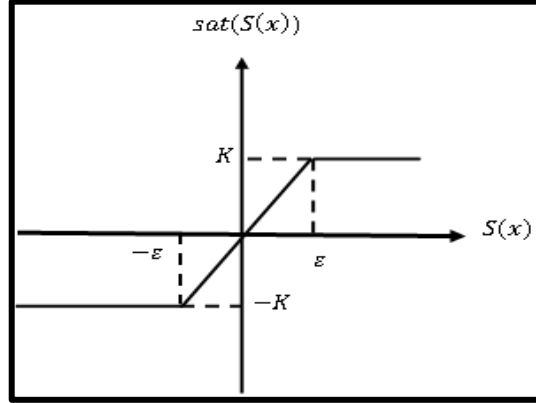


Figure (IV.4): Fonction de saturation (Commande adoucie).

Les oscillations de hautes fréquences qui apparaissent sur les réponses en régime glissant peuvent être évitées en rendant continue la commande discontinue U_n .

Pour cela, on remplace la fonction signa par la fonction intégrale. Elle est définie comme suit :

$$u_n = K \frac{S(x)}{|S(x)| + \delta} + \eta \quad (\text{IV.9})$$

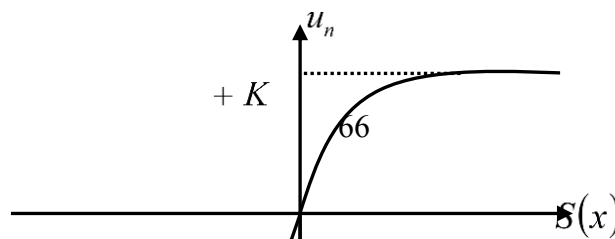
Avec:

$$\delta = \begin{cases} \delta_0 & \text{si } |S(x)| \geq \varepsilon \\ \delta_0 + \gamma \int S(x) dt & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (\text{IV.10})$$

$$\eta = \begin{cases} 0 & \text{si } |S(x)| \geq \varepsilon \\ \xi + \gamma \int S(x) dt & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

Où: $\delta, \eta, \gamma, \xi, \varepsilon$ sont des constantes positives.

La commande est illustrée à la figure. IV.5.



IV.7. Application de la commande par mode glissant sur la MADA:

La commande par mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état vers la surface de glissement et de le faire évoluer dessus avec une certaine dynamique jusqu'au point d'équilibre. La conception de la commande par mode glissant revient principalement à déterminer trois étapes.

$$\dot{S}(P_S) = \dot{P}_{S-ref} - \dot{P}_S$$

$$\dot{S}(Q_S) = \dot{Q}_{S-ref} - \dot{Q}_S$$

IV.7.1. Choix de la surface de commutation:

On prend la forme d'équation générale proposée par J.J.Slotine pour déterminer la surface de glissement donnée par :

$$S(X) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \quad (\text{IV.12})$$

$$e = X^d - X \quad (\text{IV.13})$$

avec :

e : erreur sur la surface à régler ;

λ : coefficient positif ;

n : ordre de système ;

X^d : grandeur désiré ;

X : variable d'état de la grandeur commandée ;

Nous avons appliqué la commande en puissances statorique appliqué dans une generatrice GADA. Ce pour cela les surfaces de glissement sont choisies de manière à ce qu'elles soient compatibles avec les erreurs dans les puissances statorique de la MADA, et a pour forme :

$$S(P_S) = P_{S-ref} - P_S \quad (IV.14)$$

$$S(Q_S) = Q_{S-ref} - Q_S \quad (IV.15)$$

La condition de convergence est définie par:

$$S(P_S).S^*(P_S) \leq 0 \quad (IV.16)$$

Et

$$S(Q_S).S^*(Q_S) \leq 0 \quad (IV.17)$$

la commande est définit par la relation (III.6) :

$$U_{dqr} = U^{eq}_{dqr} + U^n_{dqr} \quad (IV.18)$$

U_{dqr} : grandeur de commande ;

U^{eq}_{dqr} : grandeur de commande équivalente ;

U^n_{dqr} : terme de commutation de commande.

$$U_{dr} = U_{dr}^{eq} + U_{dr}^n \quad (IV.19)$$

$$U_{qr} = U_{qr}^{eq} + U_{qr}^n \quad (IV.20)$$

Où

$$U_{dr}^n = K \cdot \text{sign}(S(P_S)) \quad (III.21)$$

Et

$$U_{qr}^n = K \cdot \text{sign}(S(Q_S)) \quad (\text{IV.22})$$

La commande équivalente correspondant au régime de glissement est obtenu par imposer $S^*(x, t) = 0$:

Donc:

$$\dot{S}(P_S) = \dot{P}_{Sref} - \dot{P}_S = \dot{P}_{Sref} + \left(\frac{v_S \cdot M}{L_S}\right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} \quad (\text{IV.23})$$

$$\dot{S}(Q_S) = \dot{Q}_{Sref} - \dot{Q}_S = \dot{Q}_{Sref} - \frac{v_S^2}{\omega_S \cdot L_S} + \frac{v_S \cdot M}{L_S} \cdot \frac{di_{dr}}{dt} \quad (\text{IV.24})$$

En remplaçant l'expression de P_S dans l'équation (IV.23), on obtient:

$$\frac{dS(P_S)}{dt} = \frac{dP_{ref}}{dt} - \frac{v_S \cdot M}{L_S} \cdot \frac{di_{qr}}{dt} \quad (\text{IV.25})$$

Nous notons que les dérivés des courant rotorique direct et quadrature est donné par l'expression suivant:

$$\frac{di_{dr}}{dt} = V_{dr} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot (R_r i_{dr} - g \omega_S L_r i_{qr} \sigma) \quad (\text{IV.26})$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = V_{qr} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot (R_r i_{qr} + g \omega_S L_r i_{dr} \sigma + \frac{g M V_S}{L_S}) \quad (\text{IV.27})$$

A travers les équations (IV.23) et (IV.27):

$$\frac{dS(P_S)}{dt} = \frac{dP_{ref}}{dt} - \frac{v_S \cdot M}{L_S} \left(V_{qr} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot (R_r i_{qr} + g \omega_S L_r i_{dr} \sigma + \frac{g M V_S}{L_S}) \right) \quad (\text{IV.28})$$

En remplaçant l'expression de Q_S dans l'équation IV.24, on obtient:

$$\frac{dS(Q_S)}{dt} = \frac{dQ_{S-ref}}{dt} - \left(-\frac{v_S^2}{\omega_S \cdot L_S} + \frac{v_S \cdot M}{L_S} \cdot \frac{di_{dr}}{dt} \right) \quad (\text{IV.29})$$

A travers les équations (IV.26) et (IV.29):

$$\frac{dS(Q_s)}{dt} = \frac{dQ_{s-ref}}{dt} - \left(-\frac{v_s^2}{\omega_s \cdot L_s} + \frac{v_s \cdot M}{L_s} \cdot \left(V_{dr} - \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \cdot (R_r i_{dr} - g \omega_s L_r i_{qr} \sigma) \right) \right) \quad (\text{IV.30})$$

En considérant que la dérivée de la surface est nulle c'est à dire:

$$\frac{dS(P_s)}{dt} = 0, \quad \text{et} \quad \frac{dS(Q_s)}{dt} = 0. \quad (\text{IV.31})$$

afin d'obtenir la commande équivalent suivante :

$$V_{dr}^{eq} = R_r i_{qr} - \frac{L_r L_s \sigma}{M V_s} \frac{d}{dt} (P_{s-ref}) \quad (\text{IV.32})$$

$$V_{dr}^{eq} = R_r i_{dr} - \frac{L_r L_s \sigma}{M V_s} \frac{d}{dt} (Q_{s-ref}) \quad (\text{IV.33})$$

ainsi la commande discontinue

$$U_{dqr}^n = K \cdot \text{sign}(S(x)) \quad (\text{III.35})$$

avec $K > 0$ c'est un gain positive.

IV .8. Simulation et Interprétation des résultats:

La figure (IV.6) représente le schéma bloc du système de régulation par mode glissant d'un générateur asynchrone a double alimentation par matlab simulink. Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur utilisée dans la simulation sont reportés en annexe. .les courbes ci dissous représente résultats de simulation des différentes courbes obtenus par l'application de cette commande avec le même condition de simulation de deuxième chapitre .

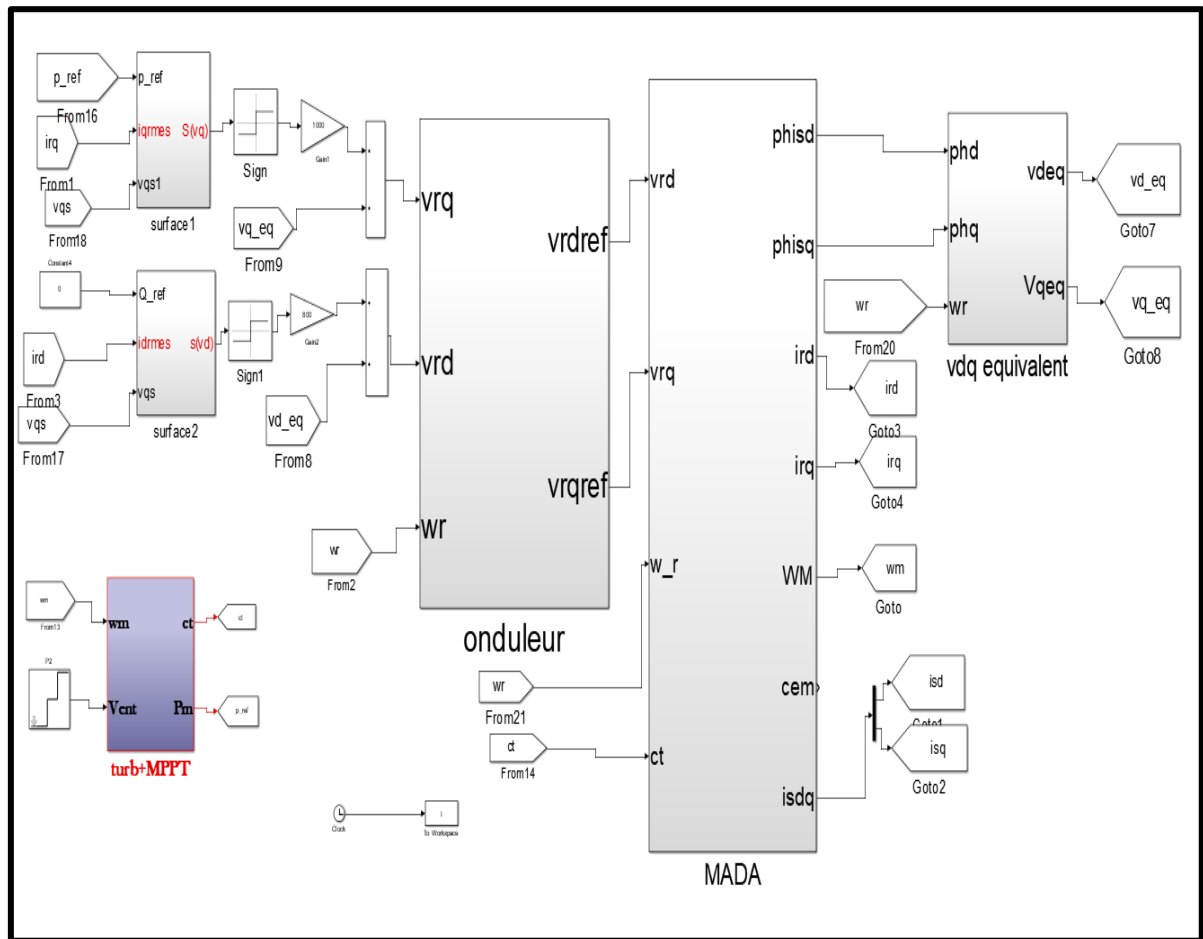


Figure (IV.6) Schémas block de la commande par mode glissant d'un générateur GADA par MATLAB Simulink.

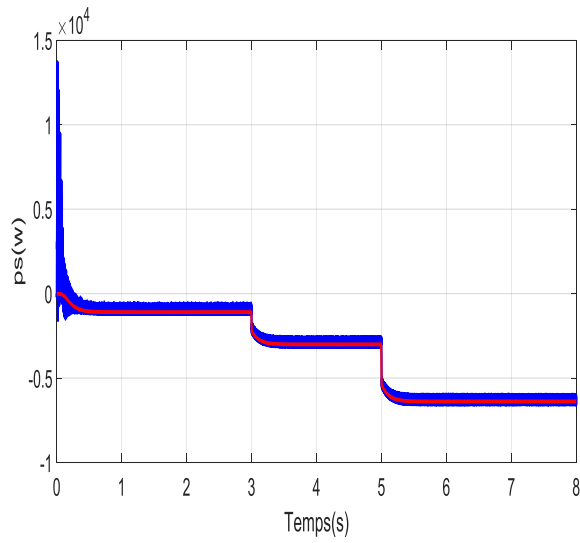


Figure (IV.7): La puissance active

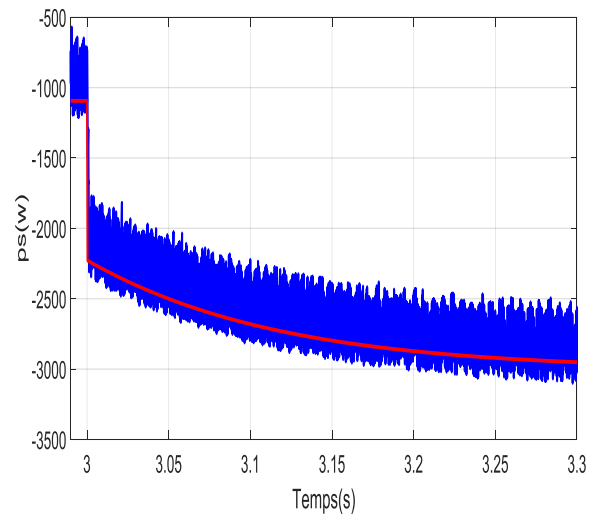


Figure (IV.8): La puissance active
avec zoom

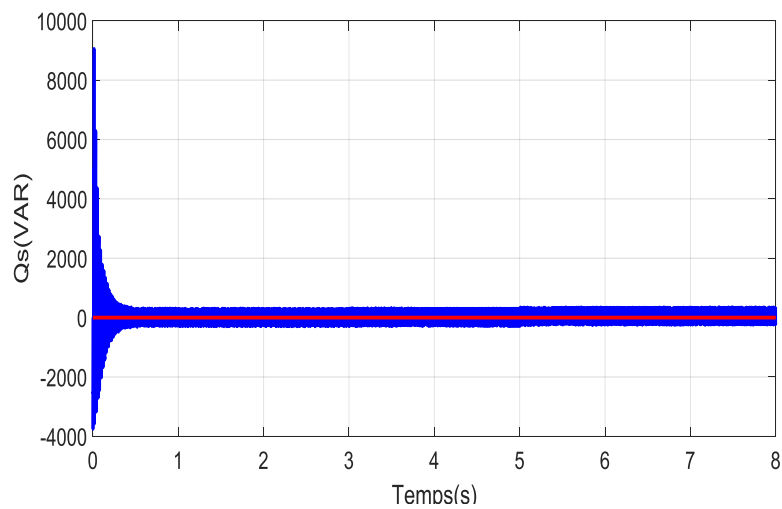


Figure (IV.9): La puissance réactive

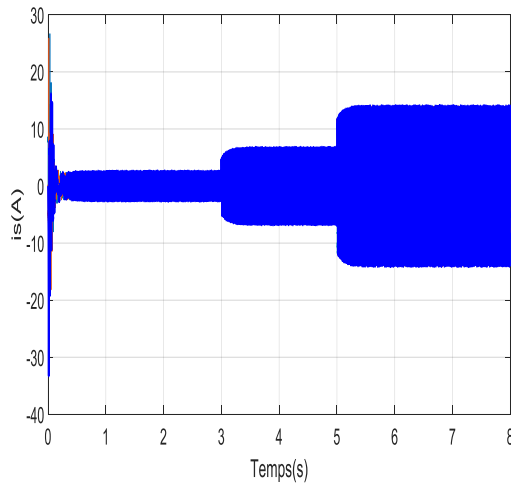


Figure (IV.10): Les courants statatorique

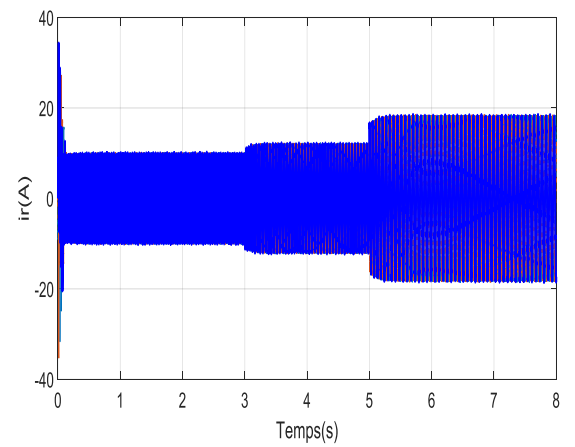


Figure (IV.11): Les courant

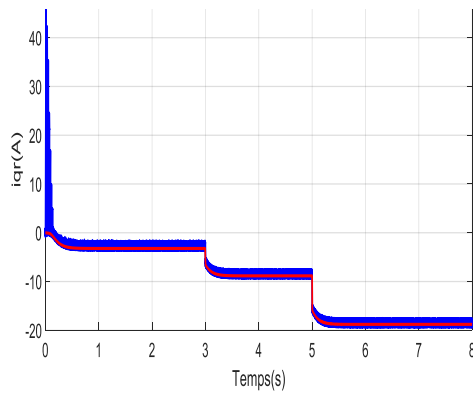


Figure (IV.12): Le courant rotorique selon l'axe q

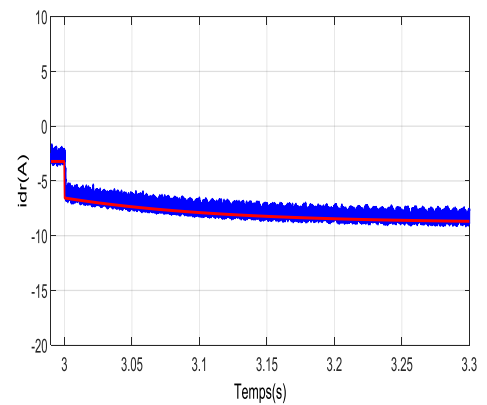


Figure (IV.13): Le courant rotorique selon l'axe q avec zoom

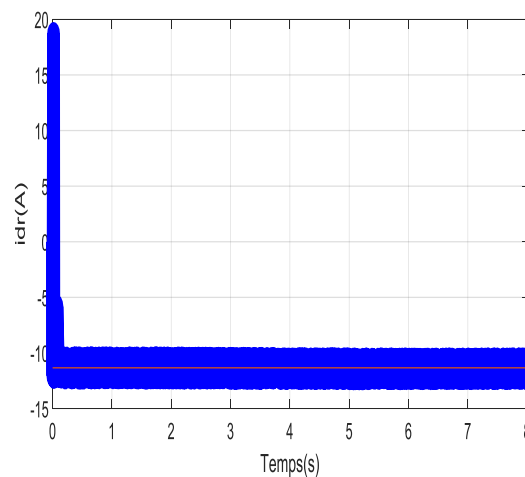


Figure (IV.14): Le courant rotorique selon l'axe d

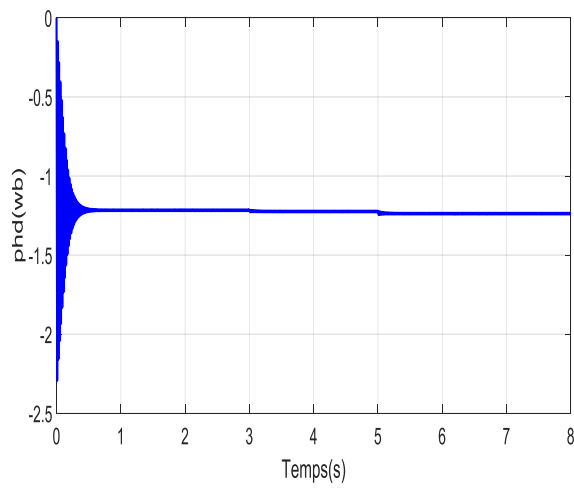


Figure (IV.14): Flux statorique d en wb

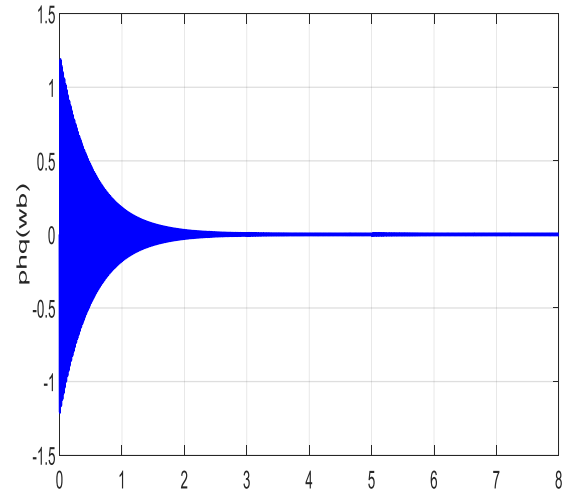


Figure (IV.15): Flux statorique q en wb

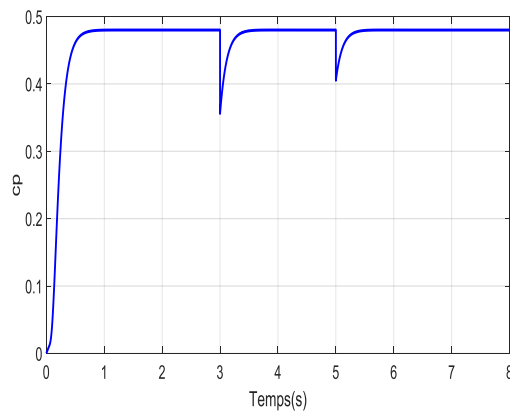


Figure (IV.16): Le coefficient de puissance

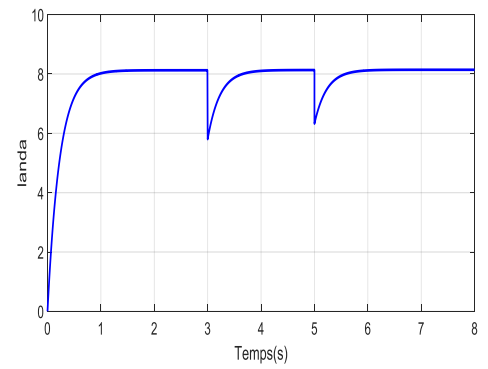


Figure (IV.17): La vitesse spécifique

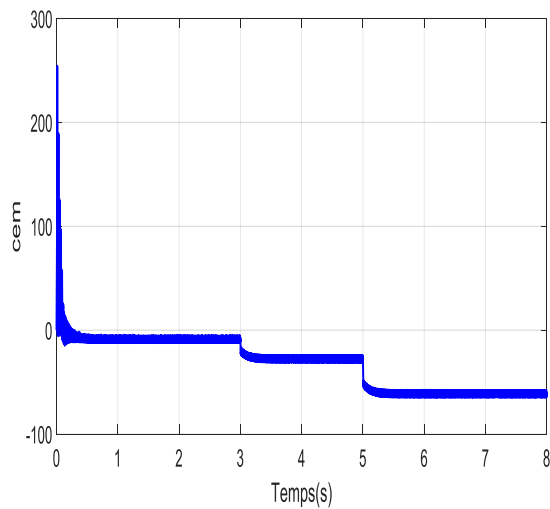


Figure (IV.18): Le couple electromagnetique

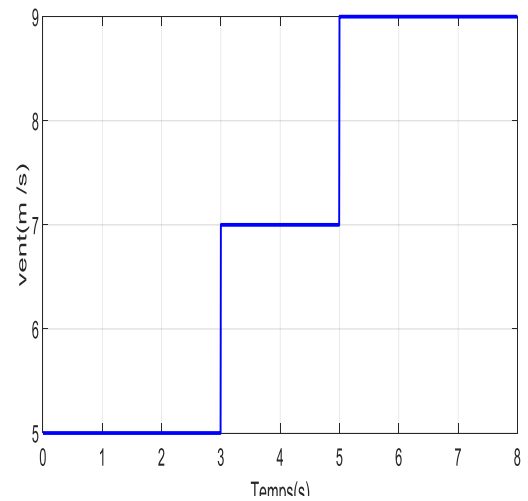


Figure (IV.19): La vitesse du vent

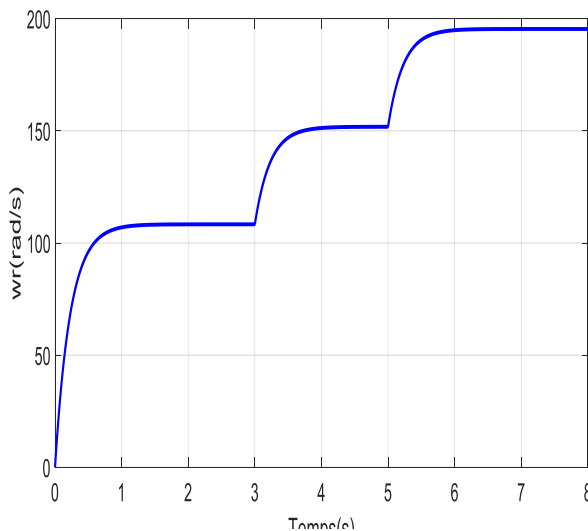


Figure (IV.20): La vitesse de la Générateur

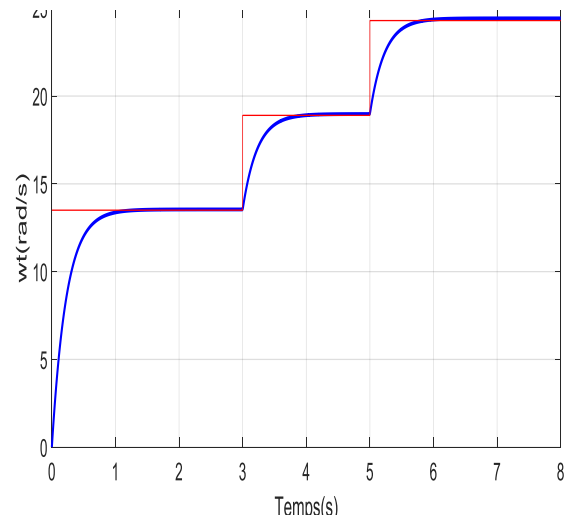


Figure (IV.21): La vitesse de la turbine et sa référence

IV .9. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le principe de la CSV pour les différentes structures de la commande discontinue. Nous avons étudié les techniques de conception des régulateurs par mode glissants. En effet, la conception de ces régulateurs prend en charge les problèmes de stabilité et les performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes: le choix de la surface, L'établissement des conditions de la convergence, La détermination de la loi de commande. L'application du régulateur à mode glissant pour la commande des puissances

active et réactive de la MADA donne des résultats satisfaisants. Les résultats de comparaison montrent qu'il n'y a pas de grandes différences entre les performances de ces deux régulateurs (PI et mode glissant).

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'objectif dans de ce travail consistait à la modélisation et à la commande d'une chaîne de conversion éolienne global générateur asynchrone a double alimentation GADA.

On a d'abord dressé un état de l'art de la machine étudiée. La bibliographie consultée à ce sujet fait ressortir que la machine asynchrone à double alimentation (MADA) grâce à l'application potentielle de la MADA a été un sujet de recherche le long de la dernière décennie. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse

Dans le deuxième chapitre, nous avons réalisé la modélisation des éléments qui constitue la chaine de conversion éolienne tel que la modélisation de la machine afin d'obtenir un modelé de la MADA que nous avons permet pour contrôler les puissances statoriques de système ainsi la turbine en puissances statoriques de la MADA afin d'obtenir un découplage flux courant et couple courant.

Dans le troisième chapitre, nous avons réalisé la commande vectorielle en puissances statoriques de la MADA afin d'obtenir un découplage flux courant et couple courant. a partir de la méthode d'orientation du flux statorique. Ce contrôle est réalisé avec corrélation par des puissances de références afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator et le réseau. On a utilisé une stratégie MPPT avec asservissement de vitesse au niveau de la turbine éolienne pour capter le maximum de puissance du vent

Ensuite, nous avons consacré dans le quatrième chapitre, nous nous sommes intéressés à l'application de l'une des techniques de commande robuste, nommée commande par mode de glissement. Les résultats obtenus ont montrés que cette technique de réglage n'a pas apporté des améliorations remarquables par rapport aux régulateurs classiques PI.

En perspectives de ce mémoire, on propose les idées suivantes:

- D'un autre côté, nous pensons qu'il est très intéressant d'appliquer les nouvelles techniques de commande à la régulation de vitesse de la MADA. Dans ce cadre, nous citons la commande par logique floue et la commande par réseau de neurone;
- Utiliser des onduleurs multi-niveaux associés à la commande directe du puissance , afin de améliorer les performance de commande ;
- Utiliser des observateurs tels que, le filtre de KALMAN ou l'observateur de type MRAS pour estimer la vitesse dans L'MPPT de la MADA avec plus de précision.

Références bibliographies

[Lak22]	H. Lakhdar, «Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à double alimentation (MADA)»,Thèse de Mémoire MASTER Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2022.
[Mor22]	T. Moradj, «Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation», Thèse de Mémoire Master Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 2022.
[Www]	رابط
[Mer19]	B. Meryem, «Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone double étoile 'GASDE' », Thèse de DOCTORAT LMD Université Mohamed Boudiaf- M'sila 2019.
[SAL07]	G.SALLOUM, «CONTRIBUTION A LA COMMANDE ROBUSTE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION »,Thèse de DOCTEUR L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE 2007
[bra19]	H. brahim , «Amélioration De La Commande Par Mode Glissant D'un Générateur Asynchrone A Double Alimentation », Thèse de Mémoire Master Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 2019
[Sof19]	A . Sofiane, «Etude d'une éolienne en fonctionnement autonome à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation », Thèse de Mémoire Master Université A.MIRA-BEJAIA Université A.MIRA-BEJAIA 2019
[isl20]	H. islam, «Commande par mode glissant d'ordre supérieur d'une chaine de conversion d'énergie éolienne», Thèse de Mémoire Master Université Mohamed Khider -Biskra 2020.
[Som18]	B. Somia , «Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne», Thèse de Mémoire Master Université Ahmed Draïa Adrar 2018.
[Dha21]	S .Dhahbi, «Commande par mode glissant d'un Système éolien basé sur une MADA», Thèse de Mémoire MASTER Université Echahid Hama Lakhdar d'El-Oued 2021.
[Lot17]	K. Lotfi, «Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée», Thèse de Mémoire MASTER UNIVERSITENABA-MOKHTAR BADJI 2017.
[LAV05]	N . LAVERDURE, «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires», Thèse DOCTEUR DE L'INPGAncien élève de l'ENS

	Cachan – Agrégé de Génie Electrique 2005.
[Nab22]	Dr. BENAMARA Nabil, «L'Energie Eolienne», Thèse de Cours Université Djillali Liabes -- Sidi Bel Abbes 2022.
[BOU22]	Aymen BOURAS, «Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation en Mode Génératrice», Thèse de Thèse de Mémoire MASTER Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued 2022
[SAH22]	Y. SAHRAOUI, «COMMONDE VECTORIELLE D'UN AEROGENERATEUR ASYCHRONES DOUBLE ETOILE», Thèse Mémoire de Fin d'Etude UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2022
[Zin09]	B. Zine Laabidine, «Commande Vectorielle sans capteur de vitesse de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par régulateur pi-flou», Thèse Mémoire de Magister de l'école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, 2009.
[Hou]	M . Houaria, «Commande par Mode de Glissement d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation», Thèse Mémoire MAGISTER Université des Sciences et de la Technologie d'Oran -Mohamed Boudiaf
[Abd12]	R. Abdessemed, « Modélisation et simulation des Machines Electriques »,Livre, Edition TECHNOSUP, Batna , Mai 2012.
[Che12]	B. Cherif, «Simulation de la commande vectorielle par régulateur à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation», Thèse de MagisterUniversité Mohamed Khider – Biskra 2012
[BEK14]	Y. BEKAKRA, «Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à DoubleAlimentation», Thèse deDoctorat en sciences Université Mohamed Khider – Biskra 2014
[Mou12]	B. Mouloud, « Etude d'un entraînement à double Alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable un sur site à TINDOUF », Thèse de Mémoire Magisteren sciences Université Mohamed Bougera BOUMERDES 2012
[Fat18]	T. Fatma Zahra, «Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien», Thèse deDoctorat en sciencesUniversité MohamedKhider – Biskra 2018
[Mor22]	T. Moradj, «Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation», Thèse deMASTER ACADEMIQUE Université Echahid Hama Lakhdar d'El Oued 2022
[Aym09]	H Ayman, «CONTRIBUTION A LA COMMANDE ADAPTATIVE ROBUSTE PAR MODES GLISSANTS», Thèse deDocteur l'Université de

	Reims Champagne Ardenne 2009
[KAI13]	D.KAIROUS, «Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien a Machine Asynchrone à Double Alimentation», Thèse de Docteur Université des Sciences et de La Technologie d'Oran- Mohamed Boudiaf 2013.
[AMI08]	H . AMIMEUR, «Contribution `a la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement», ThèseMagtrise des EnergiesUniversité El Hadj Lakhdar de Batna 2008
[edd17]	M. eddine, «Commande à mode glissant de la machine asynchrone à double alimentation», ThèseMémoire de fin d'étudesUniversité Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi- 2017
[Kha20]	B.Khalil, «Commande directe du couple par mode glissant d'une machine synchrone à aimants permanents», Thèse Mémoire de Master Université Mohamed Khaider Biskra 2020
[Far18]	A. Farouq, «Commande par mode glissant et flou d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) « Application à l'énergie éolienne »», Thèse de Master UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018
[Ahm11]	M. Ahmed, «Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne. »», Thèse deMagister UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF 2011
[MAM13]	A. MAMADIE SYLLA, «MODÉLISATION D'UN ÉMULATEUR ÉOLIEN À BASE DE MACHINEA SYNCHRONNE À DOUBLE ALIMENTATION», Thèse deMagister UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES 2013.
[Tar19]	D. Tarek, «Modélisation et stratégie de Commande de la Génératrice Asynchrone intégrée à un Système Eolien», Thèse de Maitrise d'énergie Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd 2019
[MIR05]	A. MIRECKI , «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», Thèse DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE 2005
[MAD98]	N Madni, M F. Benkhoris, "Sliding mode control of asynchronous motor drive," Power Electronics and Variable Speed Drives Conference, 21-23 September 1998, Publication No. 456, IEEE 1998.
[BUH86]	H Bühler., "Réglage par mode de glissement", Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse, 1986.

[Lin 10]	Ling PENG. , “Reconfiguration du dispositif de commande d’une éolienne en cas de creux de tension”., Thèse de Doctorat de l’Ecole Centrale de Lille et au département Génie Electrique de Tsinghua University
[GAS 11]	S GASSAB . , “ <i>Modélisation d’une centrale à énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne </i> ”., <i>mémoire de magister université de setif 2011.</i>
	M BOUARKI

Annexes

Données de la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Paramètres :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale	KW7.5
Résistance statorique	0.474 (Ω)
Résistance rotorique	0.7614 (Ω)
Inductance mutuelle	0.107 (H)
Inductance statorique	0.12 (H)
Inductance rotorique	0.122 (H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	220 V
Fréquence du réseau	50 Hz

Constantes mécaniques :

$$f = 0.00 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-1} \quad J = 0.2 \text{ kg.m}^2$$

Données de la turbine éolienne:

$$\text{Diamètre du rotor} \quad R = 3.5 \text{ m}$$

$$\text{Gain du multiplicateur} \quad G = 4$$

$$\text{Valeur de la densité d'air: } \rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p\text{-max} = 0.48$$

$$\lambda\text{-optimale} = 8.1$$