

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie Electrique
Electrotechnique



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة الكهربائية
المرجع :

Réf :

Thèse présentée en vue de l'obtention

du diplôme de Doctorat en Sciences en Génie Electrique :

Electrotechnique

Intitulé de la thèse :

Contribution à la Modélisation, à la Commande et au Contrôle
des Systèmes de Production de l'Energie Électrique
Renouvelable

Présentée par :

Mademoiselle Afaf BENAMOR

Ingénieur en Electrotechnique et Magister en Electrotechnique

Soutenue publiquement le 18/11/ 2019

Devant le jury composé de Mademoiselle et Messieurs :

GUERGAZI Aicha	MCA	Présidente	Université de Biskra
SRAIRI Kamel	Prof	Encadreur	Université de Biskra
BENCHOUIA Med Toufik	Prof	Co-Encadreur	Université de Biskra
BAHI Taher	Prof	Examineur	Université de Annaba
RAHEM Djamel	Prof	Examineur	Université d'Oum el Bouaghi
ZELLOUMA Laid	Prof	Examineur	Université d'El Oued

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je rendrai grâce à Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté que la conscience pour réaliser ce travail.

*Tout d'abord, ma profonde gratitude à mon encadreur Monsieur **SRAIRI Kamel**, Professeur à l'Université Mohamed Khider de Biskra, pour avoir encadré cette thèse, pour sa disponibilité, pour sa confiance ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements tout au long des années de travail collectif au sein des laboratoires de recherche L'ESM et L'GEB de Biskra.*

*Ma profonde gratitude à mon Co-Encadreur Monsieur **BENCHOUIA Mohamed Toufik**, Professeur à l'Université Mohamed Khider de Biskra, pour avoir suivi cette thèse et pour ses encouragements qui m'ont beaucoup aidés à mener à bien la réalisation de ces travaux. Qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance.*

Mes sincères remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'nt fait en acceptant de participer au jugement de ce travail.

*Mademoiselle le Docteur **GUERGAZI Aicha**, Maître de Conférences à l'Université Mohamed Khider de Biskra, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*Messieurs : **BAHI Taher** Professeur à l'Université de Annaba, **RAHEM Djamel** Professeur à Université d'Oum el Bouaghi et **ZELLOUMA Laid** Professeur à l'Université d'El Oued, sont vivement remerciements.*

*Nos valeureux remerciements à toutes les personnes ayant contribuées de près ou de loin, directement ou indirectement particulier mon collègue **CHABANI Mohammed Saci**, d'une manière continue ou occasionnelle, à l'achèvement à bien et à terme de ce travail.*

Merci à vous tous

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*A mes très chers parents mon **père** et ma **mère** pour leurs tendresse profonde, leurs patiences et leurs encouragements.*

*Mes très chère **frères** et **sœurs***

*Toute ma grande **famille***

*A tout mes **amies**.*

Publications et Conférences Internationales

➤ **Type : Articles de Revues Internationales Spécialisées**

1. A. Benamor, M.T. Benchouia, K. Srairi, M.E.H. Benbouzid “A novel rooted tree optimization apply in the high order sliding mode control using super-twisting algorithm based on DTC scheme for DFIG ”, The International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 108, Pages 293-302, June 2019.
2. A. Benamor, M.T. Benchouia, K. Srairi, M.E.H. Benbouzid “A new rooted tree optimization algorithm for indirect power control of wind turbine based on a doubly-fed induction generator”, ISA Transactions, Elsevier, Vol. 88, pp. 296-306, May 2019.

➤ **Type : Conférences Internationales**

1. A. Benamor, M. S. Chabani, M. T. Benchouia, K. Srairi, M. Becherif and M. E. H. Benbouzid, “Experimental investigation for a stand-alone doubly-fed induction generator control by using rooted tree optimization algorithm”, The International Conference on Emerging and Renewable Energy: Generation and Automation, 28-30 October 2018, Sousse, Tunisia.
2. A. Benamor, M.T. Benchouia, K. Srairi, “Apply rooted tree optimization method in the adjust parameters of the backstepping with integral based on the DFIG”, The Second International Conference on Electrical Engineering, Biskra, December, 2-3, 2018.

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة مقارنة للتحكم في المولد الهوائي اللاتزامني مزدوج التغذية بواسطة تقنيات ضبط وتعديل مختلفة. في الجزء الأول من الأطروحة، يتضمن قوة السيطرة على المولد الهوائي اللاتزامني مزدوج التغذية (GADA)، لتحسين نوعية الطاقة وجعل النظام غير حساس للاضطرابات، يطبق مبدأ انفصال النظام في سلسلة تحويل طاقة الرياح المتصلة بالشبكة مباشرة، مع استغلال التحكم بواسطة MPPT. تحليل نتائج المحاكاة يظهر أداء هذا النوع من السيطرة.

الجزء الثاني من هذه الأطروحة، يهتم بتطبيق تقنية التحكم المباشر لعزم الدوران الكلاسيكي (DTC) في نظام تحويل الطاقة بينما هذه الإستراتيجية تعرض عدة مساوئ. من جهة أخرى، عدم القدرة على التحكم في التردد والتموجات على مستوى التدفق الدوار وعزم المزدوجة. من أجل تحسين هذا التركيب والتزويد بأفضل أداء ديناميكي لعزم الدوران الكهرومغناطيسي والتردد الدوار، نستعمل التحكم بواسطة (DTC) على أساس وضع انزلاق عالي المستوى (HOSMC) باستخدام خوارزمية فائق الالتواء (ST)، مع أن النظام خاضع لتغيرات في المعلمات. نتائج المحاكاة تثبت التأثيرات في هذا النوع من التحكم.

الجزء الأخير من الأطروحة، هو مكرس لتحسين أداء التحكم في المولد الهوائي اللاتزامني مزدوج التغذية (MADA) المستقل بواسطة التحكم الشعاعي (FOC)، لهذا قمنا بتقديم تقنية (meta-heuristic) الجديدة، لتحسين معالم المنظم الكلاسيكي PI بواسطة تقنية تحسين جذر الشجر (RTO). للتحقق من صحة التقنية المقترحة قمنا باختبارها عن طريق المحاكاة بواسطة Matlab/Simulink ومن أجل التحقق من نتائج المحاكاة استعملنا طاولة مخبرية رقمية ببطاقة DSPACE1104 في مخبر LGEB.

الكلمات المفتاحية:

طاقة الرياح المتجددة، الأنظمة الكهربائية، المولد الهوائي اللاتزامني مزدوج التغذية، MPPT، التحكم الشعاعي عن طريق توجيه التدفق، الم نظمات التقليدية PI، التحكم ذو بنية متغيرة: (التحكم المباشر لعزم الدوران الكلاسيكي اعتمادا على التحكم عن طريق النمط الانزلاقي عالي السيطرة (DTC-HOSMC)، تقنية تحسين جذور الأشجار (RTO).

Résumé

Ce travail présente une étude comparative de la commande de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation (**GADA**) associée aux différentes techniques de commande et de réglage.

Dans la première partie de la thèse, pour assurer une commande robuste de la (**GADA**), améliorer la qualité d'énergie et rendre le système insensible aux perturbations, le principe de la commande découplée consiste à l'appliquer dans la chaîne de conversion d'énergie éolienne connectée directement au réseau, avec l'exploitation de la commande (**MPPT**).

Les résultats des différentes simulations effectuées, sont analysés pour prouver les bonnes performances de ce type de commande.

La deuxième partie de cette thèse, porte sur l'application de la commande directe du couple (**DTC**) classique dans notre système de conversion d'énergie. Cependant, cette stratégie présente des inconvénients importants. D'autre part, la fréquence de commutation est non-maîtrisable ainsi que les ondulations au niveau du flux et du couple sont importantes.

Dans le but d'améliorer cette structure et de fournir une bonne dynamique au couple électromagnétique et au flux rotorique, nous pu associer à la **DTC** la commande par mode glissant d'ordre supérieur (**HOSMC**) avec l'algorithme de super-twisting (**ST**), et où le système est soumis à des variations des paramètres. Pour valider les performances de ce type de commande des tests en simulation ont été effectués.

La troisième et dernière partie de cette thèse, est entièrement consacrée à l'amélioration des performances de la commande vectorielle (**FOC**) de la machine asynchrone à double alimentation (**MADA**) en mode autonome. Pour cela, un nouveau méta-heuristique algorithme a été proposé dans le cadre de ce travail. Ceci nous a permis d'optimiser les gains du régulateur classique **PI** par la technique d'optimisation des racines des arbres (**RTO**).

Différentes et de multiples simulations numériques ont été effectuées sur l'outil Matlab/Simulink et validé expérimentalement sur la carte **DSPACE1104**, localement, à l'Université de Biskra au Laboratoire de Génie Electrique LGEB. Cette carte est associée aux régulateurs **PI** et **RTO-PI**.

Mots clés :

Energie renouvelable éolienne, Systèmes électriques, Machine asynchrone à double alimentation (MADA), MPPT, Commande Vectorielle (FOC), Régulateurs Classiques, Commande à structure variable : Commande Directe du Couple DTC et la commande par mode glissant d'ordre supérieur DTC-HOSMC) associée au Super-Twisting (ST), Optimisation par des Racines d'Arbres (RTO).

Abstract

This work presents a comparative study to control of the doubly-fed induction generator (**DFIG**) associated with different control and adjustment techniques.

In the first part of the thesis, to ensure a robust control of the (**DFIG**), improve quality of energy and render the system insensitive to disturbances, the principle of decoupled control in the chain of the wind energy conversion connected directly to the complete network is applied, with operating the (**MPPT**) command.

The several of the results simulations performed are analyzed to show the performances of this type the control.

The second part of this thesis, interesting to application classical direct torque control technique (**DTC**) in our conversion system energy. However, this strategy presents important disadvantages. From the other hand, the switching frequency is not manageable as well as ripples at the level of the rotor flux and electromagnetic torque is important.

In order to improve this structure and to provide a good dynamic of the electromagnetic torque and rotor flux, we can associate with (**DTC**) the control by higher order sliding mode control (**HOSMC**) by using the super-twisting algorithm (**ST**). Where the system is subject to change of the parameter, in order to validate the performances of this type of control tests simulation are affected.

The third and last part of this thesis, interesting to improve the performances of the field oriented control (FOC) of the doubly-fed induction machine (**DFIG**) supply in stand-alone mode. For that, a new meta-heuristic algorithm is proposed as part of this work, that's mean we can optimize the gains of the classical regulators **PI** by rooted tree optimization technique (**RTO**).

The several digital simulations are adapted on Matlab/Simulink and the experimental validation at carte **DSPACE1104**, in the **LGEB** laboratory of the University of the Biskra, associated to regulators **PI** and **RTO-PI**.

Key words:

Renewable Energy Wind, electrical systems, Doubly-Fed Induction Machine, MPPT, Vector Control by Field Orientation Control (FOC), Traditional Controller, Variable Structure Control: Direct Torque Control and High Order Sliding Mode Control DTC-HOSMC) associated with Super-Twisting algorithm (ST), Rooted Tree Optimisation (RTO).

Table des Matières

Introduction générale

1

Chapitre I : Etat de l'Art et Modélisation de la Chaîne de Conversion Éolienne

I.1	Introduction	6
I.2	L'énergie éolienne	6
I.3	Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie	7
I.4	Potentiel d'énergie renouvelable en Algérie	7
I.5	Les différents types des éoliennes	8
	I.5.1. Les éoliennes à axe vertical	8
	I.5.2. Les éoliennes à axe horizontal	9
	I.5.3 Constitution d'une éolienne à axe horizontal	10
I.6	Etat de l'Art sur la Conversion Electromécanique	12
	I.6.1. Les Eoliennes à vitesse Fixe	12
	I.6.2. Les Eoliennes à Vitesse Variable	13
I.7	Types des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens	14
	I.7.1. Générateur synchrone	14
	I.7.2. Générateur asynchrone	15
I.8	Modèle de la machine asynchrone double alimentée (MADA)	17
	I.8.1. Définition générale de la MADA	17
	I.8.2. Représentation de la MADA	17
	I.8.3. L'application de la MADA dans le système éolienne	18
	I.8.4. Modes de fonctionnement de la MADA	19
I.9.	Modélisation de la MADA	21
	I.9.1. Hypothèses simplificatrices	22
	I.9.2. Modèle triphasé de la MADA	22
	I.9.3. Transformation de Park	23
	I.9.4. Le choix du référentiel	25
	I.9.5. Modèle de la MADA lié au système d'axes (d, q)	25
I.10.	Modélisation de la turbine éolienne	26
	I.10.1. Modélisation de la turbine	27
	I.10.2. Modélisation du Multiplicateur	28

I.10.3. Modélisation de l'Arbre Mécanique	29
I.11. Conclusion	30

Chapitre II : Stratégie de Commande du Système de Conversion Éolienne

II.1	Introduction	31
II.2	Commande vectorielle de la MADA	31
	II.2.1. Lois de la commande vectorielle appliquée à la (MADA)	31
	II.2.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	32
II.3	Les différents types de commande vectorielle	35
	II.3.1. Commande vectorielle directe	35
	II.3.2. Commande indirecte	35
II.4	Modélisation de l'alimentation onduleur à MLI	37
	II.4.1. Onduleur à deux niveaux	38
	II.4.2. Stratégie de commande à MLI	39
	II.4.3. Algorithme de commande	40
II.5	Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	41
II.6	Maximisation de la puissance extraite	42
	II.6.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse	42
	II.6.2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse	43
II.7	Simulation et interprétation des Résultats	44
	II.7.1. Résultats pour un profil du vent lisse	45
	II.7.2. Résultats pour un profil vent Aléatoire	47
II.8	Conclusion	49

Chapitre III : Commande par DTC basée sur MG d'Order Supérieur

III.1	Introduction	50
III.2	Généralité sur la commande directe du couple DTC "Classique"	50
	III.2.1. Principe de la commande DTC	50
	III.2.2. Caractéristiques générales de la DTC "Classique"	51
III.3	Structure du système de contrôle directe de couple à la GADA	51
	III.3.1. Elaboration du correcteur du flux	52
	III.3.2. Elaboration du correcteur du couple électromagnétique	53
	III.3.3. Elaboration de la table de commutation	54
	III.3.4. Estimation du flux rotorique	56
	III.3.5. Estimation du couple électromagnétique	57

III.4.	Généralités sur la commande par mode glissant	57
III.4.1.	Principe du contrôleur à mode glissant	57
III.4.2.	Synthèse de la commande par mode glissant	58
III.4.3.	Phénomène de réticence	62
III.4.4.	Solutions pour atténuer le phénomène de réticence	62
III.5.	Commande par MG d'ordre supérieur	64
III.5.1.	La structure générale de la commande par DTC-HOSMC-ST à la GADA	64
III.5.2.	Application la DTC-HOSMC-ST au Contrôle du couple électromagnétique et le flux rotorique	65
III.6.	Résultats de simulations	68
III.7.	Conclusion	72

Chapitre IV : Optimisation par la Technique RTO à la MADA-Autonomie

IV.1	Introduction	73
IV.2	Généralités sur les techniques de commande avancées	73
IV.3	Généralités sur les racines de l'arbre (RTO)	75
IV.4	Architecture de technique d'optimisation des racines des arbres	75
IV.4.1.	Détecteur d'eau (Racines)	75
IV.4.2.	La base d'une racine aléatoire (Random root R_r)	76
IV.4.3.	La base de la racine la plus proche de l'eau (Nearest root R_n)	77
IV.4.4.	La base de la racine continuité (Root continuity R_c)	77
IV.5	Fonction d'adaptation	77
IV.6	Commande vectorielle de la MADA en mode Autonome	78
IV.6.1.	Contrôle du convertisseur côté rotor	79
IV.6.2.	Dimensionnement de régulateur PI	81
IV.6.3.	La méthode pour ajuster l'erreur du contrôleur PI	83
IV.7	Optimisation des gains du régulateur PI par la technique RTO	84
IV.8	Résultats des simulations et expérimentaux	86
IV.9	Conclusion	97
	Conclusion générale et perspectives	98
	Références	101
	Annexes	110

Table des figures et Tableaux

Figure	Intitulée	Page
Chapitre I		
Figure I.1	La naissance du vent	7
Figure I.2	Sites potentiels en Algérie	8
Figure I.3	Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable (éolienne à axe vertical)	9
Figure I.4	Aérogénérateur à axe horizontal	10
Figure I.5	Les composantes d'une éolienne <i>Nordex N60</i> (1300 kW).	12
Figure I.6	Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage	13
Figure I.7	Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage	13
Figure I.8	Machine synchrone connectée directement au réseau	15
Figure I.9	Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA	17
Figure I.10	MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances	19
Figure I.11	Fonctionnement en mode hypo-synchrone de la MADA	20
Figure I.12	Fonctionnement en mode hyper-synchrone de la MADA	20
Figure I.13	Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone de la GADA	21
Figure I.14	Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone de la GADA	21
Figure I.15	Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA	24
Figure I.16	Schéma de la turbine éolienne	26
Figure I.17	Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de pale β	28
Figure I.18	Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne	29
Chapitre II		
Figure II.1	Principe de la commande vectorielle d'une MADA	31
Figure II.2	Structure du système global	32
Figure II.3	Orientation de la tension et de flux statorique	33
Figure II.4	Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA	34
Figure II.5	Schéma de principe de la commande directe	35
Figure II.6	Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte	36
Figure II.7	Schéma de la commande indirecte en boucle fermée	37
Figure II.8	Schéma électrique de la liaison de rotor via un onduleur à deux niveaux	38
Figure II.9	Principe de la commande MLI	39
Figure II.10	Schéma de principe de la commande MLI	40

Figure II.11	La puissance électrique en fonction de la vitesse d'une éolienne	41
Figure II.12	Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse	43
Figure II.13	Schéma bloc de la MPPT sans asservissement de la vitesse	44
Figure II.14	Profil du vent appliqué	45
Figure II.15	Vitesse mécanique	45
Figure II.16	Variation de coefficient de puissance	45
Figure II.17	La puissance active et réactive statorique	46
Figure II.18	Les courants statoriques et rotoriques triphasés	46
Figure II.19	Les courants statoriques et rotoriques avec zoom	46
Figure II.20	Spectre d'harmonique des courants : (a) phase statorique, (b) phase rotorique	47
Figure II.21	Profil du Vent Aléatoire	48
Figure II.22	Vitesse mécanique	48
Figure II.23	Variation de coefficient de puissance	48
Figure II.24	Vitesse spécifique	48
Figure II.25	La puissance active et réactive statorique	48
Figure II.26	Les courants statoriques et rotoriques triphasés	49
Figure II.27	Les courants statoriques et rotoriques avec zoom	49

Chapitre III

Figure III.1	Structure générale de la "DTC classique" à la MADA	52
Figure III.2	Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le flux rotorique	53
Figure III.3	Contrôle du couple à l'aide d'un comparateur à hystérésis à deux niveaux	54
Figure III.4	Représentation des vecteurs de tension	55
Figure III.5	Trajectoire du système sur le plan de phase	58
Figure III.6	Fonction sign (Commande de type relais)	62
Figure III.7	Le phénomène de broutement	62
Figure III.8	Fonction de saturation (Commande adoucie)	63
Figure III.9	Fonction de saturation « Sat » : (A) un seuil ; (B) deux seuils	63
Figure III.10	Structure de la commande du système de conversion d'énergie éolienne	64
Figure III.11	L'estimation du couple et du flux.	65
Figure III.12	La vitesse mécanique de la GADA et la vitesse spécifique	69
Figure III.13	Le coefficient de puissance	69
Figure III.14	Le couple électromagnétique dans les deux cas de contrôle	69
Figure III.15	Le flux rotorique dans les deux cas de contrôle	70

Figure III.16	Trajectoire du flux rotorique de la MADA	71
Figure III.17	Le courant rotorique à flux fixe dans les deux cas de contrôle	71
Figure III.18	Rang l'harmonique du courant rotorique	72

Chapitre IV

Figure IV.1	Recherche de l'eau en fonction du comportement des racines de plantes du désert	76
Figure IV.2	Schéma bloc de la MADA dans une installation autonome	78
Figure IV.3	Circuit équivalent de la MADA dans un le repère dq	79
Figure IV.4	Schéma bloc global basé sur la méthode de contrôle de tension directe	80
Figure IV.5	Schéma équivalent du contrôle de courant	81
Figure IV.6	Schéma de régulation des courants i_{rd} et i_{rq}	82
Figure IV.7	L'organigramme de l'étape 3	85
Figure IV.8	L'organigramme du système de contrôle par RTO-PI	86
Figure IV.9	Photographie du montage expérimentale	87
Figure IV.10	Présentation de l'étape expérimentale	88
Figure IV.11	Les variations de la fonction objective	88
Figure IV.12	Les variations des gains optimums K_p et K_i	89
Figure IV.13	La tension statorique et le courant rotorique pour le PI conventionnel et RTO-PI sous variation de tension	90
Figure IV.14	La tension statorique, le courant statorique et rotorique pour le PI conventionnel et RTO-PI sous variation de tension	91
Figure IV.15	La tension statorique, la puissance active et le couple électromagnétique	92
Figure IV.16	La tension statorique et le courant rotorique pour le PI conventionnel et RTO-PI sous variation de tension	93
Figure IV.17	La tension statorique, le courant statorique et rotorique pour le PI conventionnel et RTO-PI sous variation de tension	94
Figure IV.18	La tension statorique, la puissance active et le couple électromagnétique	95
Figure IV.19	Spectre d'harmonique du courant statorique rotorique	96
Figure IV.20	Spectre d'harmonique du courant statorique	96
Figure IV.21	Spectre d'harmonique de tension statorique	97

Tableaux

Tableau	Intitulée	Page
Tableau III.1	Table de commutation de la commande directe du couple	55

Notions et Symboles

Notations et Acronymes:

GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
Matlab	Mathematics for Laboratory
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportionnel Intégral
MG	Mode Glissant
SMC	Sliding Mode Control
SVM	Space Vector Modulation
PWM	Pulse Width Modulation
THD	Total Harmonic Distortion
IAE	Integration Absolute Error
FOC	Filed Oriented Control
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
DC	Direct Current
AC	Alternative Current
CV	Commande Vectorielle
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
CCR	Convertisseur Coté Rotor
CCS	Convertisseur Coté Stator
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
MG	Mode Glissant

Symboles :

GADA

$P_s; Q_s$	Puissance statorique active et réactive
$\omega_s; \omega_r$	Pulsation statorique et rotorique
$V_s; V_r$	Tension statorique et tension rotorique
$v_{(a\ b\ c)s}; v_{(a\ b\ c)r}$	Tensions statorique et rotorique par phase
$\varphi_{(a\ b\ c)s}; \varphi_{(a\ b\ c)r}$	Flux statorique et rotorique par phase
$\varphi_s; \varphi_r$	Flux statorique et rotorique

$R_s ; R_r$	Résistances du stator et du rotor
$i_{(a\ b\ c)s} ; i_{(a\ b\ c)r}$	Courants statoriques et rotoriques de phases
$I_s ; I_r$	Courant statorique et courant rotorique
M	Inductance mutuelle
$M_s ; M_r$	Inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques
$l_s ; l_r$	Inductances propres statoriques et rotoriques
M_{sr}	inductances mutuelles entre le stator et le rotor
$P(\theta)$	Matrice de transformation de Park
$[P(\theta)]^{-1}$	Matrice de transformation de Park inverse
θ_s, θ_r	Angle du stator et du rotor
θ_{slip}	Angle de glissement
g	Coefficient de glissement
$v_{sd} v_{sq} ; v_{rd} v_{rq}$	Composantes des tensions statoriques et rotoriques dans le repère (d; q)
$\varphi_{sd} \varphi_{sq} ; \varphi_{rd} \varphi_{rq}$	Composantes des flux statoriques et rotoriques dans le repère (d; q)
$i_{sd} i_{sq} ; i_{rd} i_{rq}$	Courants statoriques et rotoriques dans le repère (d; q)
σ	Coefficient de dispersion
f	Coefficient de frottement
P	Constante de Laplace
K_i	Gain intégral
K_p	Gain proportionnel

Turbine

ρ	Densité de l'air
S	Surface circulaire balayée par la turbine
R	Langueur des pales
V_{vent}	Vitesse du vent
λ	Ration de la vitesse
λ_{optim}	Valeur optimale du ratio de la vitesse
β	Angle de l'orientation des pales
C_p	Coefficient de la puissance
C_{p_max}	Coefficient de la puissance maximale
P_{aer}	Puissance aérodynamique
P_v	Puissance du vent
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse de rotation du générateur
C_g	Couple du générateur

G_{aer}	Couple aérodynamique
Ω_{mec}	Vitesse de rotation du générateur
G	Gain du multiplicateur
J	l'inertie totale
J_t	Inertie de la turbine
C_{vis}	Couple des frottements visqueux
C_t	Couple de la turbine
J_g	Inertie du générateur

DTC-MG

C_{em}	Couple électromagnétique
$\varphi_{r\alpha}; \varphi_{r\beta}$	Flux statorique et rotorique dans le repère ($\alpha; \beta$)
$V_{r\alpha}; V_{r\beta}$	Tensions statorique et rotorique dans le repère ($\alpha; \beta$)
$i_{r\alpha}; i_{r\beta}$	Courants statorique et rotorique dans le repère ($\alpha; \beta$)
$S(x)$	Surface de glissement.
u_{eq}	Commande équivalente (linéarisation exacte)
u_n	Commutation de la commande (stabilisante)
sat	Fonction de saturation
sgn	Fonction de signe
n	Order du système
x	Vecteur d'état
xd	Vecteur d'état désiré
u	Vecteur de commande
e	Erreur

RTO

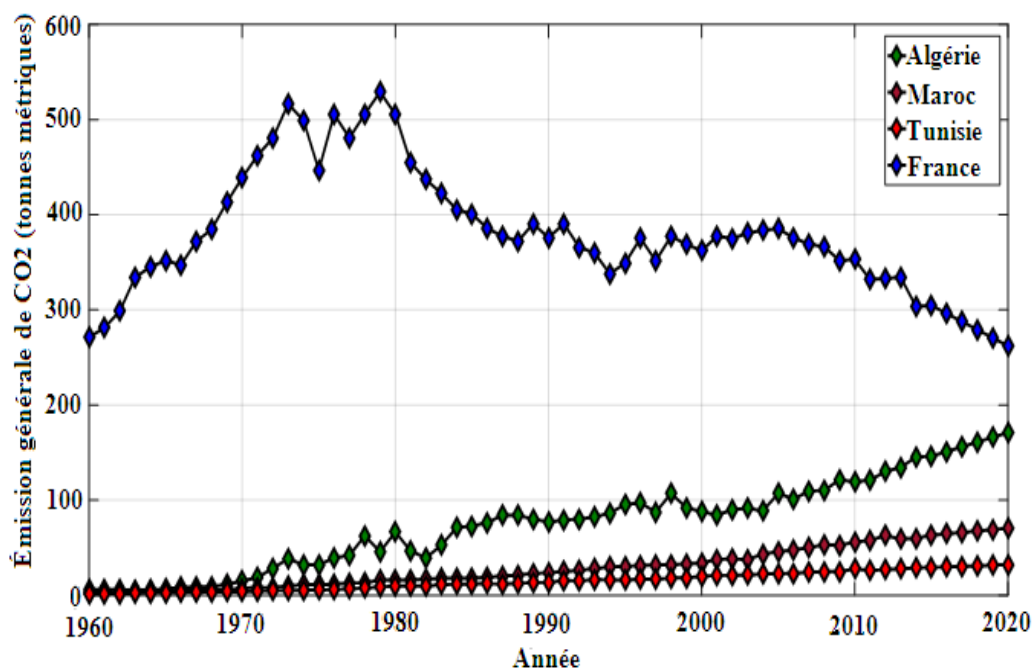
D_w	Degré de l'aptitude d'humidité (Wetness degré)
$Y_r(it)$	Candidat précédent pour l'itération
b_1, b_2, b_3	Paramètres ajustable
γ^{new}	Nouveau candidat
γ^{best}	Meilleure solution de la génération précédente
k	Numéro du candidat
it	Numéro d'itération
N	Echelle de la population
m	Limite supérieure du paramètre
$randn$	Numéro aléatoire
f_k	Degré de fitness

Introduction Générale

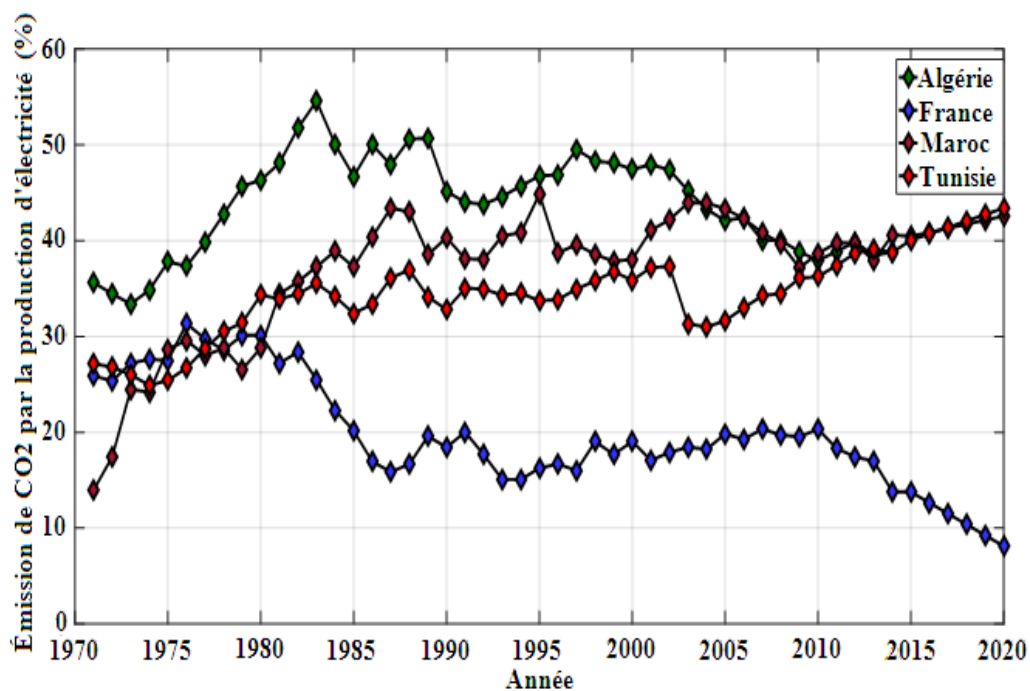
Introduction Générale

L'électricité représente la forme d'énergie qui peut être générée avec une efficacité acceptable à partir d'une source primaire, transmise et distribuée sur de longues distances avec des pertes faibles et finalement transformée, sous une forme finale, en énergie thermique, chimique ou mécanique pour des utilisations dans le transports, dans l'industrie ou aussi dans l'espace domestique.

Ces dernières années, la demande mondiale en énergie et surtout en énergie électrique a atteint un seuil préoccupant pour un grand nombre de pays. L'épuisement annoncé des réserves pétrolières par les spécialistes et les changements climatiques dus aux gaz à effet de serre ont incité, en toute urgence, la communauté internationale à s'orienter vers les énergies renouvelables notamment l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie solaire thermique et l'énergie éolienne. En effet, une véritable orientation mondiale est prise au sérieux aujourd'hui, aussi bien sur le plan politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en les ramenant à leur niveau de 1990, que sur le plan de l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable [Per 19]. Ceci a été recommandé à la troisième conférence des Parties de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Kyoto en décembre 1997 [Kja 05], La figure 1.a et 1.b montre, clairement, l'importance de l'utilisation des énergies renouvelables pour réduire les émissions de carbone, d'où l'impact positif sur l'environnement [Per 19].



a. Émission de CO₂ en Algérie, en France, au Maroc et en Tunisie [Per 19].



b. Émission de CO₂ causée par la production de l'électricité (%) : en Algérie, en France, au Maroc et en Tunisie [Per 19].

Figure.1. Comparaison de l'émission de CO₂ entre pays partenaires.

Dans ce contexte, les nouvelles énergies vertes, dites renouvelables, sont réapparues et prennent, de plus en plus, une place indéniable dans le marché d'électricité. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire aux énergies fossiles et nucléaire puisque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, à l'échelle mondiale, un gisement considérable.

L'exploitation des ressources renouvelables commence à prendre une voie de croissance significative dans quelques pays sous-développés. L'Algérie est un pays très vaste ayant un climat très diversifié. Elle possède deux grandes zones géographiques distinctes, le nord méditerranéen et le sud saharien, peut devenir un bon concurrent dans cette course de recourir aux énergies renouvelables. De ce fait, un programme très ambitieux de développement de ces énergies renouvelables a été adopté récemment par le gouvernement en visant une contribution de ces énergies à hauteur de 40% de la production nationale d'électricité à l'horizon des années 2030 [Min 19]-[Abd 13]. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leurs utilisations pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain.

Les projets d'exploitation des énergies renouvelables pour la production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en trois étapes :

- ✓ Une première étape, entre 2011 et 2013, consacrée à la réalisation de projets pilotes pour tester les différentes technologies disponibles.
- ✓ La seconde étape, en 2014 et 2015, est marquée par le début du déploiement du programme.
- ✓ La dernière étape, de 2016 à 2020, est celle du déploiement à grande échelle.

La conversion de l'énergie se fait à travers les systèmes d'entraînements électriques. La majorité des projets éoliens sont basés sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA ou the Doubly-Fed Induction Machine DFIM). En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse du synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques car ceux-ci assurent une connectés et d'intermédiaire entre le bobinage rotorique, la MADA et le réseau électrique [Bou 12].

Dans le cadre de ce travail de recherche, la nous proposons la conception de stratégies de commande, simples à implémenter, destinées à des systèmes de conversion éolienne. Un aérogénérateur tripales, a axe horizontal, connecté au réseau par une machine asynchrone à double alimentation (MADA) par convertisseur coté rotor (CCR) est à modéliser et à commander. Il et aussi question de développer notre étude et de l'élargir pour un système de conversion éolienne permettant de fournir une puissance constante au réseau tout en offrant des services aux systèmes tel que la prestation de l'énergie réactive pour la correction du facteur de puissance. L'utilisation de ces stratégies de commande sera discutée en montrant leurs avantages en terme de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques de la machine, de réduction des ondulations des puissances et celles du couple tout en diminuant le contenu harmonique des courants générés par la MADA.

Comme systèmes de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique, les générateurs à induction à double alimentation (GADA) basé sur une éolienne à vitesse variable sont utilisés. Les phénomènes des oscillations dans les puissances active et réactive et les ondulations dans les courants rotoriques sont ainsi augmentés.

L'objectif aussi de ce travail, présenté dans le cadre de cette thèse de Doctorat, est centré sur l'application des principes de la commande vectorielle et du contrôle direct du couple par des algorithmes de commande classiques et avancés, dans toutes les boucles de régulation, allant de

la régulation des puissances, des courants, des flux rotorique et du couple électromagnétique de la MADA avec différents modes et conditions de fonctionnement de la machine. Ceci pourra y aller jusqu'à la minimisation des harmoniques introduites par le convertisseur côté réseau, en passant par le contrôle de la puissance et par la réduction des oscillations du couple et du flux. L'ensemble de ces propositions a été réalisé par des simulations implantées sur l'outil Matlab/Simulink et expérimentalement par implantation sur la carte DSpace1104.

Pour ce faire, la rédaction de la thèse est organisée de la manière suivante :

Dans **un premier chapitre**, une étude bibliographique détaillée portant sur l'évolution des systèmes de conversion de l'énergie éolienne est présentée. Ensuite, nous exposons la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne connectée au réseau, à savoir, le modèle aérodynamique de la turbine et la génératrice asynchrone doublement alimentée (MADA).

Une première partie du **second chapitre**, sera, entièrement, consacrée à la commande découplant les puissances active et réactive du système de conversion éolienne ainsi que le circuit du système d'entraînement complet, Ensuite, nous présentons le principe de la commande vectorielle appliquée à la MADA. Une seconde partie sera entièrement consacrée à l'étude de la stratégie MPPT qui repose sur le principe de l'extraction du maximum de puissance de l'éolienne. En fin de ce deuxième chapitre, nous exposons les résultats issus des différentes simulations effectuées sur le système d'entraînement sur lequel ont été testés les régulateurs classiques pour différents profils du vent.

Dans **un troisième chapitre**, nous préposons une stratégie de commande directe du couple (Direct Torque Control DTC) basée sur la commande par mode glissant d'ordre supérieur (High order sliding mode control HOSMC) appliquée au contrôle du flux rotorique et au couple électromagnétique de la GADA dans un système de conversion d'énergie éolienne. Cette technique de contrôle et associée à l'algorithme du Super-Twisting. Ceci permettra, sans aucun doute, et efficacement, à l'amélioration des performances de la commande par (DTC) classique et minimiser les oscillations du couple et celles aussi du flux.

La validation des performances des différentes stratégies de réglage est faite par le biais de simulations comparatives.

Le quatrième chapitre est sujet de la partie optimisation. Ainsi, nous présenterons les principes d'une nouvelle technique d'optimisation à base des Racines des Arbres (the Rooted Tree Optimisation ; RTO) dans le but d'améliorer les performances de la commande vectorielle de la MADA en mode autonome et isolé. Ensuite, seront détaillés la partie conception et dimensionnement aussi d'un contrôleur PI classique associé à la RTO noté par : RTO-PI. Finalement, les résultats des simulations et expérimentaux obtenus seront débattus et confirmeront la robustesse de cette technique appliquée à la régulation de l'amplitude et à la fréquence de la tension générée par le système étudié.

Un banc expérimental nécessaire aux validations a été mis en œuvre au laboratoire LGEB de l'Université de Biskra, associant une machine asynchrone à double alimentation de 3kW à une machine à courant continu, émulant l'aérogénérateur. L'ensemble est piloté par un système à base d'une carte DSPACE (Carte DS1104).

Une **conclusion générale** résumant l'essentiel de notre travail sera présenté en fin du manuscrit suivie de quelques **perspectives futures** en continuité naturelle à notre travail de recherche et de la **bibliographie** et les **références bibliographiques** qui sont à la base de notre travail.

Enfin, **deux annexes**, distincts, portant sur les paramètres des machines électriques utilisées, du régulateur PI, de son dimensionnement sont présentés. Il est aussi question de donner les caractéristiques de la carte DSPACE1104 et les paramètres de la RTO adoptée.

CHAPITRE I

Etat de l'Art et Modélisation de la Chaine de Conversion Éolienne

I.1. Introduction

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelable; l'énergie éolienne est aujourd'hui celle la plus compétitive et qui a le taux de croissance le plus élevé. L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité.

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

Dans notre étude on a été choisi éolienne a vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné, plus communément appelé Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

Ce chapitre consacré aux généralités sur l'énergie éolienne, Dans un premier temps, nous expliquerons la définition de l'énergie éolienne et ces composants. Par la suite, les modes de fonctionnement en vitesse fixe et variable et les différents générateurs utilisés sont présentés et la modélisation du système sera étudiée.

I.2. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'une des énergies les plus renouvelables utilisées dans la production d'électricité parce que c'est une énergie propre. La principale source de cette énergie est le soleil, car le vent est causé par les changements de l'atmosphère (température et pression) [Tam 15]- [Dje 15].

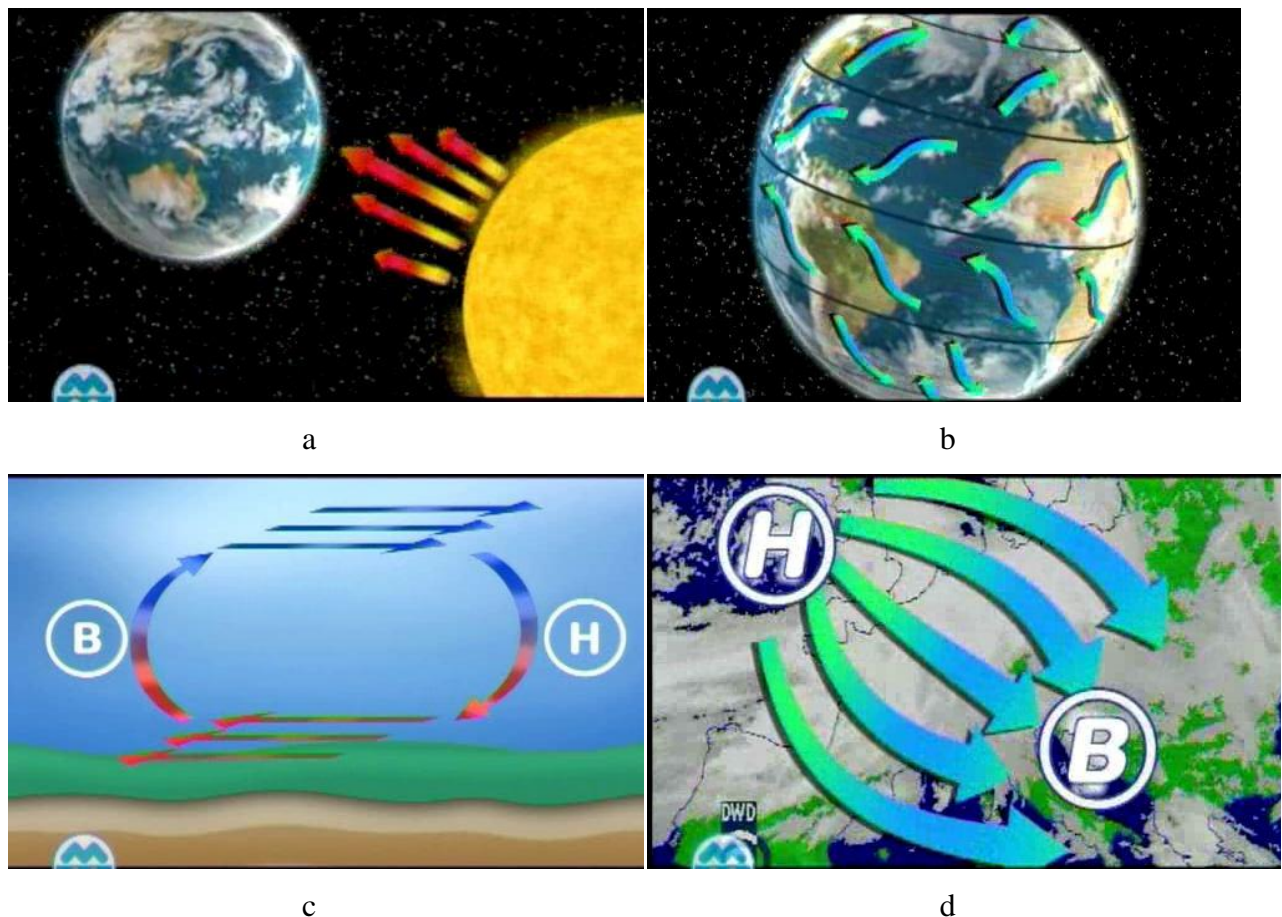


Figure. I.1. La naissance du vent.

I.3. Evaluation de l'énergie en Algérie

L'Algérie est un pays africain et méditerranéen situé au centre de l'Afrique du Nord. La situation géographique de l'Algérie signifie qu'elle occupe une position clé pour jouer un rôle stratégique important dans la mise en œuvre des technologies des énergies renouvelables en Afrique du Nord, ainsi que pour fournir une énergie sûre à ses propres besoins et même pour exporter de tels produits vers les autres pays d'Europe [Bek 17]-[Afr 11].

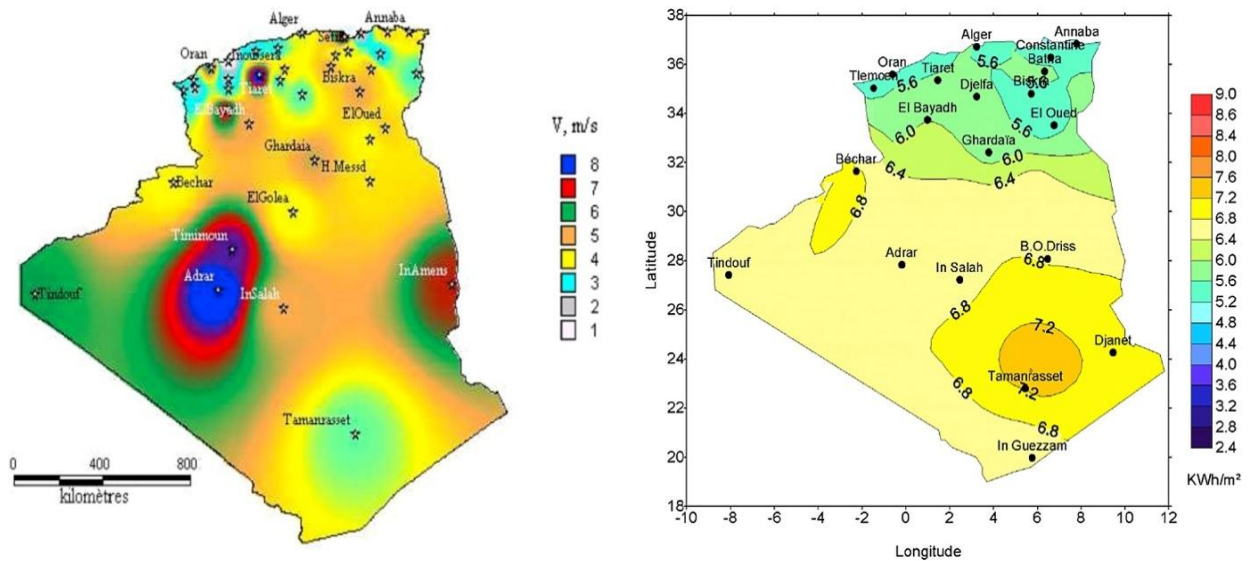
I.4. Potentiel d'énergie renouvelable en Algérie

Les potentiels énergétiques (éolien, solaire) de l'Algérie sont considérables et peuvent être exploités pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), sachant que la région d'Adrar se trouve dans un couloir de vent de 8 m/s (Figure I.2.a) [Bek17]-[Afr11].

Le système électrique algérien reste alors fortement dépendant des technologies de production d'électricité à partir de combustibles fossiles. Bien que les projections futures montrent toujours un rôle dominant pour ces technologies, les sources d'énergie renouvelables

Chapitre I Etat de l'Art et Modélisation de la Chaine de Conversion Éolienne

devraient avoir une importance croissante, en particulier pour l'énergie éolienne, l'énergie solaire concentrée et l'énergie photovoltaïque. Montrer la Figure I.2 [Bek17]-[Had 17].



a. Électricité éolienne à 50m de hauteur

[Had17]-[Bek 17].

b. Electricité solaire (en kWh / m2 / jour) en

Algérie [Benn 19].

Figure. I.2. Sites potentiels en Algérie.

I.5. Les différents types des éoliennes

Un aérogénérateur (éolienne), dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne est un élément principale et très important [Chi 17] Les éoliennes sont classées, selon la disposition géométrique de l'aérogénérateur, en deux catégories: celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.5.1. Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. Mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années 1920 [Dje 15]-[Poi 03]-[Tam 15]-[Boy 06].

- Les avantages d'une éolienne à axe vertical
 - Elle vous permet de placer une génératrice, un multiplicateur....etc. à terre.
 - Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.
- Les inconvénients principaux sont les suivants :

Chapitre I Etat de l'Art et Modélisation de la Chaîne de Conversion Éolienne

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne [Ken 12]-[Boy 06].
- Le rotor de Savonius, dont le fonctionnement est basé sur le principe des « trainées différentielles » utilisé dans les anémomètres (du nom de son inventeur, breveté en 1925) : les exercices par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il conduit ensuite à un couple qui est renforcé par la circulation d'air entre deux cylindres entraînant le moteur à tourner [Ken 12]-[Poi 03]-[Tam 15]. Le rotor de Savonius nécessite un grand couple de démarrage [Rou 16].

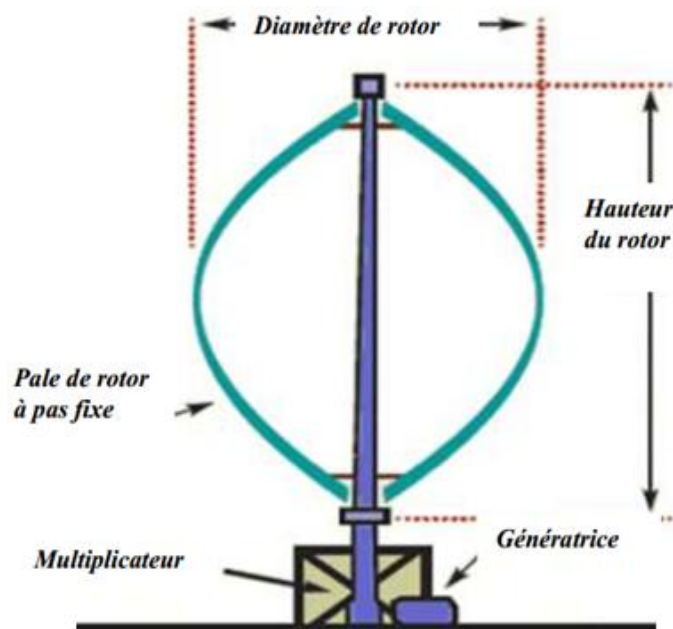


Figure. I.3. Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable (éolienne à axe vertical).

I.5.2. Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les turbines à axe horizontal actuellement. Elles sont les plus utilisées par rapport aux turbines à axe vertical, à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois (les plus courantes) ou plusieurs pales [Idj10]-[Mir 05].

- Les avantages d'une éolienne à axe horizontal
 - Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.

Chapitre I Etat de l'Art et Modélisation de la Chaîne de Conversion Éolienne

- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.
- Peu de contraintes mécaniques,
- Grande efficacité [Boy 06].
- L'inconvénient d'une éolienne à axe horizontal
 - Bruit conséquent les vibrations non négligeables [Idj 10]-[Rou 16].
 - Coût de construction très élevé.
 - L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolés. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

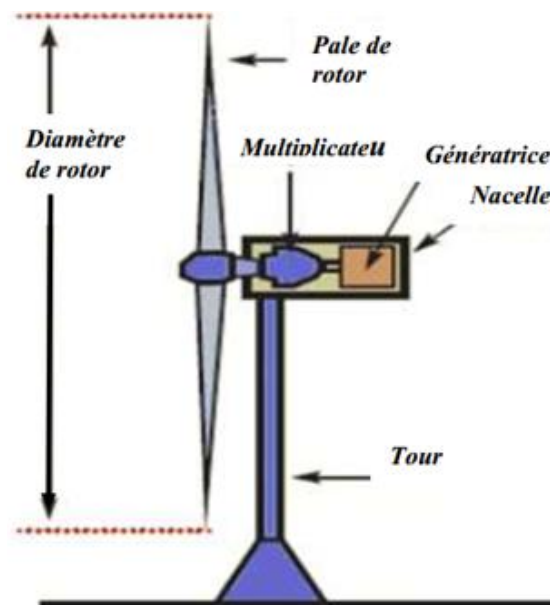


Figure. I.4. Aérogénérateur à axe horizontal.

I.5.3. Constitution d'une éolienne à axe horizontal

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Chapitre I *Etat de l'Art et Modélisation de la Chaîne de Conversion Éolienne*

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux [Tam 15].

Le mât : c'est un tube en acier ou tour qui supporte le rotor et la nacelle. Doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Le mât compose les câbles qui assurent la liaison électrique. Le choix de sa hauteur est important. Il s'agit de trouver un bon compromis: Le coût de sa construction et l'exposition souhaitée du vent. En effet, cela s'accompagne également de l'accroissement du coût de la structure [Dje 15]-[Rou 16]-[Lou 16]-[Idj 10]-[Abd12].

La nacelle : Elle assemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulement, multiplicateur. Le frein à disque est différent des freins aérodynamiques, qui arrêtent le système en cas de surcharge. Un générateur qui est une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) [Ria 17]-[Lop 07]-[Poi 03]. Regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande [Poi 03]-[Boy 06]-[Fez].

Les pales : Permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales fixées sur le rotor a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines unies et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de la vision des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité [Poi 03]-[Boy 06]-[Fez].

Le rotor : Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit, et permet ainsi une stabilité du mécanisme et une augmentation de la durée de vie du rotor [Bou 07]-[Ela 04]-[Dje 15].

La figure (I.5) montre un exemple typique de chaîne de conversion à multiplicateur [Mul 03].

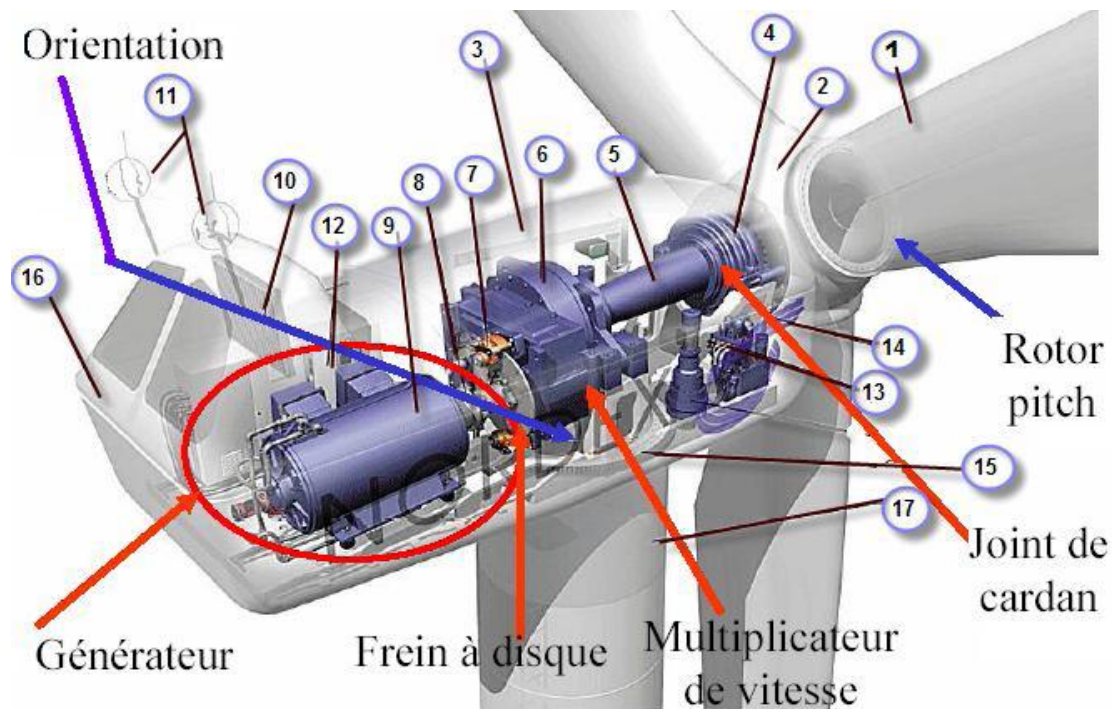


Figure. I.5. Les composantes d'une éolienne *Nordex N60* (1300 kW).

-1: pales, -2: moyeu rotor, -3: nacelle, -4: cardan, -5: transmission, -6: multiplicateur de vitesse, -7: frein à disque, -8: accouplement, -9: génératrice, -10: radiateur de refroidissement, 11: centrale de mesure du vent, -12: contrôle, -13: centrale hydraulique, -14: mécanisme d'orientation des pales, -15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, -16: capot, -17: mat.

I.6. Etat de l'Art sur la Conversion Electromécanique

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, les éoliennes fonctionnant à vitesse fixe qui contiennent pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil, et celles dont la vitesse est variable. Qui permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

I.6.1. Les Eoliennes à vitesse Fixe

Dans ce cas les éoliennes fonctionnent à une vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Ces éoliennes principalement reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statorique. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif) [Idj 10]-[Dav 07]- [Mon 12]-[Wan 12]-[Cou 08].

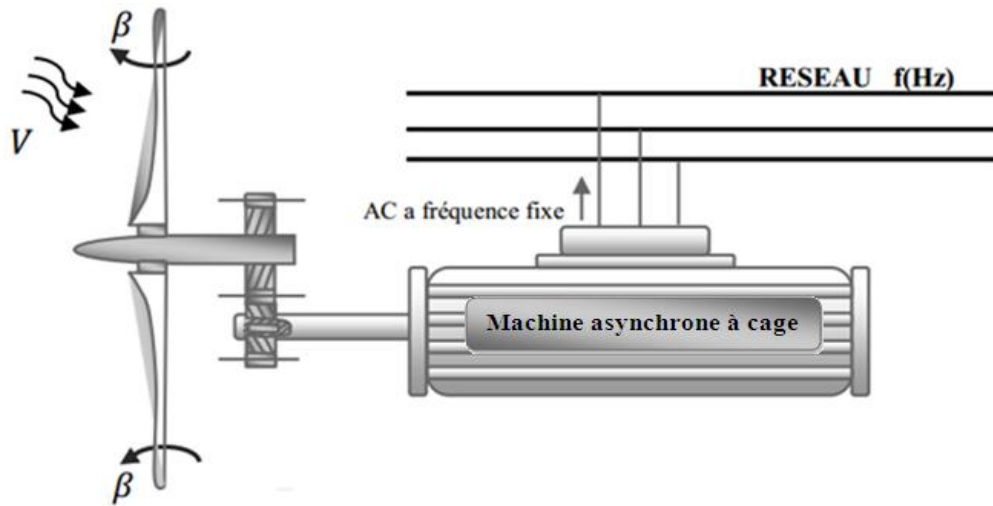


Figure. I.6. Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.

I.6.2. Les Eoliennes à Vitesse Variable

La Figure (I.7) montre le deuxième cas. Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable [Bek 14] cela permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [Idj 10].

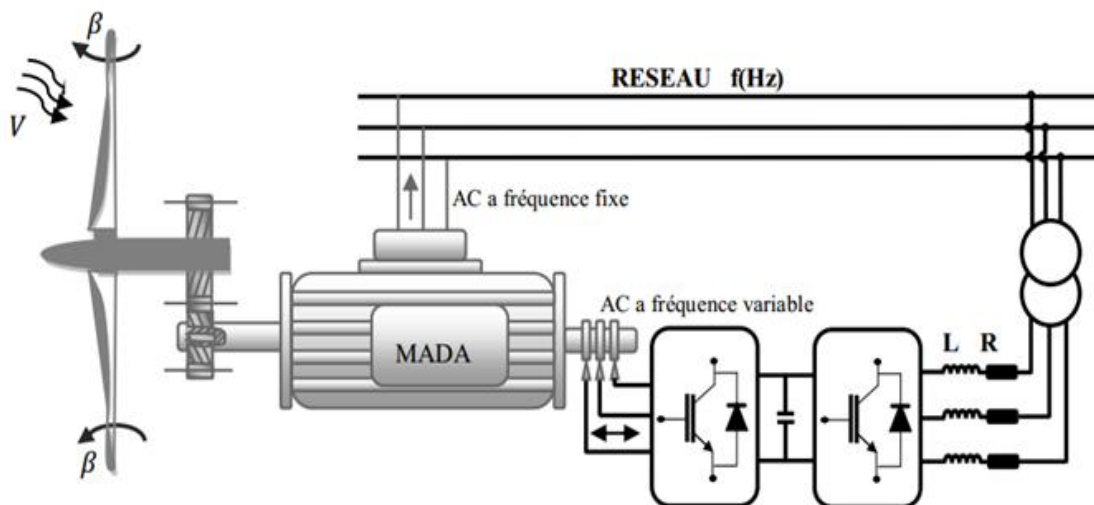


Figure. I.7. Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.

I.7. Types des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement, le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépende par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [Rou 16]-[Cam 03]:

- **Fonctionnement à vitesse fixe :**

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électrique de commande.
- Moins cher.

- **Fonctionnement à vitesse variable :**

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- Une exploitation optimale de l'énergie du vent.
- Une possibilité d'augmentation de la vitesse de rotation du rotor lors des rafales.

Les deux types des machines électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les principales caractéristiques de chacun de ces types de machine.

I.7.1. Générateur synchrone

C'est ce type des machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (voir figure I.8) [Bel 10]-[Kha 14].

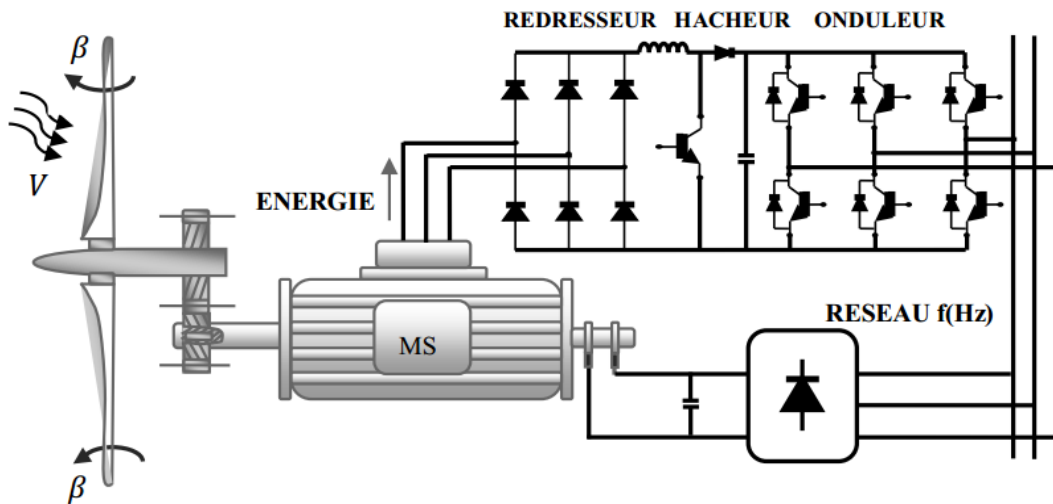


Figure. I.8. Machine synchronisée directement au réseau.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demande un important travail de maintenance.

I.7.2. Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique, pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction [Cam 03].

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

I.7.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Est la machine asynchrone à cage. Elle est très robuste, nécessite peu d'entretien, et son coût de construction est faible. Son utilisation est simple et elle est aussi facile à connecter au réseau [Ard 16].

Chapitre I Etat de l'Art et Modélisation de la Chaîne de Conversion Éolienne

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction [Poi 03]. L'énergie réactive de la machine n'est pas contrôlée, elle dépend de la vitesse du rotor. Souvent des batteries de condensateur sont mises en parallèle et connectées au stator de la machine pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la machine [Ard 16].

Dans les années 90, les Danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction d'un convertisseur de puissance entre la machine et le réseau, malgré son prix élevé, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant [Ben 13].

I.7.2.2. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

Avec les générateurs synchrones, 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 ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement [Idj 10].

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice [Ben 13].

I.8. Modèle de la machine asynchrone double alimentée (MADA)

I.8.1. Définition générale de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une machine triphasée à courant alternatif. Elle est constituée d'un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classique, et le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine qui est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA connecté directement au réseau est le rotor et connecté à un onduleur [Ben 13]-[Ber 99]-[Gen 11].

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui d'une machine triphasée classique (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements figure I.9.

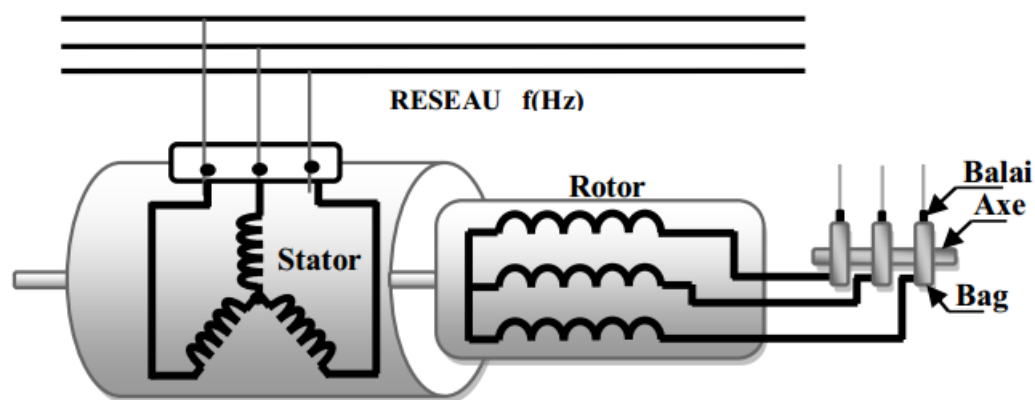


Figure. I.9. Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA [VID 04].

I.8.2. Représentation de la MADA

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile et dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné est de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant lors du démarrage, augmenter le couple durant cette phase, ainsi que de pouvoir élargir la plage de variation de la vitesse.

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée «machine généralisée», car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent, mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être, éventuellement, résumé par le terme de: machine synchrone à excitation alternative [Poi 03]-[Ben 13].

I.8.3. L'application de la MADA dans le système éolienne connecté au réseau

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée :

Génération des réseaux de bord des navires ou des avions

- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible Consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

Une troisième application de la MADA consiste à faire fonctionner celle-ci en moteur à vitesse variable à hautes performances avec deux convertisseurs : un au rotor et un au stator Figure I.10.

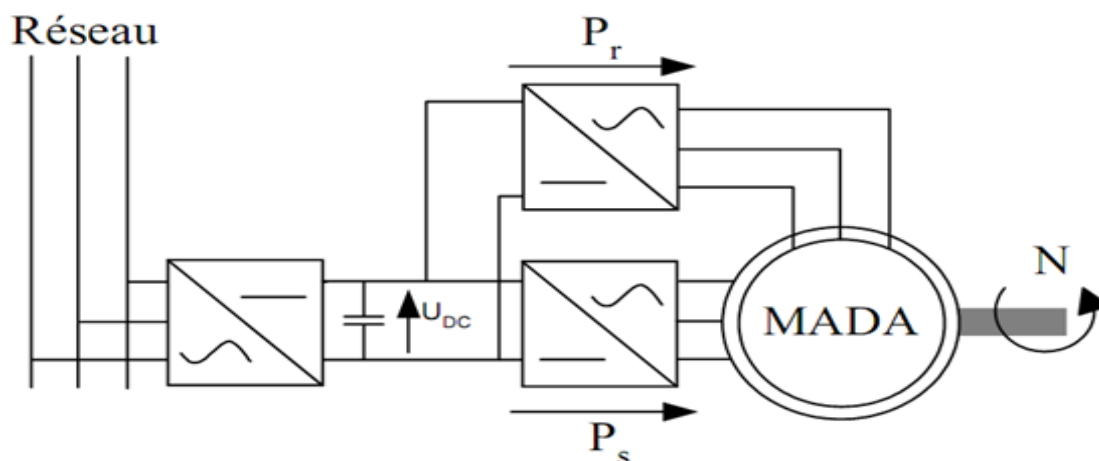


Figure. I.10. MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances.

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas (\pm) 30% en deçà ou au-delà de la vitesse synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0.7 à 0.3 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 [Gho 01]-[Ram 00].

I.8.4. Modes de fonctionnement de la MADA

On se base sur le mode de fonctionnement où le stator est connecté directement au réseau et le rotor est alimenté par un convertisseur de puissance.

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou en générateur [Boy 06]-[Ber 99].

I.8.4.1. Fonctionnement moteur

a. Fonctionnement hypo-synchrone $g > 0$

Pour ce cas, la machine en mode de fonctionnement moteur, tourne à une vitesse faible inférieure à la vitesse de synchronisme.

La puissance P_s fournie par le réseau au stator, la puissance P_r « la puissance de glissement » transite par le rotor et est réinjectée au réseau [Ben 11].

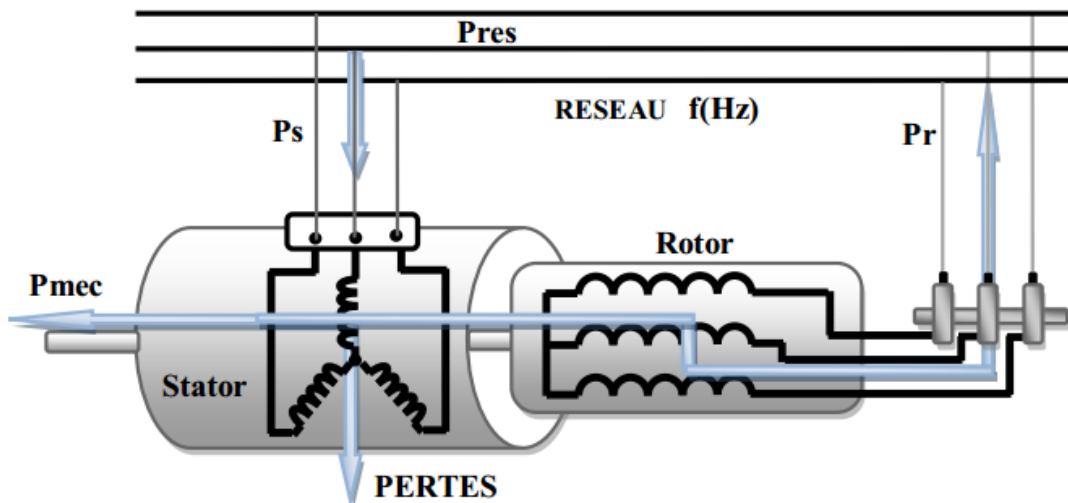


Figure. I.11. Fonctionnement en mode hypo-synchrone de la MADA.

b. Fonctionnement hyper-synchrone $g < 0$

Dans ce mode de fonctionnement illustré dans la figure suivante montre que la puissance est fournie par les réseaux au stator et rotor, on a donc un fonctionnement à vitesse supérieur aux vitesses synchronismes [Lou 16].

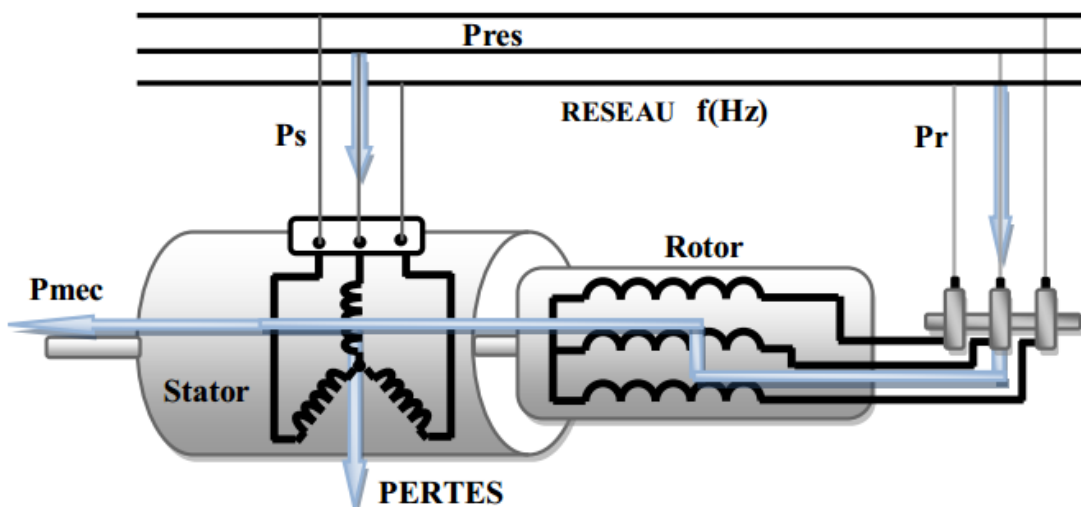


Figure. I.12. Fonctionnement en mode hyper-synchrone de la MADA.

I.8.4.2. Fonctionnement générateur

Le comportement est similaire à celui du fonctionnement en mode moteur avec deux cas :

a. Fonctionnement hypo-synchrone $g > 0$

En mode de fonctionnement hypo synchrone, la vitesse mécanique est faible alors le réseau reçoit une puissance statorique P_s et envoie une puissance rotorique vers la machine figure (I.13).

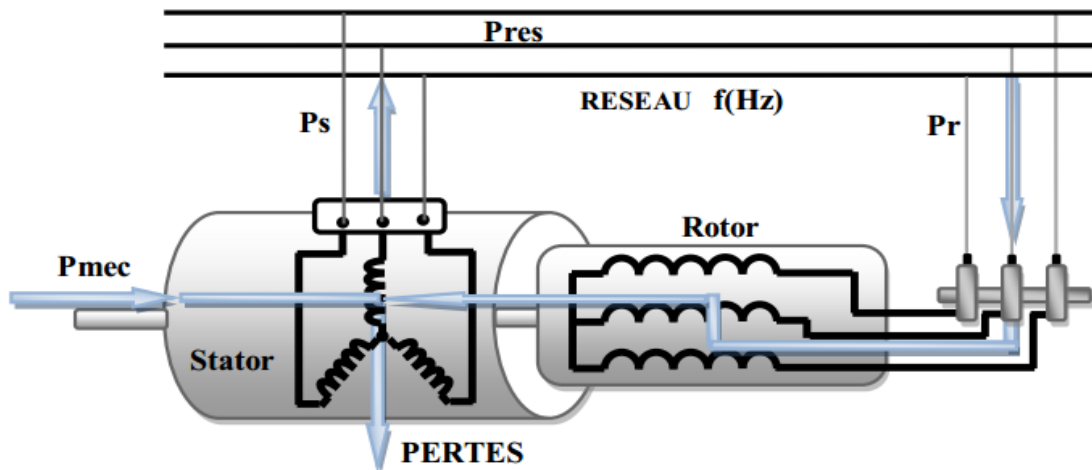


Figure. I.13. Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone de la GADA.

b. Fonctionnement hyper-synchrone $g < 0$

En mode de fonctionnement hyper synchrone la vitesse mécanique augmente jusqu'à une vitesse supérieure à celle du synchronisme, dans ce cas les deux puissances sont envoyées par la machine vers le réseau [Tam 15].

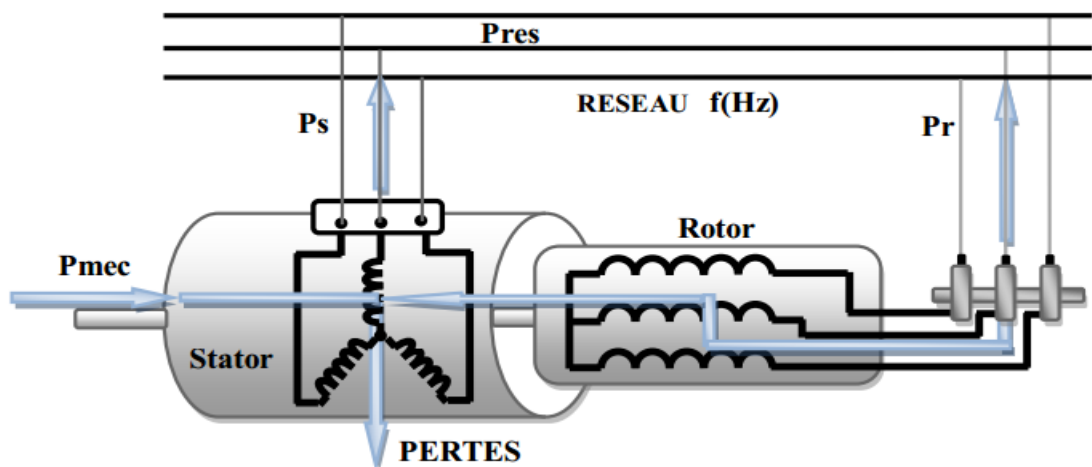


Figure. I.14. Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone de la GADA.

I.9. Modélisation de la MADA

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Comme la machine asynchrone, elle se compose d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile.

Le stator est alimenté par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (I.1)$$

ω_s : La pulsation du réseau d'alimentation triphasé,

p : Le nombre de paire des pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator.

Dans ce qui suit on va présenter la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

I.9.1. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices suivantes [Ken 12]-[Gal 10]-[Abd 12]:

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- Les paramètres de la machine sont considérés indépendants de la température.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures d'où résulte du fait que l'entrefer est constant.
- l'effet d'encoche est négligé et les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statorique.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor donc seuls les enroulements sont parcourus par des courants.

I.9.2. Modèle triphasé de la MADA

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé (abc) sont données comme suit [Gal 10]-[Abd 13]:

Sous les hypothèses précédentes et en utilisant La loi de Faraday et la loi d'Ohm, Les équations des tensions statorique, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle par :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (I.2)$$

Et les équations des tensions rotorique, peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (I.3)$$

$$\text{Grandeurs statorique} \begin{cases} [V_s] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T \\ [I_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T \\ [\varphi_s] = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^T \end{cases} \quad (I.4)$$

$$\text{Grandeur rotorique} \begin{cases} [V_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T \\ [I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T \\ [\varphi_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^T \end{cases} \quad (I.5)$$

Les flux statorique et rotorique instantanés par phase, sont donnés par équations magnétiques suivantes :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (I.7)$$

Où :

R_s, R_r : sont respectivement les résistances statorique et rotorique.

$L_s L_r$: inductances propres statorique et rotorique.

M_{sr} : inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

M_s : inductances mutuelles entre les phases statorique

M_r : inductances mutuelles entre les phases rotorique.

Avec:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

M : Maximum de l'inductance mutuelle enter une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

I.9.3. Transformation de Park

La transformation de R.H.Park appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires indice o, d'axe directe (indice d), d'axe quadrature (indice q) [Cha 10].

Chapitre I Etat de l'Art et Modélisation de la Chaîne de Conversion Éolienne

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de passer d'un système triphasé à un système diphasé exprimé dans le repère (d, q) où les éléments sont continus, ce qui simplifie la résolution des équations.

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ qui est donnée sous la forme suivante [Nes 07] :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.10)$$

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

- **Tensions**

$$\begin{cases} [V_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][V_s] \\ [V_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][V_r] \end{cases} ; \begin{cases} [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{dq0}]_s \\ [V_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[V_{dq0}]_r \end{cases}$$

- **Courants**

$$\begin{cases} [I_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][I_s] \\ [I_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][I_r] \end{cases} ; \begin{cases} [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[I_{dq0}]_s \\ [I_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[I_{dq0}]_r \end{cases}$$

- **Flux**

$$\begin{cases} [\varphi_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][\varphi_s] \\ [\varphi_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][\varphi_r] \end{cases} ; \begin{cases} [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_s \\ [\varphi_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_r \end{cases}$$

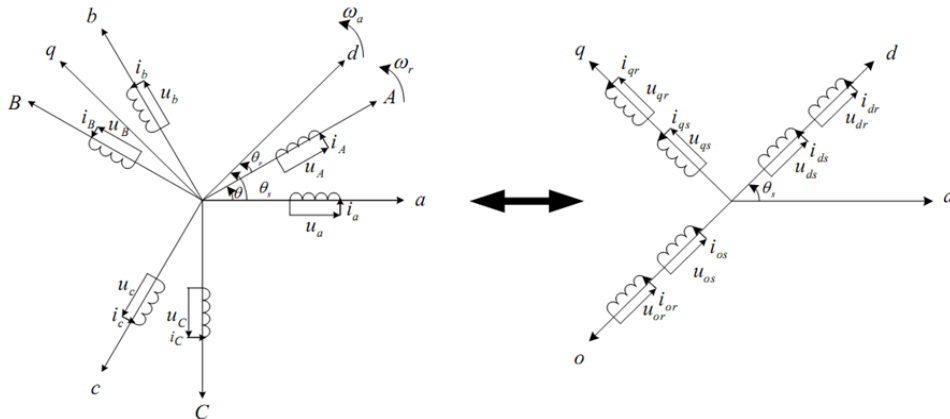


Figure. I.15. Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

I.9.4. Le choix du référentiel

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié [Ard 16]

Il existe trois choix importants où on peut fixer le référentiel ($d q$) :

- Au stator
- Au rotor
- Au champ tournant ;

a. Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (\text{I.11})$$

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation [Ela 04]-[Bek 14].

b. Référentiel lié au rotor

Ce référentiel, appelé souvent stationnaire, est caractérisé par la relation suivante :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (\text{I.12})$$

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

c. Référentiel lié au champ tournant

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g \cdot \omega_s = \omega_r \quad (\text{I.13})$$

Ce type de référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines [Gai 10].

I.9.5. Modèle de la MADA lié au système d'axes (d, q)

On représente les équations de la MADA dans le repère biphasé ($d q$). En multipliant les systèmes des équations (I.2) et (I.3) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{I.14})$$

En multipliant les systèmes des équations (I.6) et (I.7) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{I.15})$$

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\varphi_{sd} i_{rq} - \varphi_{sq} i_{rd}) \quad (\text{I.16})$$

I.10. Modélisation de la turbine éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [Ken 12].

La turbine qui sera modélisé est constituée de trois pales de longueur R entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain G , comme le montre la Figure (I.16) [Ela 04]-[Ghe 11].

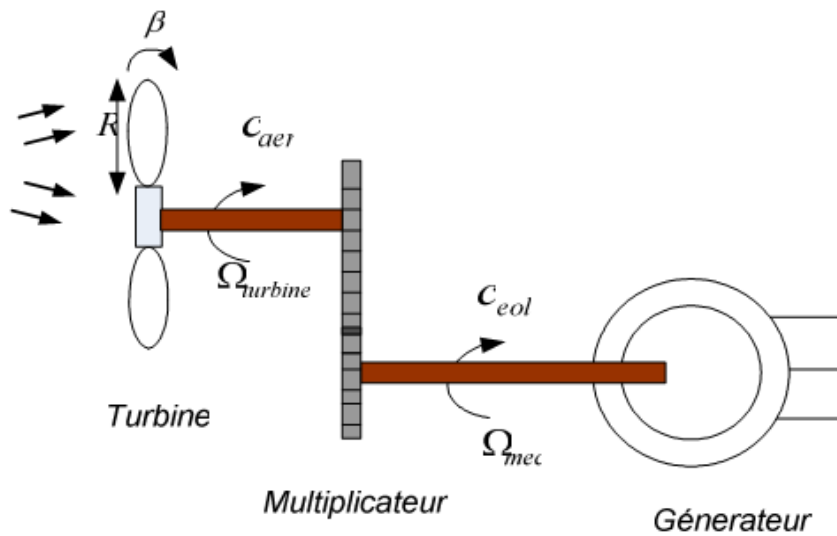


Figure. I.16. Schéma de la turbine éolienne.

On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes :

- La turbine.
- Le multiplicateur.
- L'arbre.

I.10.1. Modélisation de la turbine

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple éolien appliqué sur l'arbre lent de l'éolienne.

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [Sag 98]-[Bec 13]:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V_{vent}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (I.17)$$

ρ : Est la densité de l'air qui est égale à 1.22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C. Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité.

S : Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale R où $S = \pi R^2$.

V_{vent} : Est la vitesse du vent.

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique P_{aer} inférieure à la puissance disponible P_v .

$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (I.18)$$

La turbine éolienne peut seulement convertir juste un certain pourcentage de la puissance capturée du vent [Ela 03]. On représente ce pourcentage par $C_p(\lambda, \beta)$ qui est en fonction de ratio de vitesse λ et l'angle de l'orientation de pale β .

Le coefficient de puissance C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ($\frac{P_{aer}}{P_v}$). Il dépend de la caractéristique de la turbine. L'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [Ela 04]-[Abd 00]:

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (I.19)$$

La courbe réelle du coefficient de puissance C_p de la turbine éolienne étudiée dans cette thèse est illustrée dans la figure I.17 C_p est $C_{p_max} = 0.5$ qui correspond à l'angle de l'orientation de pale $\beta = 2^\circ$ et la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{optim} = 9.2$. Pour extraire

le maximum de la puissance générée, nous devons fixer le ratio de vitesse λ_{optim} et le coefficient de puissance maximal $C_{p_max} = 0.5$.

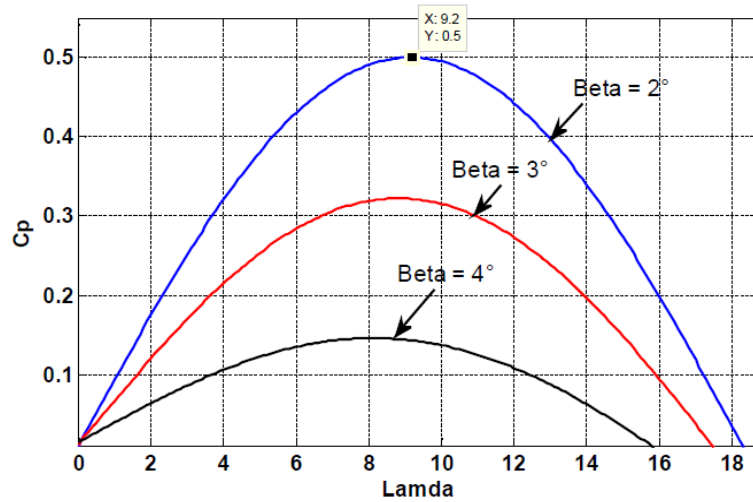


Figure. I.17. Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de pale β .

Le couple de la turbine est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine Ω_t :

$$C_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} \tag{I.20}$$

Ω_t : Vitesse de la turbine.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

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 [Ela 04]:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \tag{I.21}$$

I.10.2. Modélisation du Multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. La turbine est normalement couplée à l'axe du générateur par un multiplicateur dont le gain de vitesse G est choisi afin de placer la vitesse d'axe du générateur dans une marge de vitesse désirée. En négligeant les pertes de transmission, le couple et la vitesse de la turbine se sont rapportés au côté du générateur par [Aou 09] :

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par simple gain les équations suivantes:

$$C_g = \frac{G_{aer}}{G} \tag{I.22}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I.23)$$

Où :

C_g : Couple du multiplicateur.

Ω_{mec} : Est la vitesse de rotation du générateur.

G : Gain du multiplicateur.

I.10.3. Modélisation de l'Arbre Mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t supportant les pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [Ghe 11]-[Abd 13].

$$J_t = J_g + J_t G^2 \quad (I.24)$$

$$C_{mec} = J_t \frac{d\Omega}{dt} \quad (I.25)$$

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.26)$$

$$C_g - C_{em} = J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} \quad (I.27)$$

Où :

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

C_{em} : est le couple électromagnétique du GADA.

C_{vis} : Le couple de frottement visqueux.

Le schéma bloc correspondant à la modélisation de la turbine éolienne se déduit aisément des équations ci-dessus et est représenté par la figure I.18.

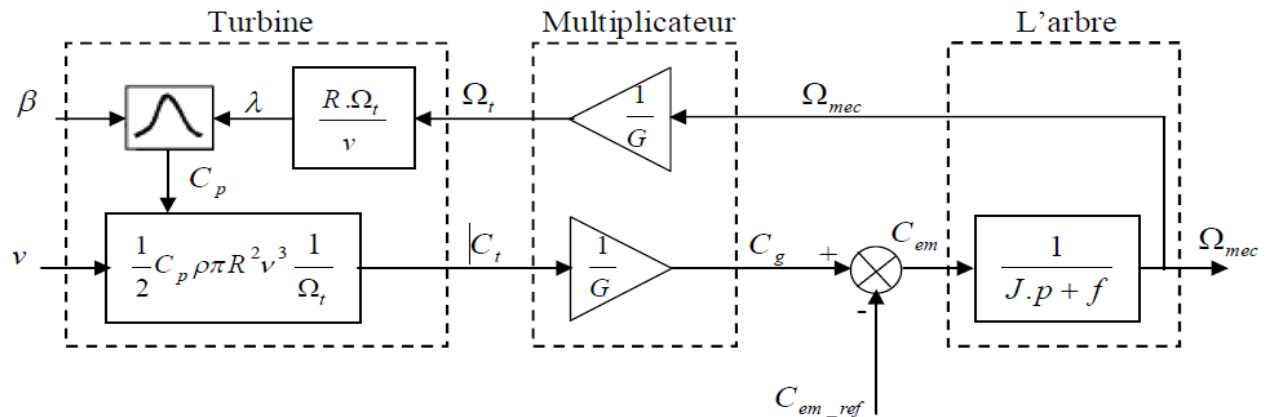


Figure. I.18. Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

I.11. Conclusion

D'après étude est faite sur l'ensemble des turbines éoliennes utilisées dans ce chapitre. Nous avons, présenté les principales théories qui régissant l'interaction entre le vent et la turbine éolienne, ensuite nous avons décrit les différents structures qui composent les chaînes de conversion éoliennes (type axe horizontale). Enfin on a présenté les différentes machines utilisées pour la conversion de l'électricité.

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

Dans le chapitre suivant, nous allons examiner la commande chaîne éolienne qui est utilisé dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

CHAPITRE II

Stratégie de Commande du Système de Conversion Éolienne

II.1. Introduction

Dans le premier chapitre on a modélisé chaque élément de système de conversion éolienne, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques et nous savions aussi que l'utilité de la MADA est de permettre le fonctionnement à vitesse variable, ceci est nécessaire pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et ainsi augmenter le rendement de la machine.

On s'intéresse dans ce chapitre, à la commande vectorielle en puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine fonctionnement génératrice (GADA) Les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées avec puissance à 4Kw. Afin d'examiner la robustesse de cette commande à vitesse variable, on a soumis à la turbine une vitesse du vent variable en échelons et une autre variable aléatoire.

II.2. Commande vectorielle de la MADA

II.2.1. Lois de la commande vectorielle appliquée à la (MADA)

La MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée dans la commande vectorielle où le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d du repère de Park [Akk 10]. L'application de la commande vectorielle à la MADA consiste à réaliser un découplage entre les grandeurs générant le couple et le flux. Pour cela, on peut régler le flux par une composante du courant statorique ou rotorique (i_{sd} ou i_{rd}), et le couple par l'autre composante (i_{sq} ou i_{rq}). Ainsi, la dynamique de la MADA sera ramenée à celle d'une machine à courant continu. On peut schématiser cette méthode comme suit:

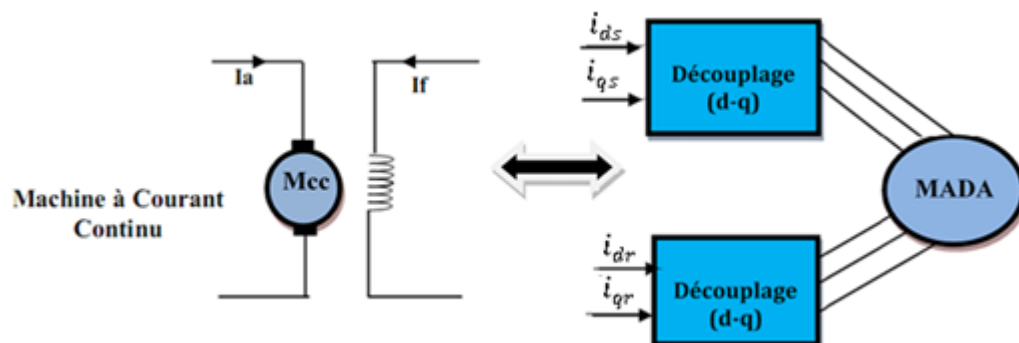


Figure. II.1. Principe de la commande vectorielle d'une MADA.

Dans cette étude, l'alimentation de la machine asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté, est assuré par un onduleurs de tension à deux niveau au niveau du rotor, tandis

que le stator est connecté directement au réseau, La figure II.2 illustre la structure du système globale.

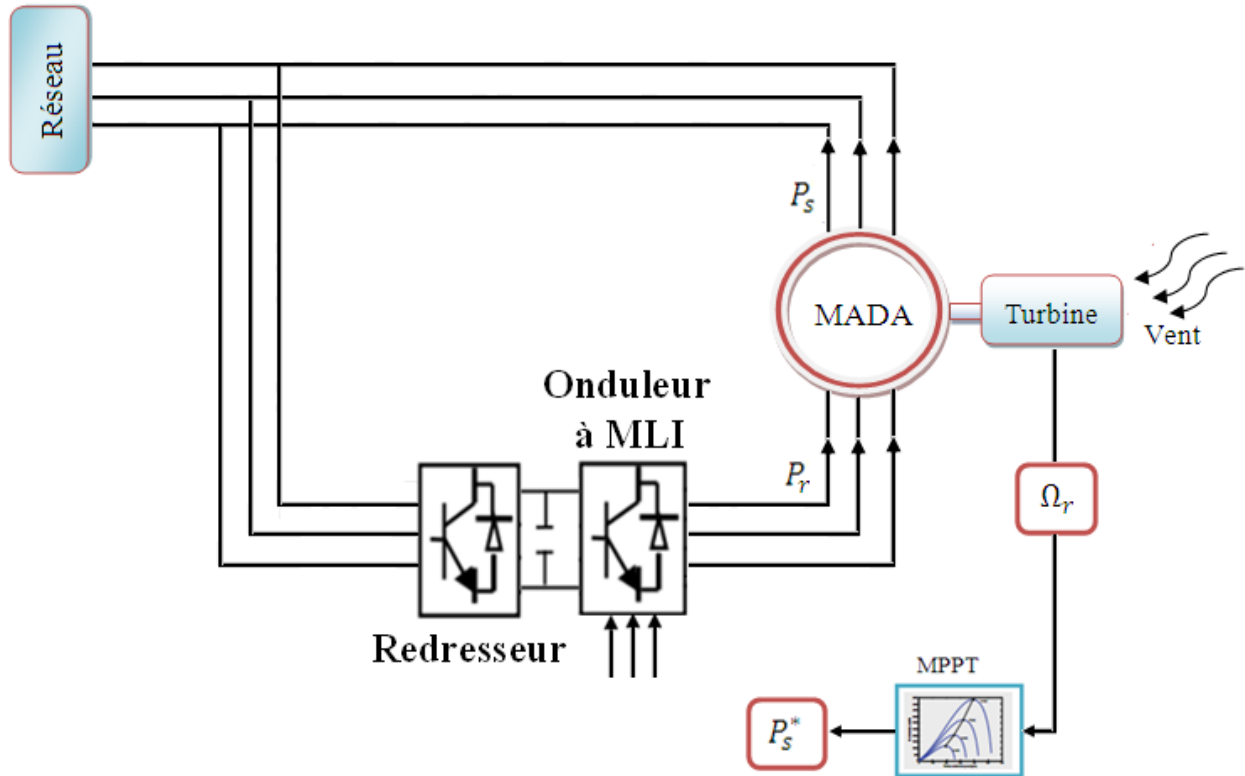


Figure. II.2. Structure du système global.

Selon les hypothèses de l'orientation du flux statorique, on peut écrire :

$$V_{ds} = 0 \text{ et } V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_s \Rightarrow \varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

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

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité, nous allons nous intéresser à un contrôle indépendant des puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions et des courants rotoriques générés par un onduleur, aux puissances active et réactive statoriques [Mac 02]. L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure II.3.

Dans ce travail, on choisit l'orientation du flux statorique suivant l'axe d référentiel diphasé (d, q) lié au champ tournant [Gai 10]-[Abd 13].

On a donc:

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \quad \& \quad \varphi_{sq} = 0$$

Alors l'équation de la MADA s'écrit comme les équations (I.14) et (I.15).

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{rd} \quad (II.5)$$

L'arrangement des équations donne les expressions des tensions rotoriques selon les courants rotoriques suivante:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{rd} + g \omega_s \frac{M \phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.6)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \omega_s \frac{M \phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.7)$$

Où :

$g \omega_s = (\omega_s - \omega)$: Coefficient de glissement.

$\sigma = (L_r - \frac{M^2}{L_s})$: Coefficient de dispersion.

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courant rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme $g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraine une erreur de trainage. Le contrôle de la synthèse devra donc prendre en compte cette erreur.

Les équations (II.4 et II.6) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler figure II.4.

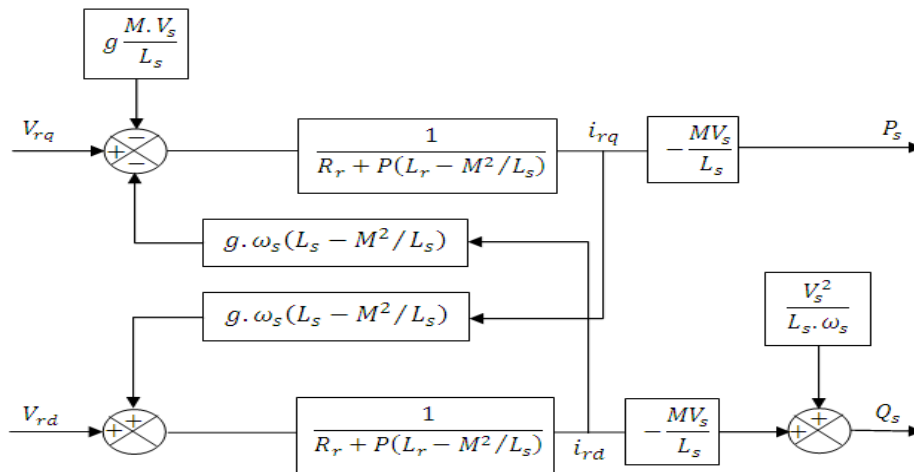


Figure. II.4. Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.

II.3. Les différents types de commande vectorielle

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développée soit :

- La commande vectorielle directe.
- La commande vectorielle indirecte.

II.3.1. Commande vectorielle directe

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive statoriques du GADA, il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{rq} et d autre par la puissance réactive et la tension V_{rd} . En utilisant deux régulateurs PI où la boucle de régulation de la puissance active P_s et la boucle de régulation de la puissance réactive Q_s Pour réguler la machine [Tan 04].

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage entre les deux axes d et q de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure II.5 [Lou 16]-[Ben 13]

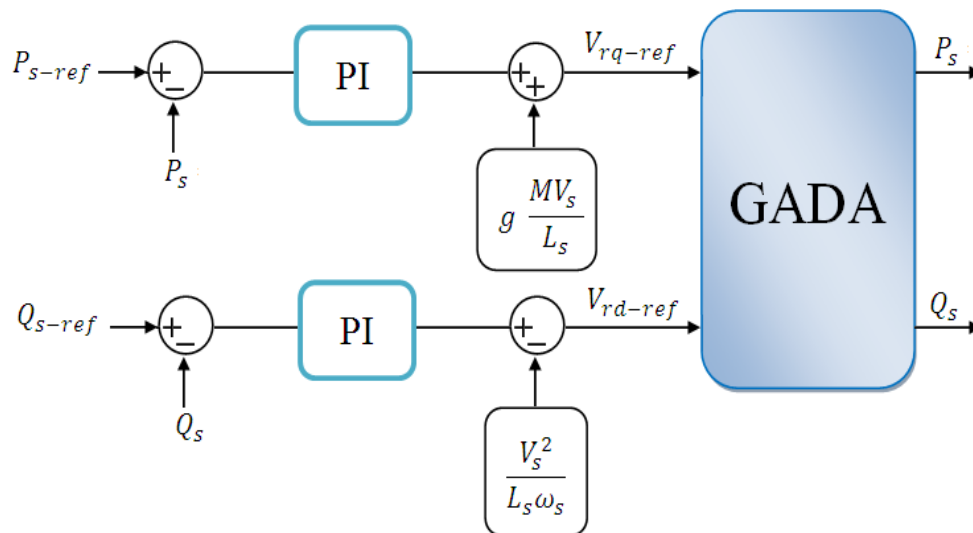


Figure. II.5. Schéma de principe de la commande directe.

II.3.2. Commande indirecte

Cette méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les

courants rotoriques. En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. La méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [Dje 15]-[Tan 04].

II.3.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte :

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du système (un réseau stable en tension et en fréquence) nous introduisons une boucle de régulation indirectement des courants rotoriques déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine. en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q car elle Les courants rotoriques i_{rd} et i_{rq} sont respectivement les images de la puissance active statorique P_s et la puissance réactive statorique Q_s doivent poursuivre leurs courants de références [Dje 15]-[Bek 14].

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotorique sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{rd} et V_{rq} qui conviennent. De ce fait, la commande par boucle interne qui contrôle le courant I_r est alors appliquée à la MADA pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants i_{rd} et i_{rq} en boucle fermée et les puissances P_s et Q_s en boucle ouverte. Le schéma de cette commande est illustré sur la figure II.6.

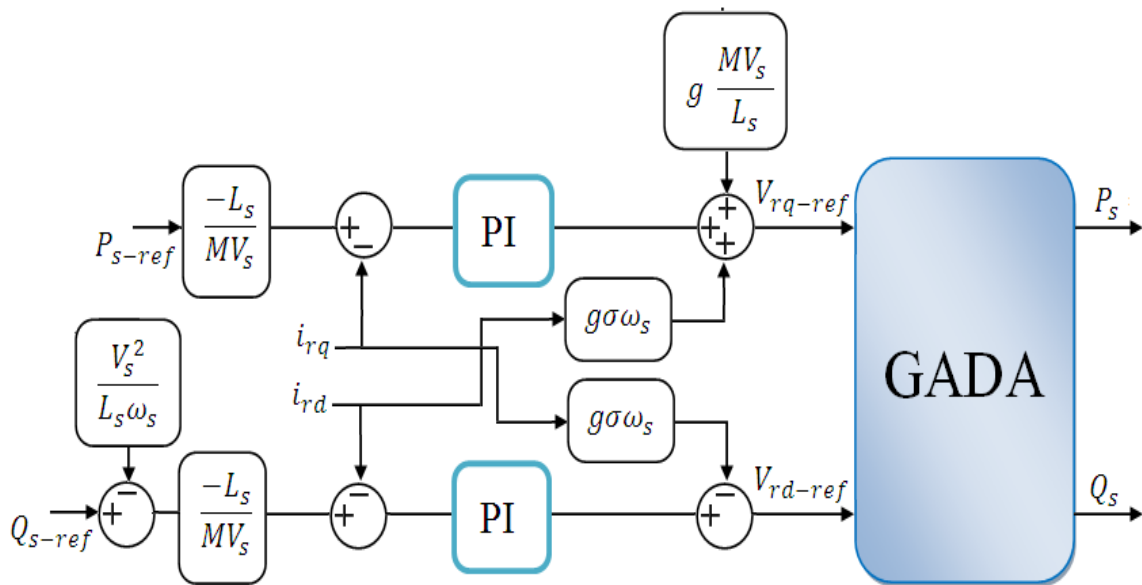


Figure. II.6. Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte.

[Seg 06]-[Men 07]. La tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur [Men 07].

II.4.1. Onduleur à deux niveaux

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits [Ben 13] Figure (II.8).

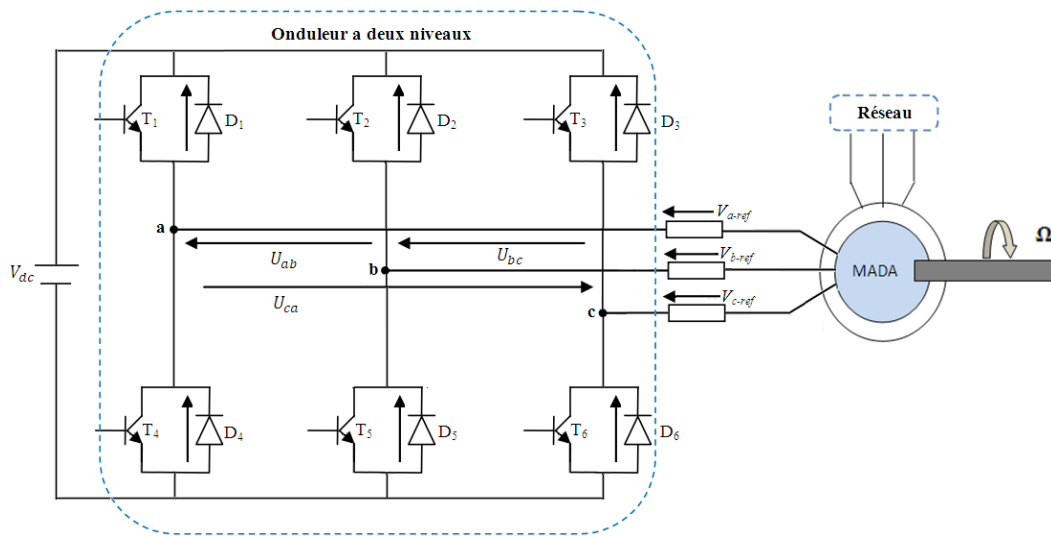


Figure. II.8. Schéma électrique de la liaison de rotor via un onduleur à deux niveaux.

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables S_a, S_b et S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

- Branche a :
 - $S_a=0$ Si T_1 est ouvert et T_4 est fermé.
 - $S_a=1$ Si T_1 est fermé et T_4 est ouvert.
- Branche b :
 - $S_b =0$ Si T_2 est ouvert et T_5 est fermé.
 - $S_b=1$ Si T_2 est fermé et T_5 est ouvert.
- Branche c :
 - $S_c=0$ Si T_3 est ouvert et T_6 est fermé.
 - $S_c=1$ Si T_3 est fermé et T_6 est ouvert.

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = 1/3 (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = 1/3 (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3 (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{a-ref} \\ V_{b-ref} \\ V_{c-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

II.4.2. Stratégie de commande à MLI

La technique de la modulation de largeur d'impulsion triangle sinusoïdale consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire ω_t de fréquence f_p que nous appellerons porteuse, à trois signaux de commande, notés V_a, V_b et V_c , ces signaux V_i ont les images des tensions que l'on souhaite appliquer sur chaque phase. Les commutations des interrupteurs ont lieu quand on a une égalité du type [Ben 12]-[Had 09].

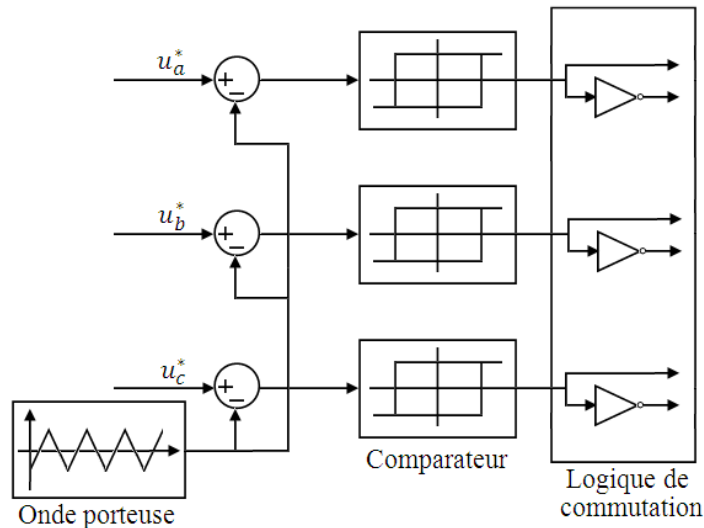


Figure. II.9. Principe de la commande MLI.

$$V_i(t) = \omega(t) \quad (\text{II.11})$$

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \tag{II.12}$$

- Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \tag{II.13}$$

Le choix d'un indice de modulation « m » multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation « r » varie suivant la référence imposée.

II.4.3. Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie sinus-triangle pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes.

Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{ref} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{ref} \leq -U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \tag{II.14}$$

Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \tag{II.15}$$

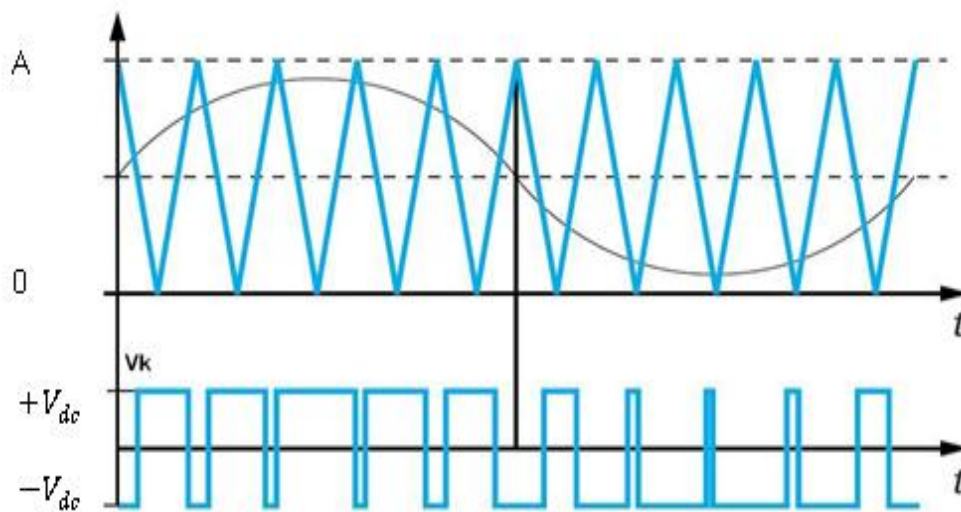


Figure II.10. Schéma de principe de la commande MLI.

II.5. Fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

Comme il est illustré sur la figure II.11, on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement:

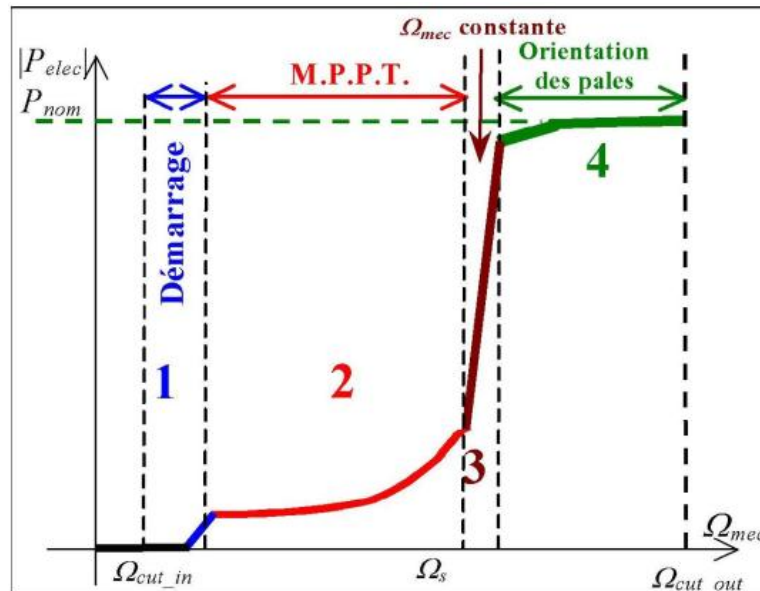


Figure II.11. La puissance électrique en fonction de la vitesse d'une éolienne.

Zone1 : Cette zone concerne la période de démarrage à partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne qui commence à tourner.

Zone2 : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice (correspondant à un glissement de 30%), un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance ;

Zone3 : est destinée à la limitation de la vitesse autour de la vitesse nominale. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90% de sa valeur nominale ;

Zone4 : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le «Pitch Control» [Ela04].

Dans ce qui suit, nous sommes intéresserons à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.

II.6. Maximisation de la puissance extraite

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de MPPT. On distingue deux structures de commande [Dje 15]:

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

II.6.1. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Une perturbation est apparue durant la chaîne de conversion éolienne parce que le vent est une grandeur d'énergie stochastique où les fluctuations créées constituent donc des variations de puissance.

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em_ref} \quad (II.16)$$

La technique d'extraction du maximum de puissance consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

La structure de commande consiste à régler le couple qui apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Le couple électromagnétique de référence C_{em_ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} obtenu par la relation suivante :

$$C_{em} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (II.17)$$

PI : est le régulateur de vitesse.

Ω_{ref} : est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer (Ω_{t_ref}) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G\Omega_{t_ref} \quad (II.18)$$

Selon la figure(I.12) La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{opt} = 9.2$ (à β constant et égal à 2°).

Permettant d'obtenir la valeur maximale du $C_{p-max} = 0.5$. La figure II.16 représente le schéma bloc de cette maximisation.

$$\Omega_{t_ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (II.19)$$

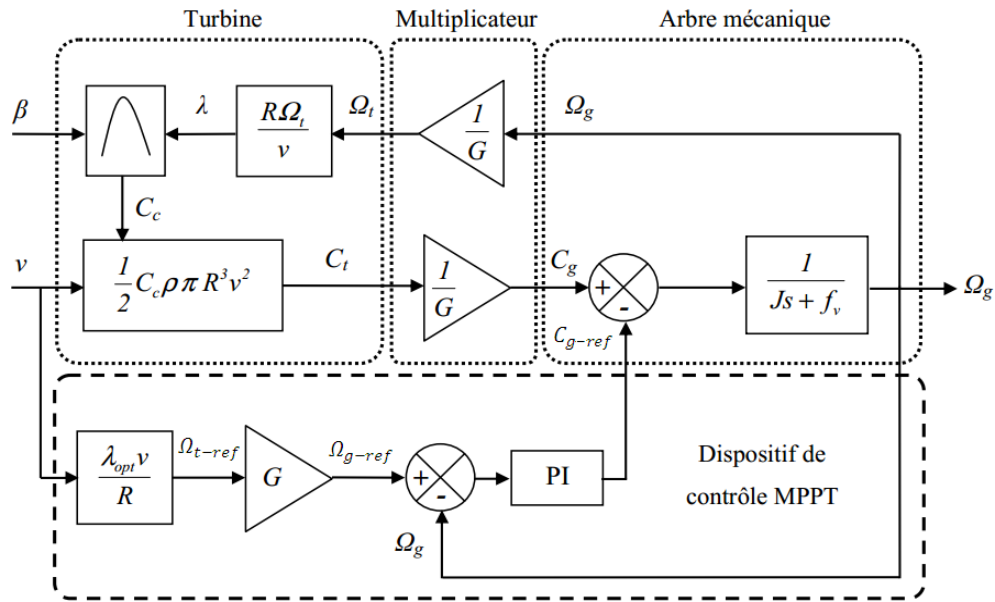


Figure II.12. Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse.

II.6.2. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse.

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique d'écrivant le régime permanent de la turbine [Boy 06]-[Ela 04]:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_f \quad (II.20)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_f = 0$), on obtient :

$$C_g = C_{em} \quad (II.21)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em_ref} = \frac{C_{aer_estim}}{G} \quad (II.22)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine Ω_{t_est} est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{t_est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.23)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue :

$$v_{est} = \frac{\Omega_t - est \cdot R}{\lambda_{opt}} \tag{II.24}$$

En regroupant ces quatre équations

$$C_{em_ref} = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_t^2}{G^3} \tag{II.25}$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur, λ_{optim} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{p-max} Figure (II.15). Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em_ref} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \Omega_t^2$$

La figure II.13 résume le schéma bloc de la stratégie MPPT sans mesure de la vitesse du vent.

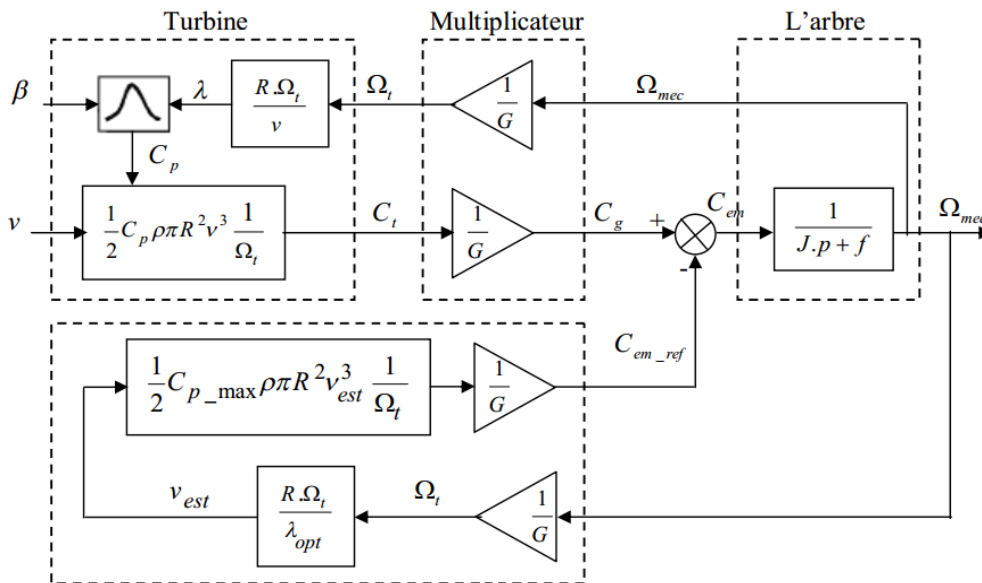


Figure II.13. Schéma bloc de la MPPT sans asservissement de la vitesse.

II.7. Simulation et interprétation des Résultats

Dans cette partie, ont été obtenus les résultats de simulation sous environnement MATLAB/SIMULINK, la commande indirecte avec boucles des puissances où la MADA utilise quatre (04) régulateurs (02 régulateurs de courant et 02 régulateurs de puissance), est alimentée par un convertisseur coté rotor à partir d'une source continue. Sachant que la machine est utilisée à puissance 4Kw. Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur utilisée dans la simulation sont reportés en annexe.

II.7.1. Résultats pour un profil du vent lisse

Le profil du vent appliqué est donné dans la figure ci-dessous. D’après les résultats obtenus pour cette application, on distingue les remarques suivantes :

On note ici que la vitesse mécanique qui entraîne le rotor du GADA est une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme qui est égale à 125 rad/s (1193.7 tr/mn).

Le coefficient de puissance C_p figure II.16 ne changent pas beaucoup des valeurs, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 0.5 successivement.

La puissance active et réactive statorique figure II.17 suit sa référence optimale et possède la même allure que le profil du vent appliqué, cette allure est conforme aussi à celle du couple éolien du coté de la MADA.

La figure (II.18 et II.19) montre que les courants obtenus au stator et au rotor sont des formes sinusoidales, ce qui implique une énergie propre sans harmoniques fournie ou absorbée par le GADA. La figure II.20 montre que Spectre d’harmonique des courants de phase statorique et phase rotorique.

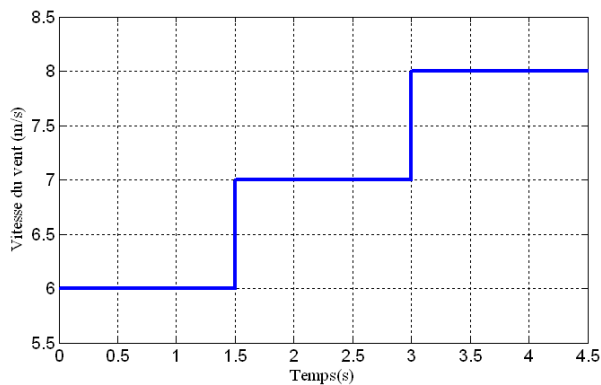


Figure. II.14. Profil du vent appliqué.

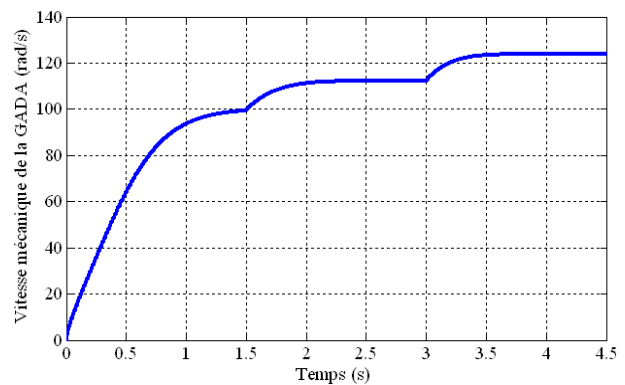


Figure. II.15. Vitesse mécanique.

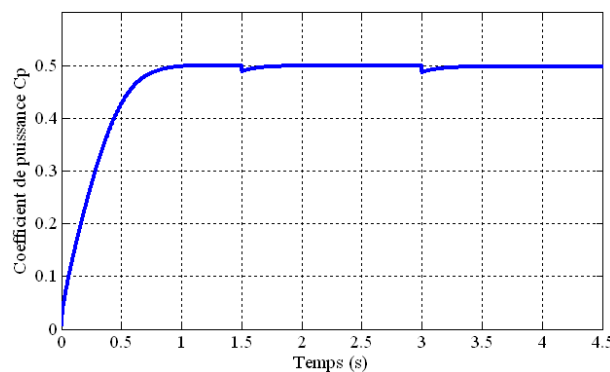


Figure. II.16. Variation de coefficient de puissance.

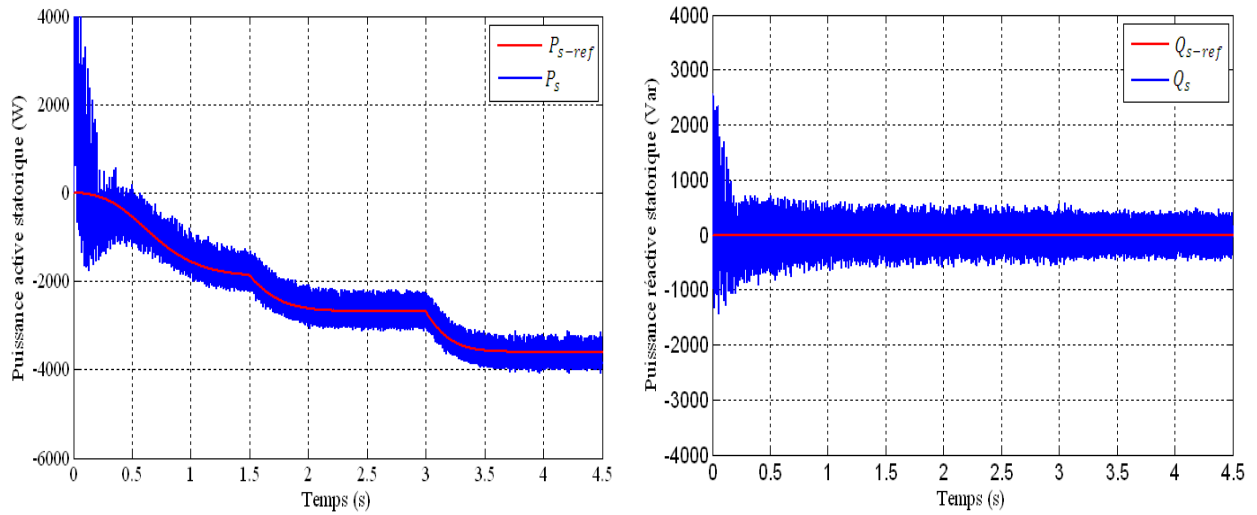


Figure. II.17. La puissance active et réactive statorique.

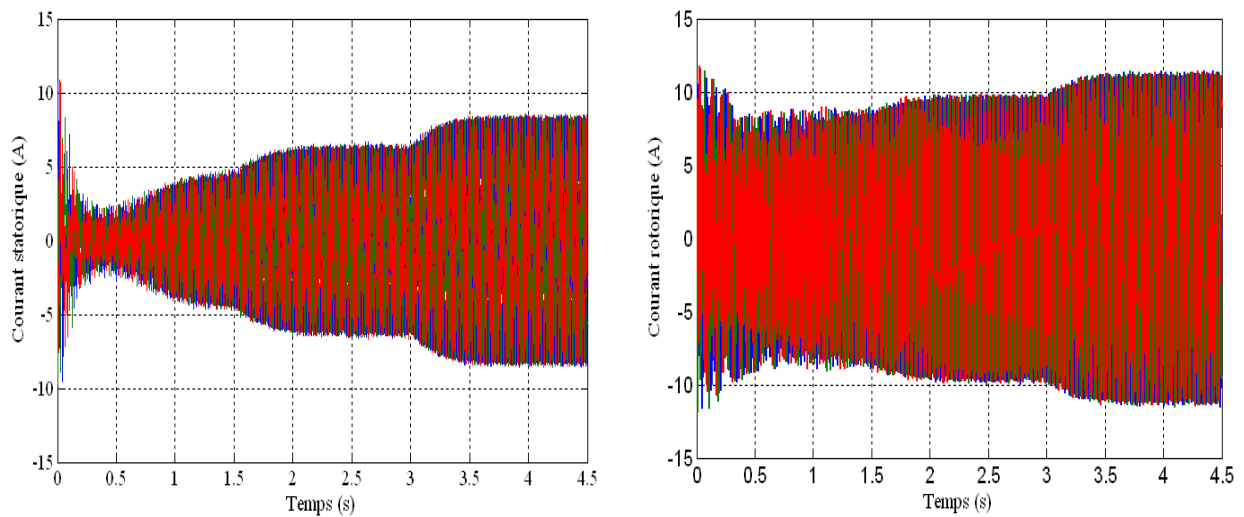


Figure. II.18. Les courants statoriques et rotoriques triphasés.

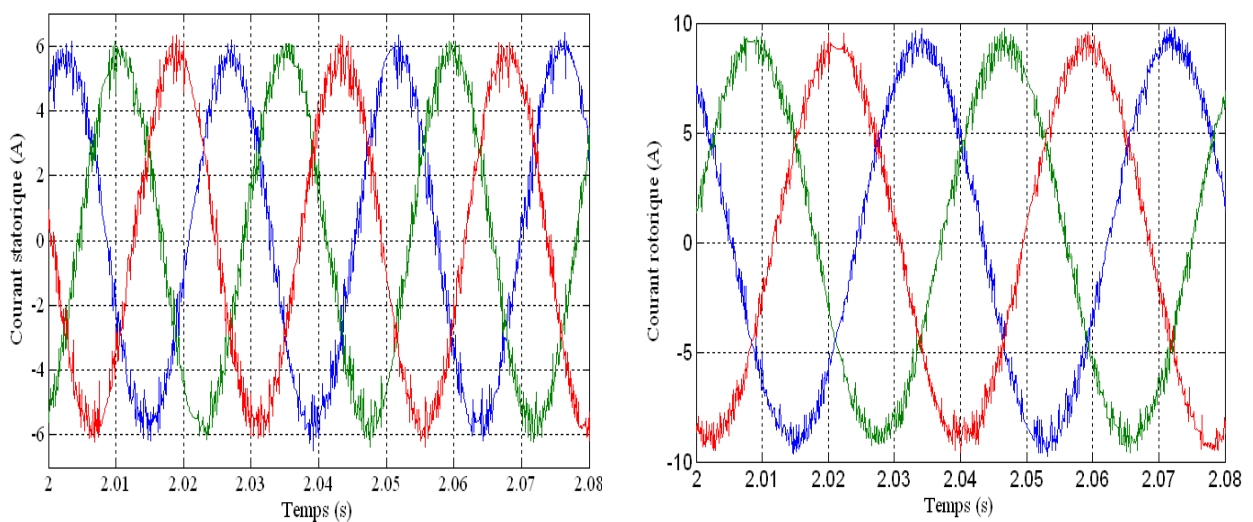


Figure. II.19. Les courants statorique et rotorique avec zoom.

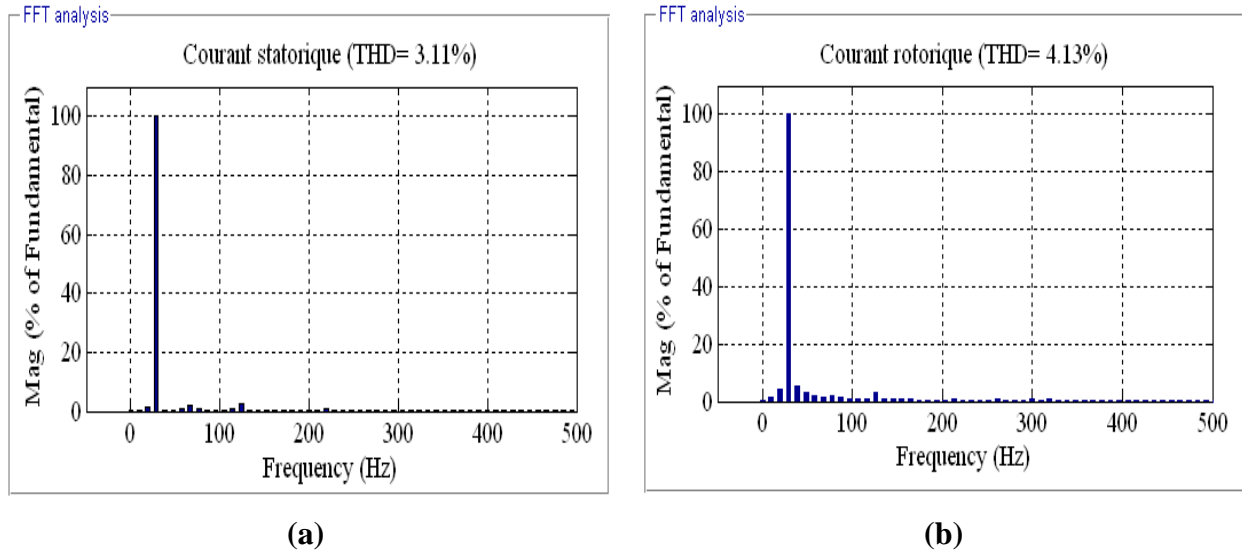


Figure. II.20. Spectre d’harmonique des courants : (a) phase statorique, (b) phase rotorique.

II.7.2 Résultats pour un profil vent Aléatoire

Un essai de simulation a été effectué en utilisant le profil du vent montré sur la figure II.21. La vitesse mécanique illustrée sur la figure II.22. Le modèle du profil du vent utilisé dans notre étude est donné par la relation :

$$V_{vent} = 7 + (0.2 * \sin(0.1047t) + 2 * \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 * \sin(3.6645t))$$

La structure de commande a été simulée en considérant un profil de vent dans la région Adrar-Algérie comme à été illustré dans la figure II.2 autour de ($7m/s$). Nous montrons les résultats obtenus pour la stratégie de commande utilisée. L’angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c’est-à-dire $\beta = 2^\circ$. Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{optim} = 9.2$, ce qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_{p-max} = 0.5$ quelque soit la vitesse du vent.

Les résultats obtenus pour les différents tests de simulation réalisés, pour une turbine éolienne, un multiplicateur et l’arbre de la génératrice, pour extraire le maximum de puissance MPPT avec sans asservissement de la vitesse mécanique par régulateur proportionnel et intégral (PI).

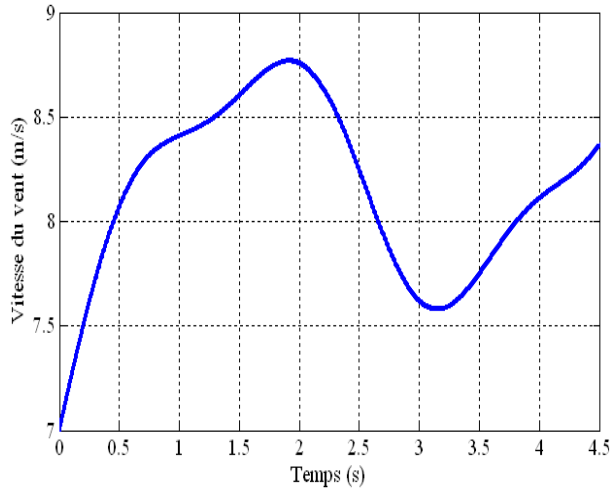


Figure. II.21. Profil du Vent Aléatoire.

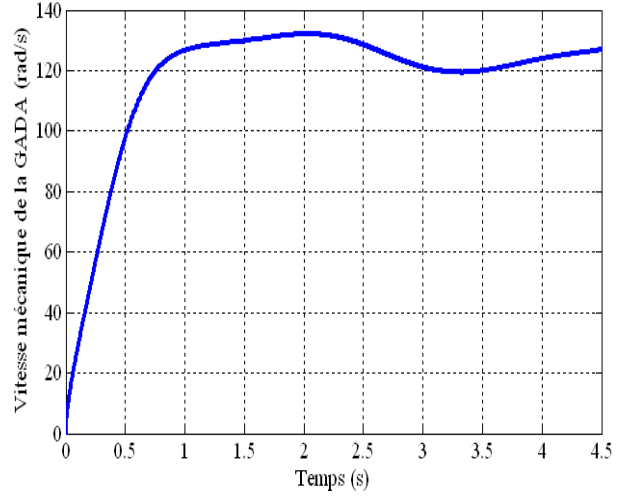


Figure. II.22. Vitesse mécanique.

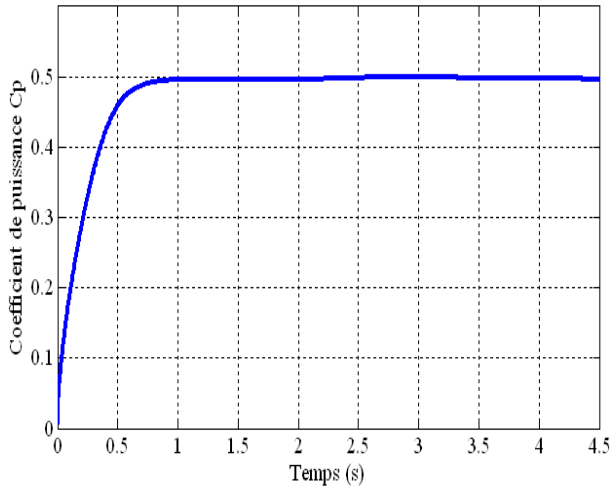


Figure. II.23. Variation de coefficient de puissance.

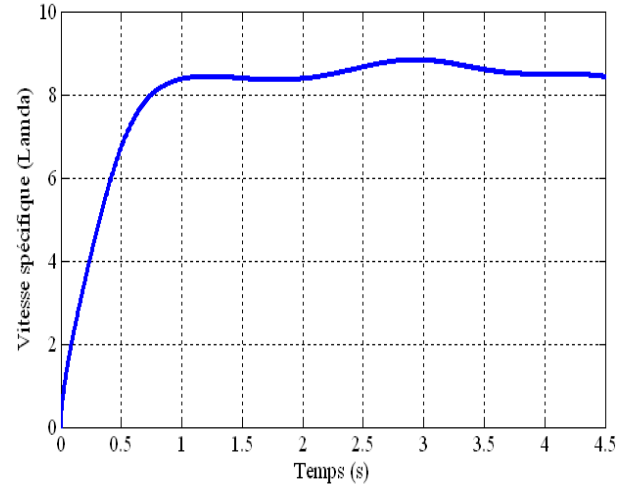


Figure. II.24. Vitesse spécifique.

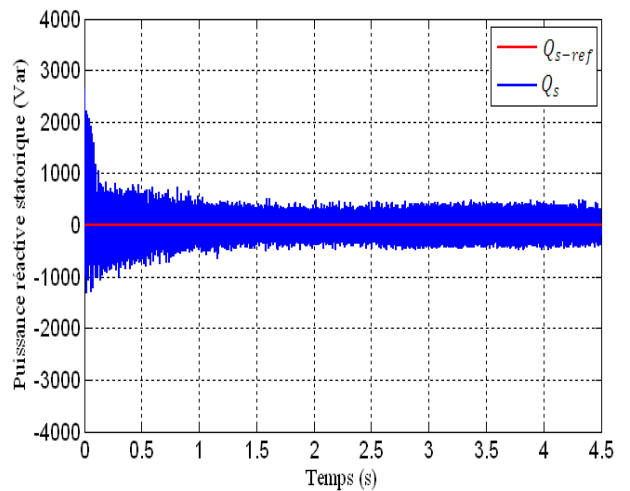
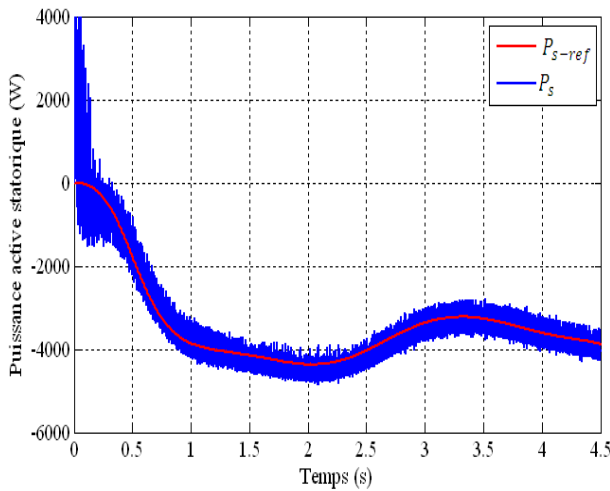


Figure. II.25. La puissance active et réactive statorique.

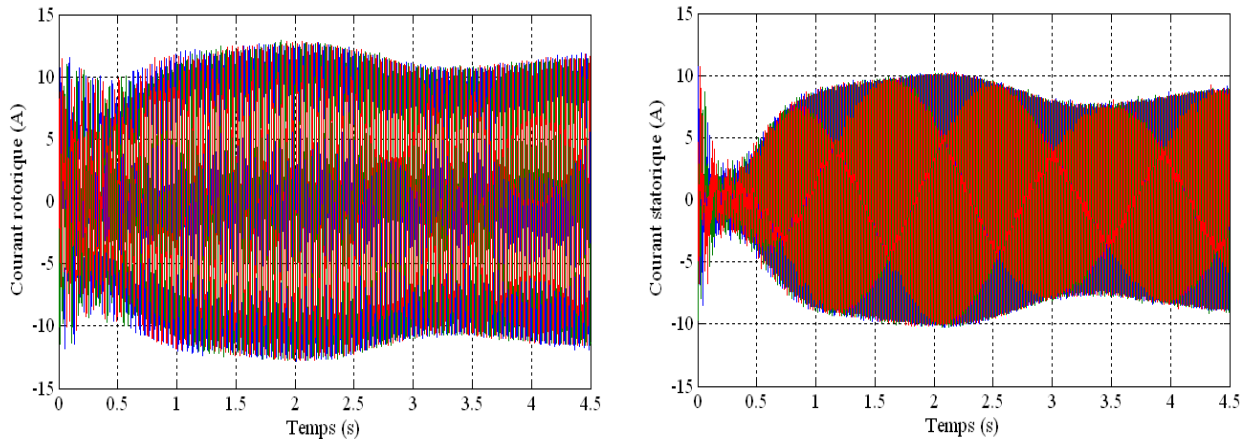


Figure. II.26. Les courants statorique et rotorique triphasés.

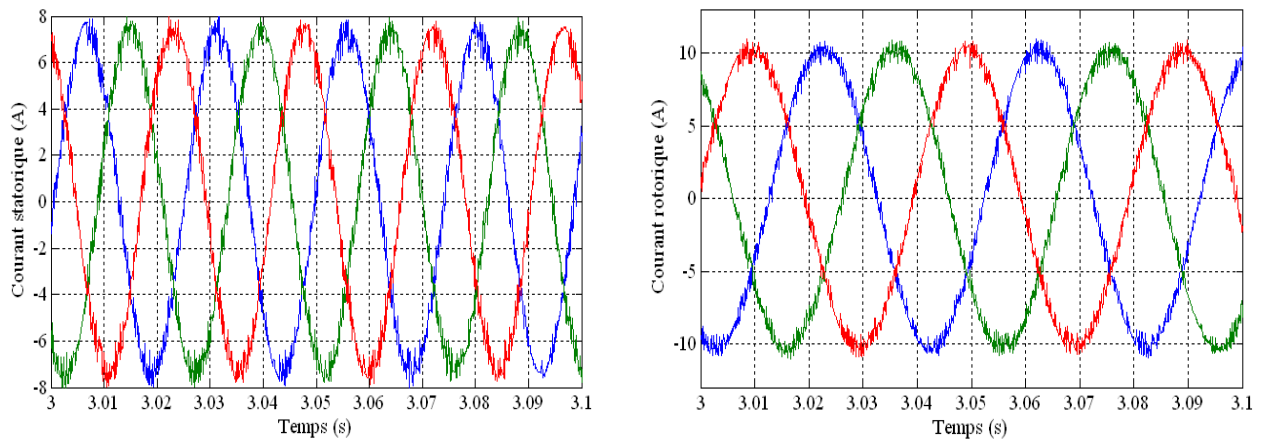


Figure. II.27. Les courants statorique et rotorique avec zoom.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé la modélisation et la commande du système de conversion éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur pour la régulation de la puissance active et réactive statorique.

Ainsi, on a représenté les différentes méthodes de contrôle vectorielle an puissance de la générateur asynchrone à double alimentation GADA à savoir : la commande directe et la commande indirecte. Puis on à donné les résultats de simulation de la commande indirecte avec boucle de puissance étudiée avec le régulateur *PI* ; la synthèse du régulateur *PI* utilisé pour stabiliser le système à cause de sa rapidité et de sa simplicité.

Pour amélioré les performances dynamiques de la GADA nous allons proposer dans le prochain chapitre la commande directe du couple basé sur la commande par mode glissant d'ordre supérieur.

CHAPITRE III

La Commande par DTC basée sur MG d'Order Supérieur

III.1. Introduction

Nous avons étudié dans le chapitre précédent; la commande vectorielle de la chaîne éolienne en utilisant le régulateur classique PI. Ces commandes peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes pour des systèmes non linéaires ayant des paramètres non constants. Pour cela, on doit faire appel à des lois de commande insensibles aux perturbations et aux cas non linéaires.

Ce chapitre présente une stratégie de commande par mode glissant basée sur la commande directe de couple appliqué au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Puis en appliquant cette technique sur le convertisseur coté rotor (CCR) de la MADA afin de contrôler le couple électromagnétique et le flux rotorique de cette dernière indépendamment.

L'objectif est d'appliquer les techniques de commande approchée dite : contrôle direct du couple (DTC) pour obtenir les surfaces de glissement et permet de contrôler le convertisseur coté rotor (CCR) de la MADA. Au premier lieu, nous présentons le principe de la DTC conventionnelle présentée par I. Takahashi pour contrôler indépendamment de flux rotorique et couple électromagnétique. Puis l'introduction de la notion de modes glissants d'ordre supérieur, nous nous intéresserons à un algorithme qui fait partie des commandes par modes glissants d'ordre supérieur appelé "Super-Twisting".

III.2. Généralité sur la commande directe du couple DTC "Classique"

Depuis plus vingtaine années, Takahashi [Tak 86]- [Tak 89] et Depenbrock [Dep 88] ont proposé la commande directe du couple et du flux DTC [Rez 15] par remplacer le découplage à travers la transformation vectorielle par un contrôle non linéaire tel que les états de commutation de l'onduleur soient imposés à travers un pilotage séparé du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine. La commande de l'onduleur est instantanée, ce qui nécessite une période d'échantillonnage très faible. La séquence de commande des interrupteurs est directement issue des régulateurs de flux et de couple qui sont généralement des régulateurs à hystérésis [Ham 13].

III.2.1. Principe de la commande DTC

La commande directe du couple est basée sur la régulation directe du couple par l'application des différents vecteurs de tensions de l'onduleur. Les variables contrôlés sont le flux rotorique et le couple électromagnétique qui sont commandés par des régulateurs à hystérésis.

Le convertisseur de puissance utilisé dans le côté rotor de la machine « CCM » est un onduleur de tension classique à deux niveaux, La sortie des régulateurs hystérésis détermine le vecteur optimal de tension de l'onduleur à appliquer à chaque instant de commutation [Naa 05].

III.2.2. Caractéristiques générales de la DTC "Classique"

En utilisant le stratège de DTC classique pour contrôler le couple électromagnétique et le flux rotorique de cette dernière indépendamment, la commande de la DTC est basée sur l'estimation du couple et du flux de la machine. Les caractéristiques générales d'une commande directe du couple sont: [Djer 15]-[Chi 13]-[Idj 10]-[Ham 13]-[Elb 06].

- ✓ La commande directe du couple et du flux, est basée sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- ✓ L'obtention des flux et des courants rotoriques proches de formes sinusoïdales.
- ✓ La commande indirecte des intensités et tensions de la machine.
- ✓ Une réponse dynamique de la machine très rapide. - L'existence des oscillations du couple qui dépend, entre autres, des facteurs de la largeur des bandes des régulateurs à hystérésis.
- ✓ le flux rotorique et le couple électromagnétique est les variables de contrôle de la DTC.
- ✓ La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes à hystérésis.
- ✓ La commande par DTC basée sur les regulator hystérésis et table de commutation.
- ✓ La réponse dynamique du couple de la machine est très rapide.
- ✓ L'existence des oscillations du couple qui dépend de la largeur des bandes des comparateurs à hystérésis.
- ✓ La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes d'hystérésis

III.3. Structure du système de contrôle directe de couple à la GADA

Le principe générale de la DTC est; la régulation directe de couple et du flux rotorique basée sur des erreurs entre les valeurs des références et celles estimées du couples et du flux, par l'application des différents vecteurs de tension de l'onduleur [Chi 13]. Le flux rotorique et le couple électromagnétique sont commandés par des régulateurs à hystérésis [Chi 13]-[Ham 13]. La structure de la DTC est comme :

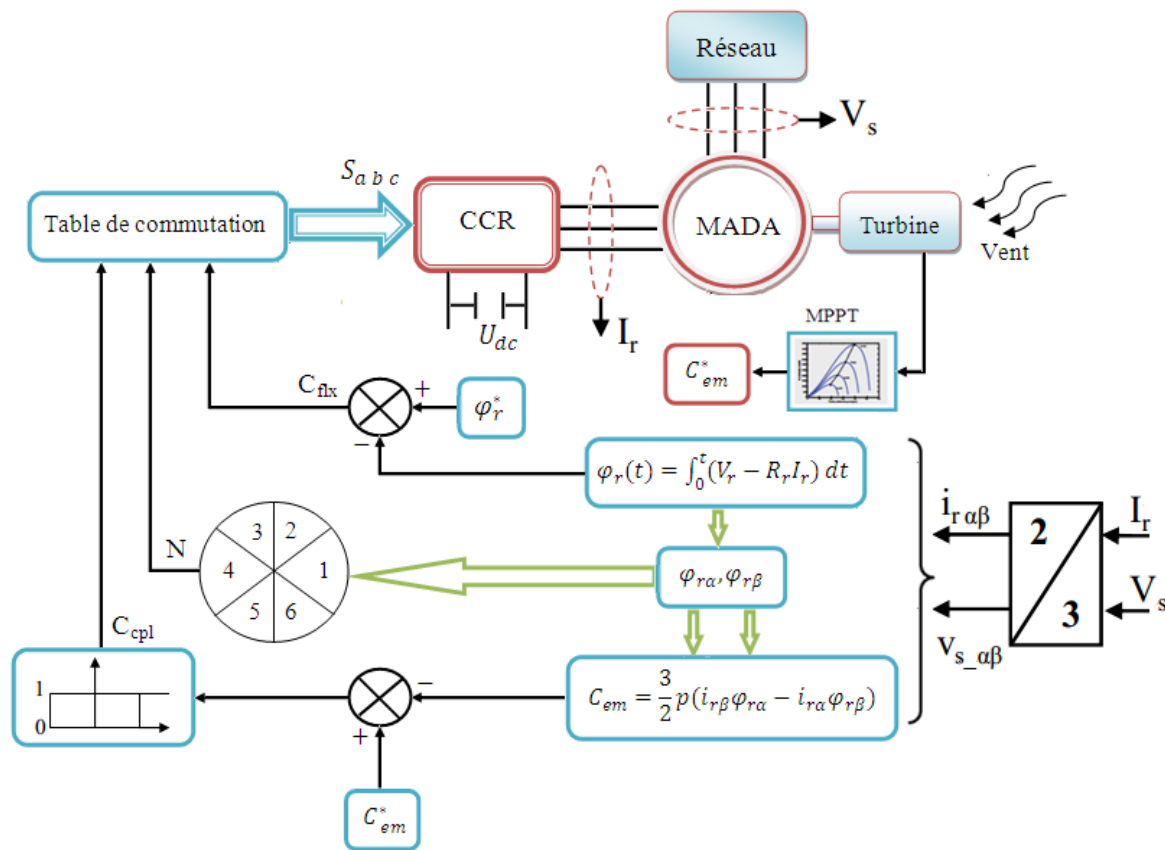


Figure. III.1. Structure générale de la "DTC classique" à la MADA.

III.3.1. Elaboration du correcteur du flux

Le but d'utiliser un correcteur de flux est de maintenir l'extrémité du vecteur flux (φ_r) dans une couronne circulaire comme le montre la figure III.2.

On utilise, un correcteur à hystérésis à deux niveaux qui convient parfaitement et permet, en plus, d'obtenir de très bonnes performances dynamiques. Pour contrôler le flux, les instants de commutation sont déterminés par une comparaison entre la valeur estimée du flux rotorique à sa valeur désirée [Tou 08]-[Idj 10].

La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module du flux. Les deux seuils du comparateur sont choisis suivant l'ondulation tolérée par le flux rotorique. L'un est influencé par l'erreur $\Delta\varphi = \varphi_r^* - \varphi_r$ pour le flux rotorique.

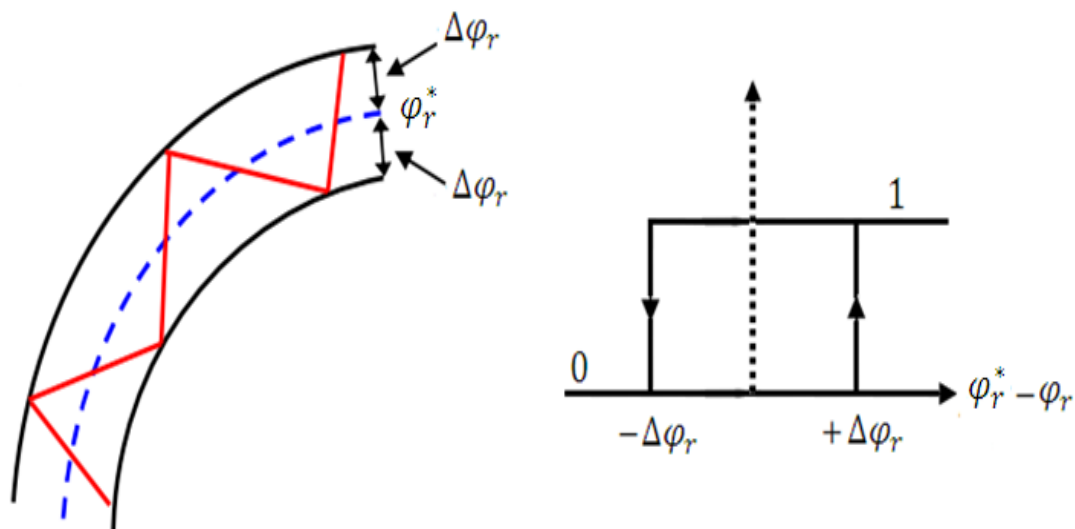


Figure. III.2. Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le flux rotorique.

Les largeurs de la bande d'hystérésis ont une influence sur la performance du redresseur en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation. Le régulateur à hystérésis à deux niveaux pour le flux rotorique peut être décrit comme suit :

$$\Delta\varphi_r > H_{\varphi_r} \Rightarrow 1$$

$$-H_{\varphi_r} \leq \Delta\varphi_r \leq H_{\varphi_r} \text{ et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} > 0 \Rightarrow d_{\varphi_r} = 0$$

$$-H_{\varphi_r} \leq \Delta\varphi_r \leq H_{\varphi_r} \text{ et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} < 0 \Rightarrow d_{\varphi_r} = 1$$

$$\Delta\varphi_r < -H_{\varphi_r} \Rightarrow d_{\varphi_r} = 0$$

III.3.2. Elaboration du correcteur du couple électromagnétique

Le même principe pour un régulateur hystérésis du flux. Le schéma du principe de la figure III.3 donne un régulateur à hystérésis à deux niveaux pour réaliser le réglage du couple. Où le couple comparé la valeur estimée par la valeur de référence. Et d'autre part conduire le couple vers leurs valeurs de référence de façon optimale avec une réponse rapide de couple [Tou 08]. L'influencé par l'erreur $\Delta C_{em} = C_{em}^* - C_{em}$ pour le couple électromagnétique.

Contrairement au flux, le couple électromagnétique peut être positif ou négatif. Deux solutions peuvent alors être envisagées :

- Un correcteur à hystérésis à deux niveaux.
- Un correcteur à hystérésis à trois niveaux.

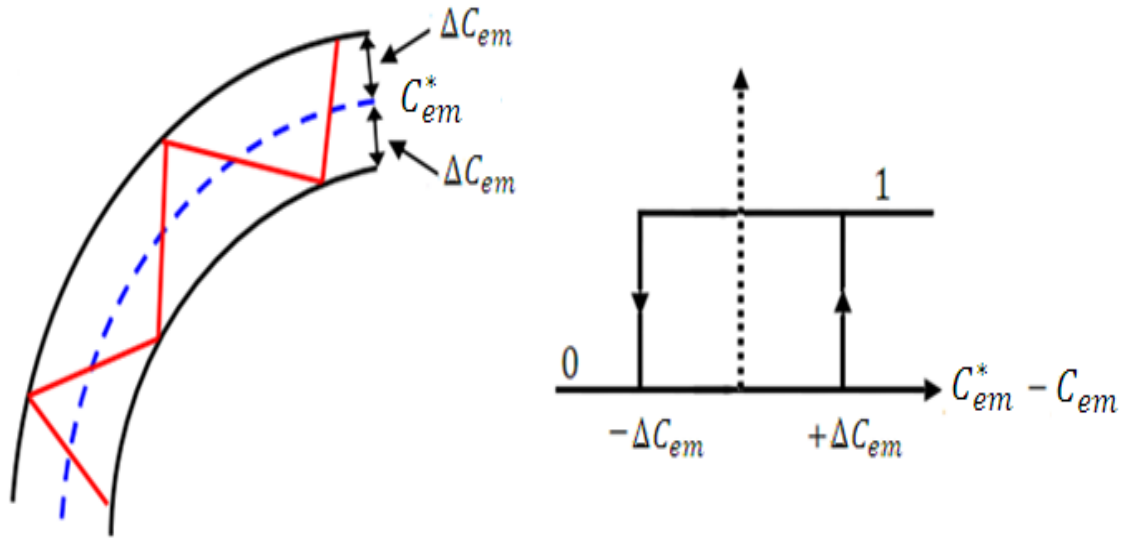


Figure. III.3. Contrôle du couple à l'aide d'un comparateur à hystérésis à deux niveaux.

Le régulateur à hystérésis à deux niveaux du couple électromagnétique peut être décrit comme suit :

$$\Delta C_{em} > H_{C_{em}} \Rightarrow 1$$

$$-H_{C_{em}} \leq \Delta C_{em} \leq H_{C_{em}} \text{ et } \frac{d\Delta C_{em}}{dt} > 0 \Rightarrow d_{C_{em}} = 0$$

$$-H_{C_{em}} \leq \Delta C_{em} \leq H_{T_{em}} \text{ et } \frac{d\Delta C_{em}}{dt} < 0 \Rightarrow d_{C_{em}} = 1$$

$$\Delta C_{em} < -H_{C_{em}} \Rightarrow d_{C_{em}} = 0$$

Une fois les valeurs de $\Delta\varphi_r$ et ΔC_{em} sont obtenues et sachant le secteur où se trouve le vecteur de la tension, alors le choix du mode de commutation optimal est donné par le tableau de commutation (III.1):

III.3.3. Elaboration de la table de commutation

Le principe de la DTC est sélectionné par les vecteurs de tension appropriés, basé sur le régulateur hystérésis peuvent être sélectionnés pour une combinaison donnée du flux et du couple [Bak 14]-[Idj 10], et le choix du vecteur de tension à appliquer dépend du signe de l'erreur entre les valeurs de référence et sa valeur estimée.

La table de commutation de la structure de contrôle a été développée en utilisant une technique relativement simple. Elle consiste à sélectionner le vecteur tension approprié à chaque instant d'échantillonnage en fonction de l'état des comparateurs de flux rotorique le couple, le secteur où se trouve le vecteur flux rotorique φ_r dans le plan (α, β) , et selon la position δ du vecteurs de flux rotorique [Dje 15]-[Ben 13]. Afin de pouvoir maintenir le module du flux rotorique et le couple électromagnétique à l'intérieur des bandes de tolérance définies que peut

être contrôlé, on utilise la table logique de commutation optimale. Le partage du plan complexe en six secteurs angulaires peut être déterminé, pour chaque secteur donné [Dje 15]-[Idj 10].

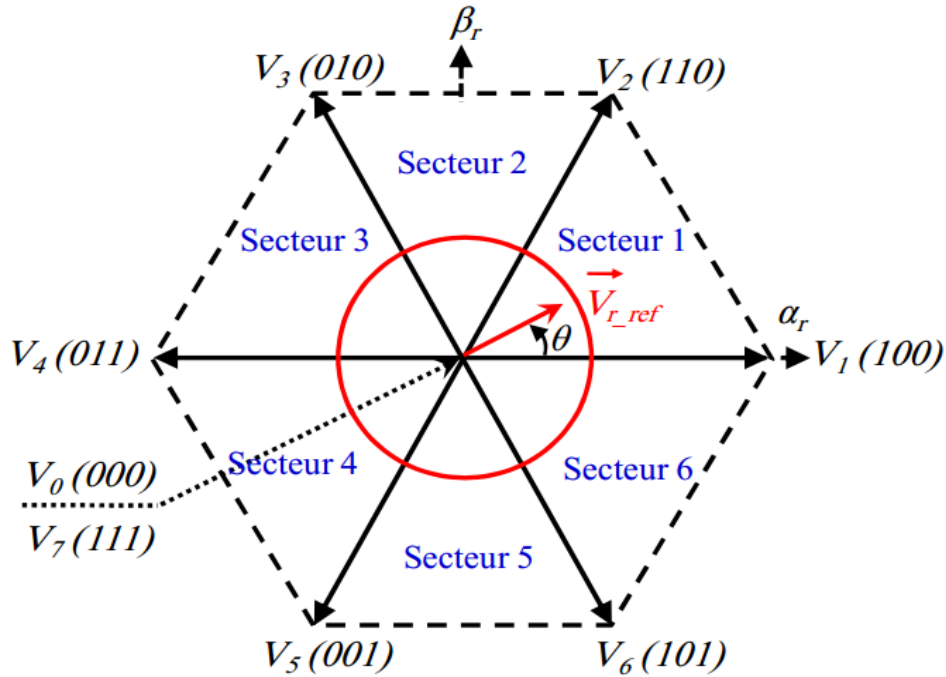


Figure. III.4. Représentation des vecteurs de tension.

L'objectif est le choix de l'état de l'onduleur est effectué dans une table de commutation construite en fonction de l'état des variables (φ_r) et (C_{em}) et de la zone de la position de flux rotorique. En sélectionnant le vecteur de tension à chaque période d'échantillonnage a pour but maintenir le flux et le couple dans les limites des deux bandes à hystérésis [Ham 13]-[Chi 13]. La table de commutation définie par I. TAKAHASHI [Tak 89]-[Ham 13] et donnée par le tableau suivant:

N		1	2	3	4	5	6	Comparateur
$C_{flx}=1$	$C_{cpl}=1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	} 2 niveaux } } 3 niveaux
	$C_{cpl}=0$	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	
	$C_{cpl}=-1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	
$C_{flx}=0$	$C_{cpl}=1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	} 2 niveaux } } 3 niveaux
	$C_{cpl}=0$	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	
	$C_{cpl}=-1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	

Tableau. III.1. Table de commutation de la commande directe du couple.

En sélectionnant l'un des vecteurs nuls, la rotation du flux statorique est arrêté et entraîne ainsi une décroissance du couple. Nous choisissons V_0 ou V_7 de manière à minimiser le nombre de commutation d'un même interrupteur de l'onduleur [Llo 04].

III.3.4. Estimation du flux rotorique

L'estimateur du flux est réalisé à partir des mesures des grandeurs rotoriques (courants et tensions) de la machine, l'expression du flux rotorique dans le référentiel lié au rotor de la machine est obtenue par l'équation suivante:

$$\varphi_r(t) = \int_0^t (V_r - R_r I_r) dt \tag{III.1}$$

On obtient les composants α, β du vecteur φ_r

$$\varphi_r = \varphi_{r\alpha} + j\varphi_{r\beta} \tag{III.2}$$

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = \int_0^t (V_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha}) dt \\ \varphi_{r\beta} = \int_0^t (V_{r\beta} - R_r i_{r\beta}) dt \end{cases} \tag{III.3}$$

Estimer $\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$ cela nécessite la connaissance les composantes des vecteurs courants et tension rotorique ($i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ et $V_{r\alpha}, V_{r\beta}$).

Par l'application de transformation de Concordia, on obtient les composants (α, β) des vecteurs de courant aux des composantes triphasées mesurées i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} (Voir annex) suivante :

$$\begin{cases} i_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{ra} \\ i_{r\beta} = \left[\frac{1}{\sqrt{2}} (i_{rb} - i_{rc}) \right] \end{cases} \tag{III.4}$$

Les composants des vecteur de tension rotorique sont obtenues à partir les états des interrupteurs.

$$\begin{cases} v_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{DC} \left(S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ v_{r\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \end{cases} \tag{III.5}$$

En utilisant l'équation (III.3) pour l'estimation de flux rotorique

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = \sigma L_r i_{r\alpha} + \frac{M}{L_s} \varphi_s \\ \varphi_{r\beta} = \sigma L_r i_{r\beta} + U_{DC} \end{cases} \tag{III.6}$$

On écrire le module de flux rotorique et sa phase à partir de l'équation (III.6) comme suit:

$$\begin{cases} \varphi_r = \sqrt{\varphi_{r\alpha}^2 + \varphi_{r\beta}^2} \\ \theta_r = \arctg \frac{\varphi_{r\beta}}{\varphi_{r\alpha}} \end{cases} \tag{III.7}$$

III.3.5. Estimation du couple électromagnétique

On peut estimer le couple électromagnétique uniquement en fonction des grandeurs rotoriques (flux et courant) à partir de leurs composantes (α , β) le couple peut se mettre sous la forme :

$$C_{em} = p(i_{r\beta} \varphi_{r\alpha} - i_{r\alpha} \varphi_{r\beta}) \quad (III.8)$$

III.4. Généralités sur la commande par mode glissant

La théorie du mode glissant est le prolongement de l'étude des systèmes à structure variable. Les premiers travaux concernant ces systèmes de commande ont été proposés et élaborés au début des années 50 par Emelyanov, puis par d'autres chercheurs comme Utkin à partir des résultats des études du mathématicien Filipov [Ben 13]- [Ard 16].

La commande par mode glissant est l'une des techniques de commande non linéaire à structure variable pouvant changer de structure et commutant entre deux valeurs suivant une logique de commutation bien spécifique $s(x)$ [Sch 99]. Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci [Seg 06]- [Tal 16].

Les objectifs principaux de cette technique de commande sont [Tal 16]:

- Synthétiser une surface de glissement de telle manière à ce que toutes les trajectoires d'état du système obéissent à un comportement désiré en terme de poursuite, de régulation et de stabilité ;
- Déterminer une loi de commande ou de commutation, qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface ;
- Réduire le phénomène de chattering (broutement), dû à la discrétisation des fonctions de commutation.

III.4.1. Principe du contrôleur à mode glissant

La commande par mode glissant est une classe de la commande à structure variable, elle est efficace et robuste pour les systèmes linéaires et non linéaires vis-à-vis des variations paramétriques. La tâche principale de la commande par mode glissant, est de fournir une surface de commutation, selon des lois d'existence, de convergence et de stabilité. La surface de commutation peut être atteinte par la trajectoire d'état grâce aux changements appropriés de la structure du système commandé [Hus 09]-[Rez 15].

Un système à structure variable est un système dont la structure change durant son fonctionnement. La commande de tels systèmes par mode de glissement a en général deux modes de fonctionnement [Utk 99]:

- Le mode non glissant (reaching mode) ou mode d'accès, ou encore mode de convergence (MC).
- Le mode glissant (sliding mode).

Ainsi, la trajectoire de phase, partant d'une condition initiale quelconque, atteint la surface de commutation en un temps fini, (mode non glissant), puis tend asymptotiquement vers le point d'équilibre avec une dynamique définie par le mode glissant.

III.4.2. Synthèse de la commande par mode glissant

Dans la commande à structure variable, la réponse d'un tel système passe en général par trois phases ou modes appelés, mode d'atteinte (Reaching Mode, RM), mode de glissement (Sliding Mode, SM), et le mode du régime permanent (steady-state mode, SS) [Gao 95], ces modes sont illustrés dans le plan de phase sur la figure III.5.

La synthèse de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche. En général, pour réaliser ce type de commande trois étapes doivent être effectuées [Bou 07]- [Sid 11] :

- Choix de la surface de glissement.
- Détermination des conditions d'existence du régime glissant ou conditions d'accès.
- Synthèse des lois de commande du mode glissant.

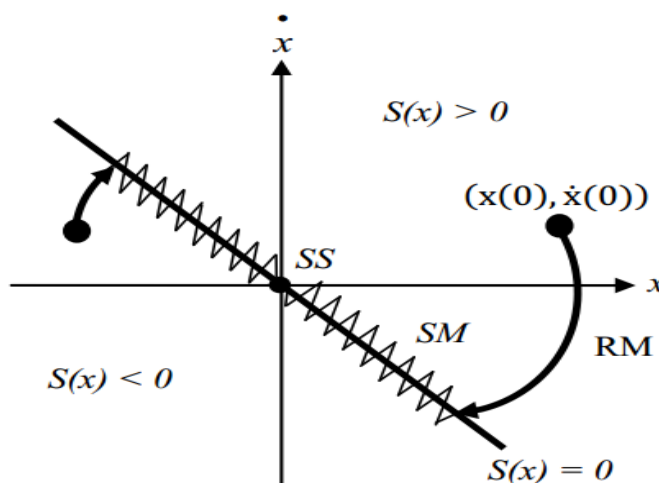


Figure. III.5. Trajectoire du système sur le plan de phase.

III.4.2.1. Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface utilisée pour la commande par mode de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et de l'objectif visé expression linéaire ou non linéaire à paramètres constants ou variables dont les composantes sont représentées par des relations algébriques entre les variables d'état du système [Lou 16]-[Utk 93]-[Kou 02].

Le premier objectif d'un contrôleur à mode glissant est de diriger les états du système contrôlé vers une surface $S(x)$ prédéfinie et de les maintenir sur cette surface. Considérons le système non linéaire défini par les équations suivantes [Slo 91] :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot U(t) \\ y(t) = C \cdot x(t) \end{cases} \tag{III.9}$$

Où :

$X(t)$ est le vecteur d'état.

$u(t)$ est le vecteur de commande et $y(t)$ est la sortie.

Et d'autre par :

$$\dot{X} = f(X, t) + g(X, t)U(X, t) \tag{III.10}$$

$$X \in R^n, u \in R$$

Où :

$f(X,t)$, $g(X,t)$ sont fonctions non linéaires continues et incertaines supposées bornées.

On prend la forme d'équation générale proposée par J.J.Slotine [Slo 91] pour déterminer la surface de glissement :

$$S(X) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e \tag{III.11}$$

$$e = X^d - X$$

Avec :

$$X = [X, \dot{X}, \dots, X^{n-1}]^T, X^d = [X^d, \dot{X}^d, \ddot{X}^d, \dots]^T$$

e : erreur sur la grandeur à régler.

λ : coefficient positif.

n : ordre du système.

X^d : grandeur désirée.

X : variable d'état de la grandeur commandée.

III.4.2.2. Conditions de convergence et d'existence

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. On présente deux types de conditions qui sont :

III.4.2.2.1. Approche directe

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par Emilyanov [Emi 63] et Utkin [Tsi 89]. Elle est donnée sous la forme :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.12})$$

Dans cette condition, il faut introduire pour $S(X)$ et sa dérivée, les valeurs justes à gauche et à droite de commutation.

III.4.2.2.2. Approche de Lyapunov

Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov $V(x) > 0$ (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$ [Bor 15]- [Ben 92].

En définissant par exemple une fonction candidate de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{III.13})$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (\text{III.14})$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. D'où la condition de convergence exprimée par

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.15})$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires [Tak 89].

III.4.2.3. Synthèse des lois de commande du mode glissant

Dans la théorie des commandes à structure variables, il y a plusieurs manières de choisir les paramètres pour définir une logique de commutation. La commande équivalente est augmentée par un terme appelé action de la commande discontinue. La partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par

mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (u_{eq}) et l'autre stabilisante (u_n) pour satisfaire les conditions d'atteinte de la surface $S(x)$. Dans ces conditions la commande est écrite comme suit :

$$U = u_{eq} + u_n \tag{III.16}$$

Telle que u_{eq} est la commande équivalente définie par Utkin. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement (propriété d'invariance). La commande équivalente est exprimée, en considérant que la dérivée de la surface est nulle c'est-à-dire $\dot{S}(x) = 0$ [Bel 10]-[Kar 10].

La dérivée de la surface de glissement est donnée par :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dS}{dx} (Ax(t) + BU(t)) \tag{III.17}$$

En substituant l'expression de U dans l'équation (III.8), on obtient :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dx} [Ax(t) + Bu_{eq}(t)] + \frac{dS}{dx} Bu_n \tag{III.18}$$

Lorsque le mode glissant est atteint et en régime permanent, la surface de glissement est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'ou, on déduit l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq} = - \left[\frac{ds}{dx} B \right]^{-1} \left[\frac{ds}{dx} Ax(t) \right] \tag{III.19}$$

Pour assurer l'attractivité de la surface de glissement, il suffit d'ajouter le terme u_n à la loi de commande, de telle sorte que :

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

C'est-à-dire

$$S(x). \frac{ds}{dx} Bu_n < 0$$

Pour que cette condition soit vérifiée, il suffit que le signe de u_n soit opposé à celui de $S(x) \frac{ds}{dx} B$. La commande un est donnée par la forme de base qui est celle d'un relais représenté par la fonction « signe » abrégée « *sign* »

$$u_n = K. sign(S(x)) \tag{III.20}$$

La figure suivante représente la fonction de la commande discrète de type relais :

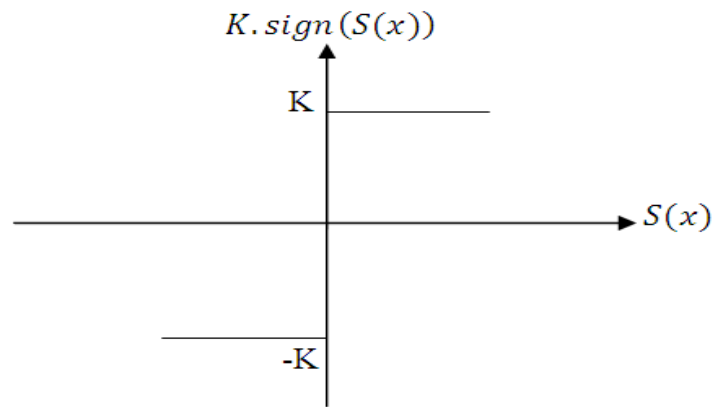


Figure. III.6. Fonction sign (Commande de type relais).

III.4.3. Phénomène de réticence

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner un phénomène de broutement, appelé réticence ou en anglais "chattering". Ce dernier apparaît comme une oscillation trop fréquentes autour de la surface de glissement Figure III.7, à cause de la nature très discontinue de la fonction signe et aux performances du système. Ce phénomène de « chattering » ou broutement est un sérieux obstacle pour les applications de commande par mode de glissement. Ce phénomène est presque toujours problématique et des efforts de recherche significatifs ont été dirigés de sorte à éliminer ou du moins réduire ses effets [Rou 16]-[Edj 16]-[You 99].

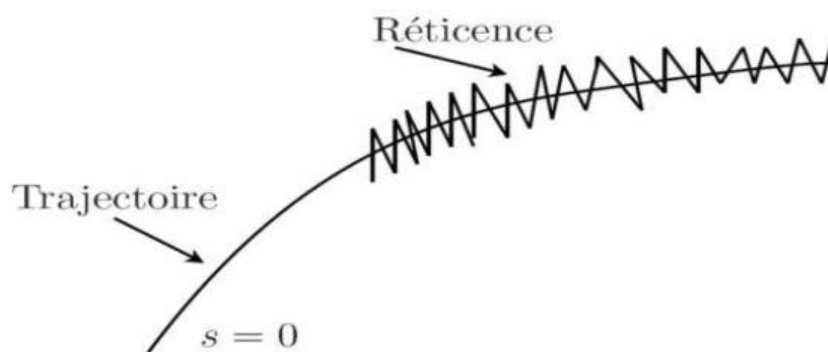


Figure. III.7. Le phénomène de broutement.

III.4.4. Solutions pour atténuer le phénomène de réticence

Dans le but de réduire ces oscillations, plusieurs solutions ont été apportées comme par exemple : remplacer la fonction "sign" par une fonction de saturation caractérisée par un ou deux seuils (atténuation des amplitudes des ondulations), la solution de couche limite, fuzzy sliding mode, mode glissant d'ordre supérieur.

- ✓ La technique des modes glissants d'ordre supérieur permet de passer outre ce phénomène indésirable et aussi de pallier la condition sur le degré relatif, rencontrée par la CMG d'ordre un.
- ✓ Pour remédier à ce problème envisagé consiste à introduire une bande d'arrêt autour de la surface de commutation. Pour ce faire, il suffit de substituer une fonction de saturation figure III.8 à la fonction signe dont les discontinuités au voisinage de zéro sont moins brutales. La fonction la plus couramment utilisée dans la littérature est la fonction saturation « sat » [Slo 91]-[Zeg 14]-[Bou 15]. Ces deux fonctions sont respectivement définies par figure(III.9) :

$$S(x) = \begin{cases} K & \text{si } s(x) > \varepsilon \\ -K & \text{si } s(x) < -\varepsilon \\ \frac{Ks(x)}{\varepsilon} & \text{si } |s(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad \text{(III.21)}$$

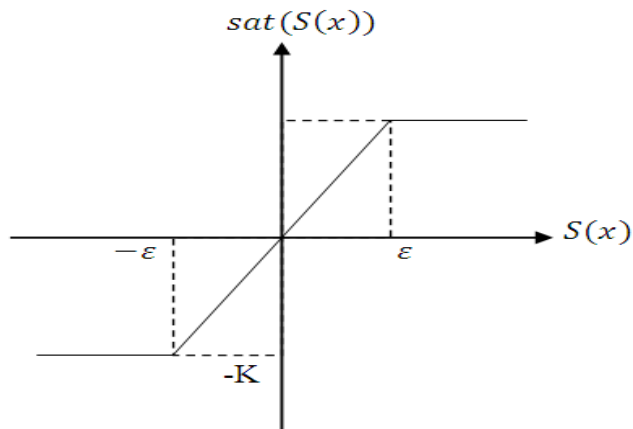


Figure. III.8. Fonction de saturation (Commande adoucie).

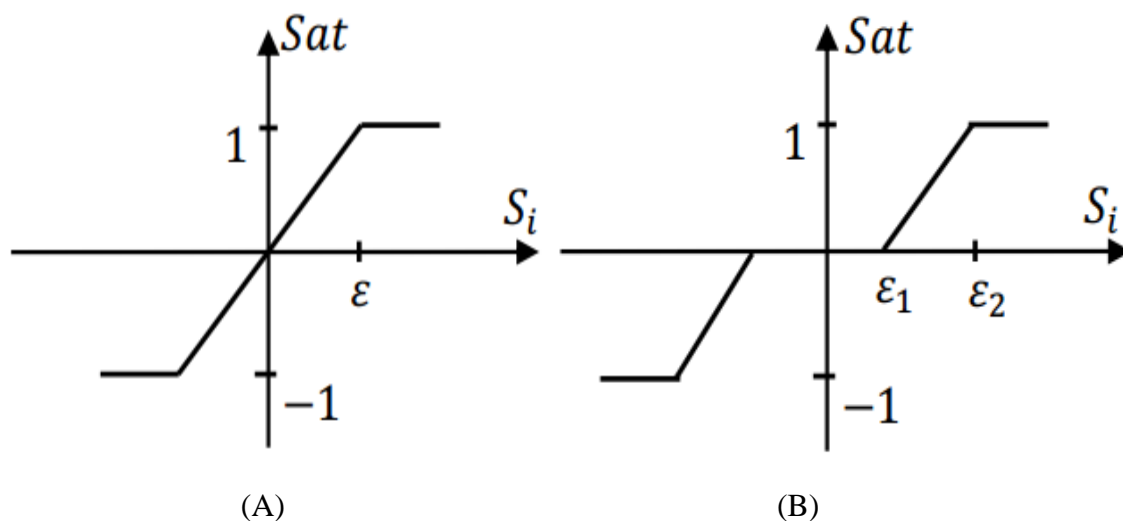


Figure. III.9. Fonction de saturation « Sat » : (A) un seuil ; (B) deux seuils.

Ces deux fonctions sont respectivement définies par :

$$sat(s) = \begin{cases} -1 & si \quad s < -\varepsilon \\ \frac{s}{\varepsilon} & si \quad |s| < \varepsilon \\ 1 & si \quad s > \varepsilon \end{cases} \quad (III.22)$$

$$sat(s) = \begin{cases} 0 & si \quad |s| < \varepsilon_1 \\ \frac{s-\varepsilon_1}{\varepsilon_2-\varepsilon_1} & si \quad \varepsilon_1 < |s| < \varepsilon_2 \\ sign & si \quad s > \varepsilon_2 \end{cases} \quad (III.23)$$

III.5. Commande par MG d'ordre supérieur

La commande par MG d'ordre supérieur est une alternative au problème des modes glissants classiques "chattering" tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques ils permettent aussi d'améliorer la précision asymptotique. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans la commande synthétisée mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui a le mérite de réduire le chattering [Tal 16]-[Bor 15]-[Mer 12]-[Bat 00].

III.5.1. La structure générale de la commande par DTC-HOSMC-ST à la GADA

La commande par DTC basée sur MG d'ordre supérieur est appliquée aux deux boucles de flux et l'autre du couple en utilisant de super-twisting (ST) l'abrégié en anglais (DTC-HOSMC ST). Ce dernier est utilisé pour améliorer les résultats du couple électromagnétique et le flux rotorique à la GADA figure III.10, en utilisant la tension d'axe direct V_{rd} et la tension d'axe en quadrature V_{rq} pour réguler le flux rotorique et le couple électromagnétique respectivement [Ben19]-[Tou 15]-[Bou 16].

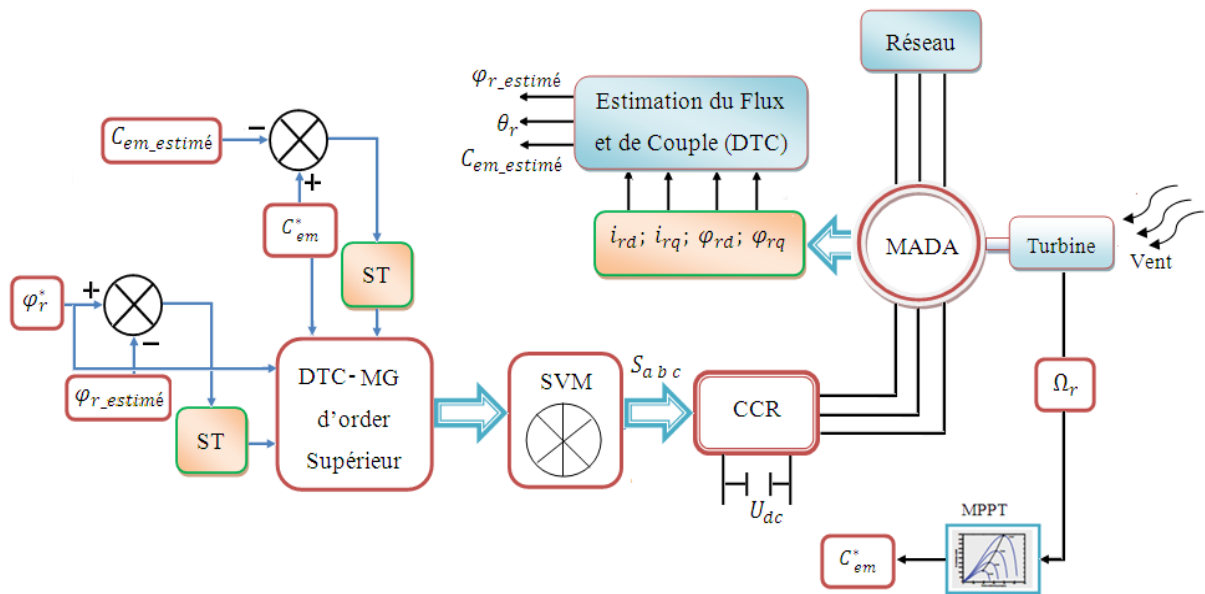


Figure. III.10. Structure de la commande du système de conversion d'énergie éolienne.

La figure si dessous illustré l'estimation du couple électromagnétique et du flux rotorique.

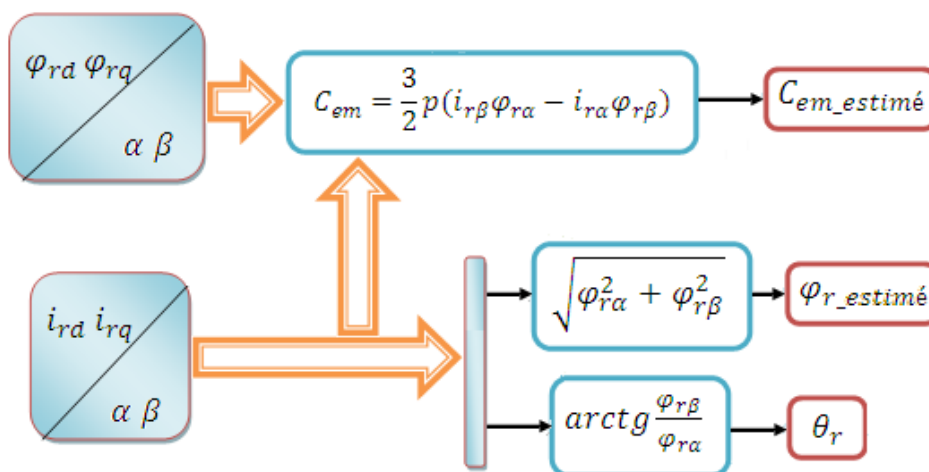


Figure. III.11. L'estimation du couple et du flux.

III.5.2. Application la DTC-HOSMC-ST au Contrôle du couple électromagnétique et le flux rotorique

Après avoir présenté la théorie de la commande par mode glissant avec les différentes structures de la commande non linéaire, nous allons analyser dans cette partie l'application de la commande par DTC basé sur la MG d'order supérieur au générateur asynchrone à double alimentation GADA afin de valider l'approche présentée par des résultats de simulation.

III.5.2.1. Surface de régulation de glissements du flux et du couple électromagnétique

Le choix de surface de glissement est basée sur les relations de flux rotorique et du couple électromagnétique que sont données par :

$$S = [S(\varphi_r) S(C_{em})] \tag{III.24}$$

Où

Le surface de flux rotorique peut être définie à partir de l'équation $(s(x) = (\frac{d}{dt} + \lambda_s)^{n-1} e)$, l'erreur de flux rotorique et du couple électromagnétique pour n=1 est définie par :

$$\begin{cases} e = \varphi_r^* - \varphi_r \\ e = C_{em}^* - C_{em} \end{cases} \tag{III.25}$$

Nous définissons les erreurs de flux rotorique et du couple électromagnétique comme suit :

$$\begin{cases} S_{\varphi_r} = e = \varphi_r^* - \varphi_r \\ S_{C_{em}} = e = C_{em}^* - C_{em} \end{cases} \tag{III.26}$$

Alors, à partir du deuxième chapitre (partie de la commande vectorielle), on tire le système d'équations d'état du GADA suivant [Ben 19] :

Où

$$\varphi_r = \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \varphi_s ; C_{em} = -p \frac{M V_s}{L_s \omega_s} i_{rq} ; \sigma = (L_r - \frac{M^2}{L_s}).$$

En substituant dans l'équation (II.9) on trouve:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \sigma \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s L_r \sigma i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \sigma \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s L_r \sigma i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.27)$$

φ_r^*, C_{em}^* Sont respectivement, les valeurs de référence de flux rotorique et du couple électromagnétique.

En substituant l'expression de (φ_r, C_{em}) dans l'équation (III.26), on trouve :

$$\begin{cases} S_{\varphi_r} = \varphi_r^* - (\sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \varphi_s) \\ S_{C_{em}} = C_{em}^* + p \frac{M V_s}{L_s \omega_s} i_{rq} \end{cases} \quad (III.28)$$

Sa dérivée

$$\begin{cases} \dot{S}_{\varphi_r} = \dot{\varphi}_r^* - \sigma L_r \dot{i}_{rd} \\ \dot{S}_{C_{em}} = \dot{C}_{em}^* + p \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \dot{i}_{rq} \end{cases} \quad (III.29)$$

Où

$$\dot{\varphi}_r = \sigma L_r \dot{i}_{rd} ; \dot{C}_{em} = p \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \dot{i}_{rq}$$

Dans l'équation (III.27) on déduit les courants directs et quadrature rotorique respectivement comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{1}{L_r \sigma} [V_{rd} - (R_r i_{rd} - g \omega_s L_r \sigma i_{rq})] \\ \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{1}{L_r \sigma} [V_{rq} - (R_r i_{rq} + g \omega_s L_r \sigma i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s})] \end{cases} \quad (III.30)$$

En substituant (III.30) dans (III.29) est donnée l'équation (III.31)

$$\begin{cases} \dot{S}_{\varphi_r} = \dot{\varphi}_r^* - \sigma L_r (\frac{1}{L_r \sigma} [V_{rd} - (R_r i_{rd} - g \omega_s L_r \sigma i_{rq})]) \\ \dot{S}_{C_{em}} = \dot{C}_{em}^* + p \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \frac{1}{L_r \sigma} [V_{rq} - (R_r i_{rq} + g \omega_s L_r \sigma i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s})] \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} \dot{S}_{\varphi_r} = \dot{\varphi}_r^* - [V_{rd} - (R_r i_{rd} - g \omega_s L_r \sigma i_{rq})] \\ \dot{S}_{C_{em}} = \dot{C}_{em}^* + p \frac{M V_s}{L_s \omega_s L_r \sigma} [V_{rq} - (R_r i_{rq} + g \omega_s L_r \sigma i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s})] \end{cases} \quad (III.31)$$

Nous définissons les fonctions Z_1 et Z_2 comme suit:

$$\begin{cases} Z_1 = (R_r i_{rd} - g \omega_s L_r \sigma i_{rq}) + \dot{\varphi}_r^* \\ Z_2 = p \frac{M V_s}{L_s \omega_s L_r \sigma} (-R_r i_{rq} - g \omega_s L_r \sigma i_{rd} - g \frac{M V_s}{L_s}) + \dot{C}_{em}^* \end{cases} \quad (III.32)$$

Donc:

$$\begin{cases} \dot{S}_{\varphi_r} = V_{rd} + Z_1 \\ \dot{S}_{C_{em}} = V_{rq} + Z_1 \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

Sa dérivée

$$\begin{cases} \ddot{S}_{\varphi_r} = \dot{V}_{rd} + \dot{Z}_1 \\ \ddot{S}_{C_{em}} = \dot{V}_{rq} + \dot{Z}_2 \end{cases}$$

III.5.2.2. Condition de convergence

Pour que les variables choisies convergent vers leurs valeurs de référence, il faut que les deux surfaces de glissement soient nulles.

$$\begin{cases} S_{\varphi_r} = 0 \\ S_{C_{em}} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{S}_{\varphi_r} = 0 \\ \dot{S}_{C_{em}} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

Par conséquent pour une surface de glissement nulle $S(\varphi_r, C_{em})$ le flux rotorique et le couple électromagnétique convergeant exponentiellement vers leurs références. Alors pour suivre φ_r^* et C_{em}^* , il suffit de rendre la surface de glissement attractive et invariante.

La réalisation d'un mode glissant est conditionnée par la vérification par la relation d'attractivité de Lyapunov $S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$ et celle d'invariance $\dot{S}(x) = 0$.

III.5.2.3. Loi de commande par mode glissant

L'algorithme de commande est défini par la relation

$$\begin{cases} V_{rd} = V_{rd_eq} + V_{rd_n} \\ V_{rq} = V_{rq_eq} + V_{rq_n} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} |V_{rd}| = |V_{rd_eq}| + |V_{rd_st}| \\ |V_{rq}| = |V_{rq_eq}| + |V_{rq_st}| \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

Ainsi, on peut définir l'algorithme de super-twisting (ST) par la relation suivante:

$$\begin{cases} V_{rd_st} = A_d |S_{\varphi_r}|^{1/2} \text{sgn}|S_{\varphi_r}| - B_d \int \text{sgn}(S_{\varphi_r}) dt \\ V_{rq_st} = A_q |S_{C_{em}}|^{1/2} \text{sgn}|S_{C_{em}}| - B_q \int \text{sgn}(S_{C_{em}}) dt \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

Avec:

V_{rd} et V_{rq} : Grandeur de commande.

V_{rd_eq} et V_{rq_eq} : Grandeur de commande équivalent.

V_{rd_n} et V_{rq_n} : Terme de commutation de commande.

A_{dq}, B_{dq} : Sont les gains du contrôle positif.

III.6. Résultats de simulations

Dans cette section Nous présenterons, les résultats de simulation pour valider la commande directe du couple basé sur MG d'ordre supérieur de la MADA, en considérant une éolienne à 4 Kw dont les paramètres sont donnés en (annexe A). La stratégie de contrôle directe du couple DTC à la MADA avec l'utilisation d'un onduleur commandé par le technique SVM, et deux régulateur hystérésis l'un au niveau du flux et l'autre au niveau du couple, l'amplitude de la tension référence est fixée au début à une valeur constante d'entrée de l'onduleur.

Tout d'abord, on note que le profil de la vitesse du vent appliquée à la turbine éolienne dans ce chapitre est presque identique à celui du chapitre II, où il est début à 6 m/s et il a changé soudainement à 7m/s à l'instant 1.5s et 8 m/s à l'instant 3s.

Les figures III.12 et III.13, montrent respectivement : la vitesse de rotation du générateur ainsi que sa référence, la vitesse relative λ ainsi que le coefficient de puissance de la turbine. Donc, quelque soit la vitesse de vent appliquée au niveau des pales de la turbine éolienne, le coefficient de puissance (rendement de la turbine) est toujours gardée à sa valeur maximale de 0.5, ceci est vérifié pour un ratio de vitesse optimal de 9.2.

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures III.14 et III.15 respectivement. Montre que la coulpe électromagnétique et le flux rotorique suit parfaitement sa référence avec une bonne performance dynamique, moins d'oscillations et dépassement de consigne dans le cas DTC-HOSMC par rapport au le cas DTC-Classique.

Les résultats obtenus en régime transitoire, présentés sur le figure III.16, montrent que le contrôle par DTC-HOSMC est plus performant par rapport au contrôleur par DTC-Classique corrige la trajectoire du flux rotorique en un temps très court, tout en garantissant une bonne stabilité et précision.

La figure III.17 et III.18, montre respectivement le courant rotorique à flux fixe par phase sans et sa spectres des harmoniques avec ajustement de la technique proposé.

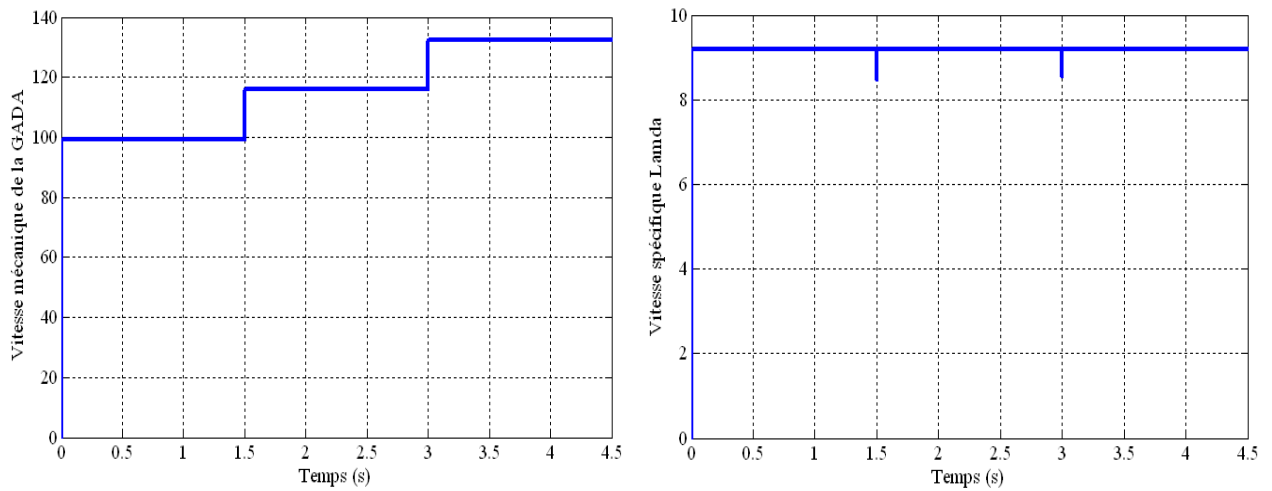


Figure. III.12. La vitesse mécanique de la GADA et la vitesse spécifique.

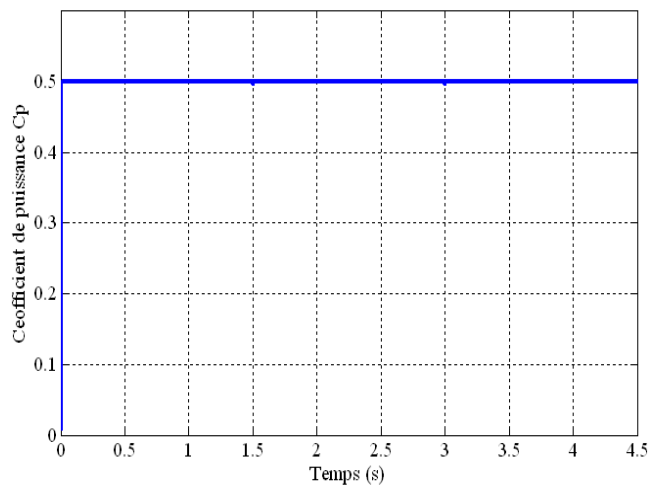
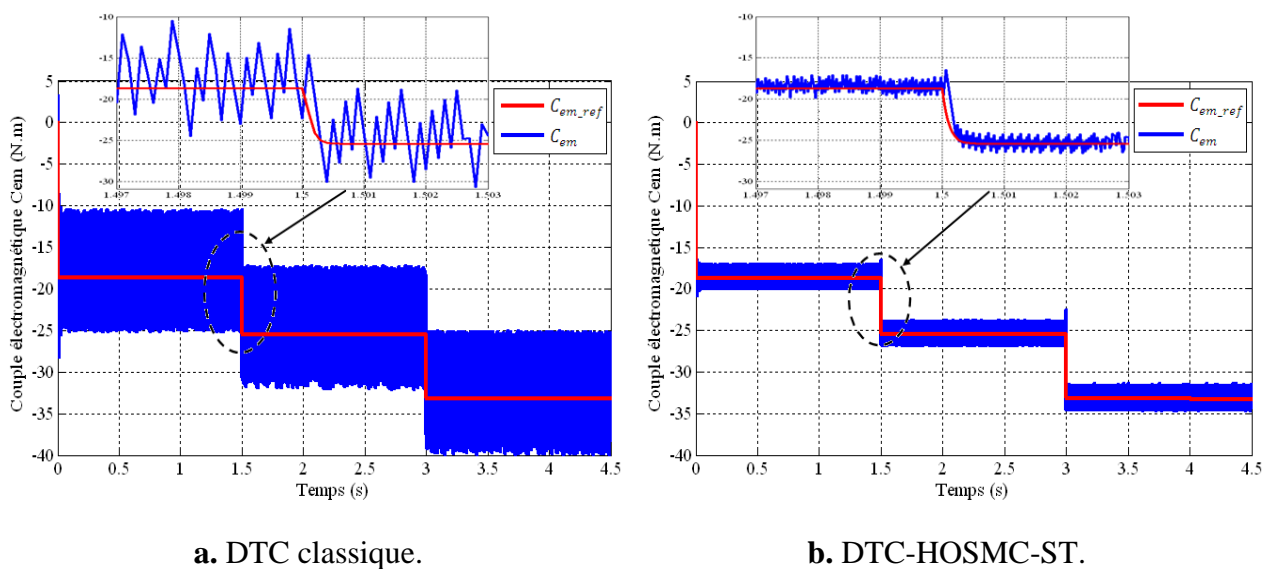


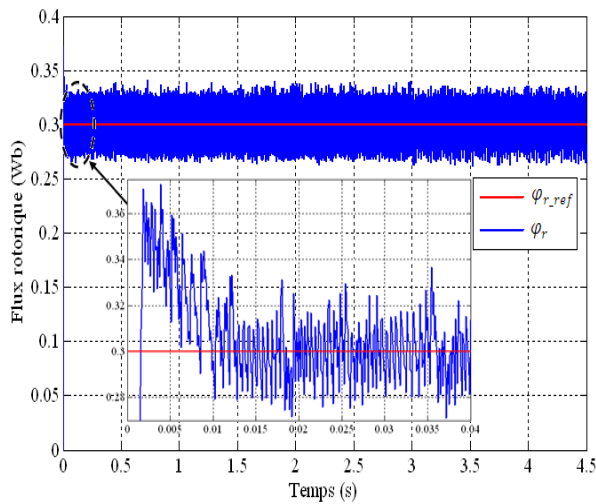
Figure. III.13. Le coefficient de puissance.



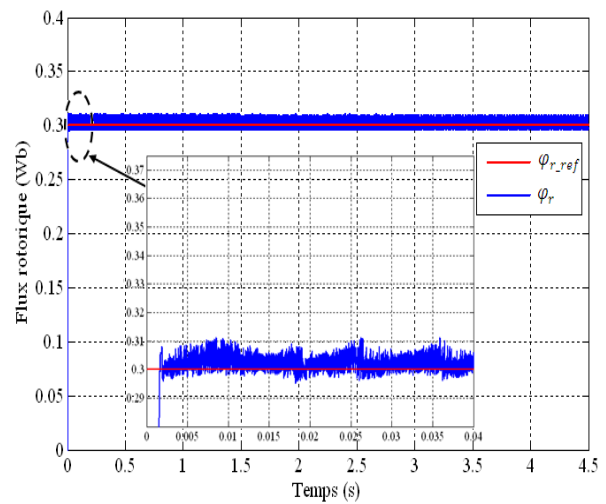
a. DTC classique.

b. DTC-HOSMC-ST.

Figure. III.14. Le couple électromagnétique dans les deux cas de contrôle.

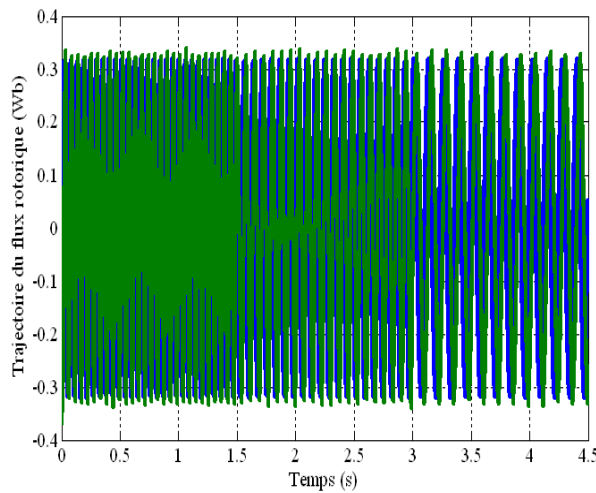


a. DTC classique.

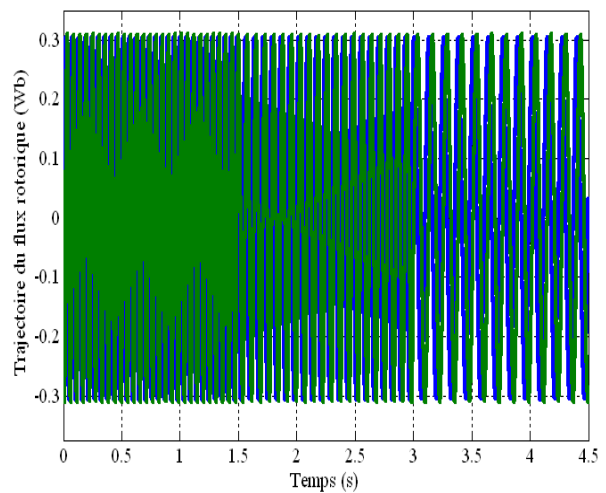


b. DTC-HOSMC-ST.

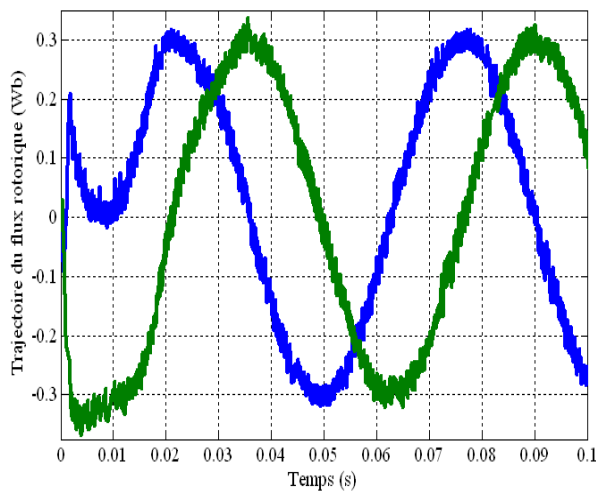
Figure. III.15. Le flux rotorique dans les deux cas de contrôle.



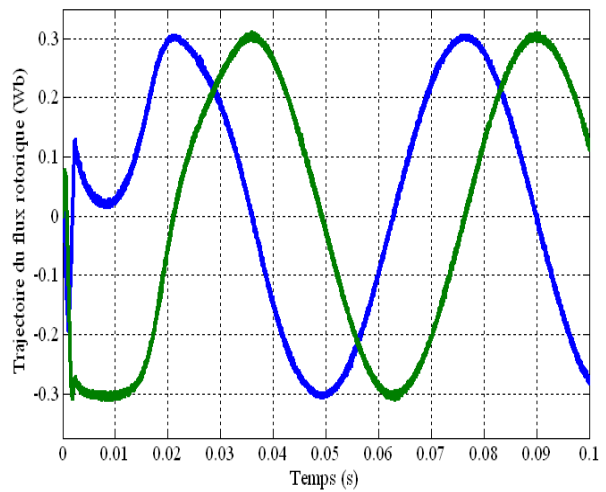
a. DTC classique.



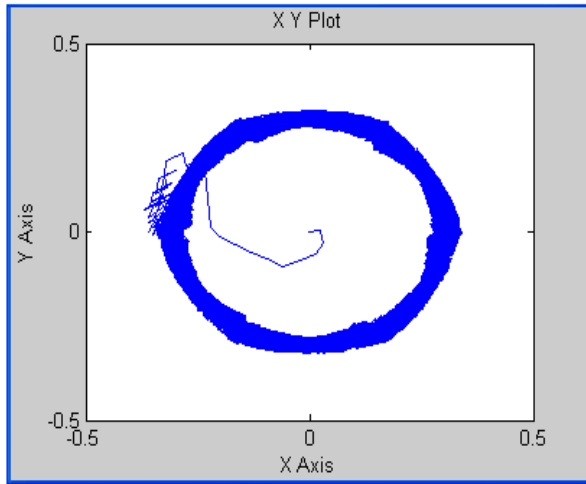
b. DTC-HOSMC-ST.



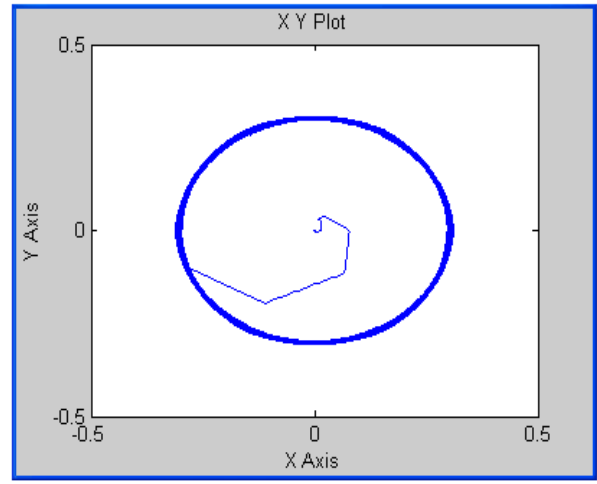
c. DTC classique.



d. DTC-HOSMC-ST.

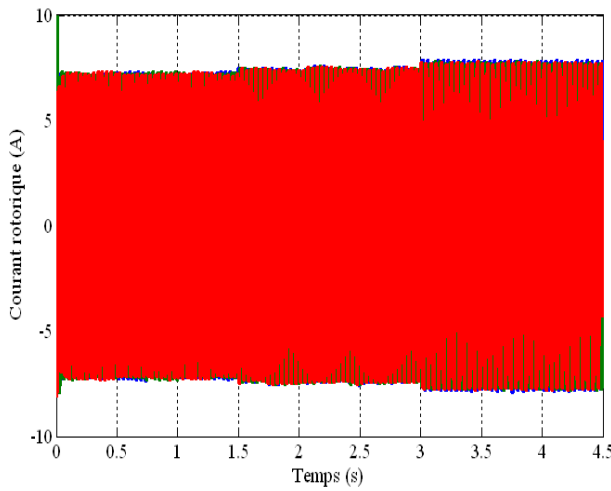


e. DTC classique.

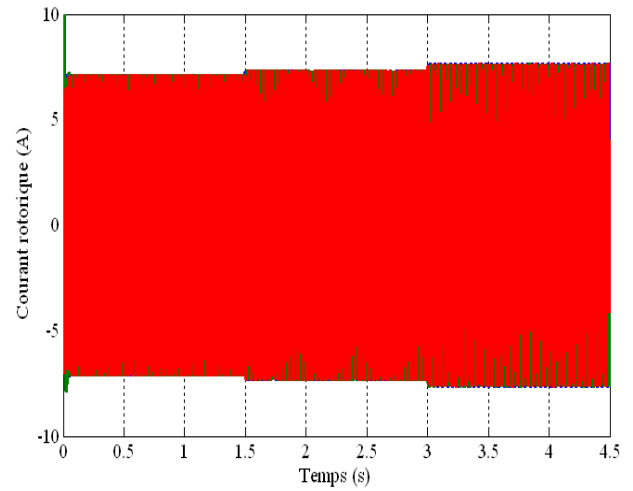


f. DTC-HOSMC-ST.

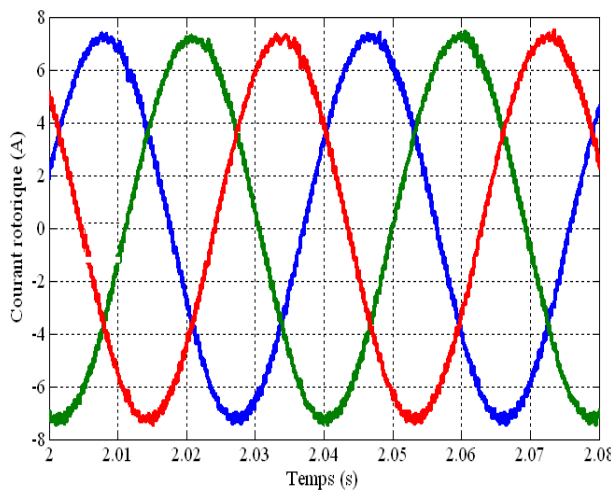
Figure. III.16. Trajectoire du flux rotorique de la MADA.



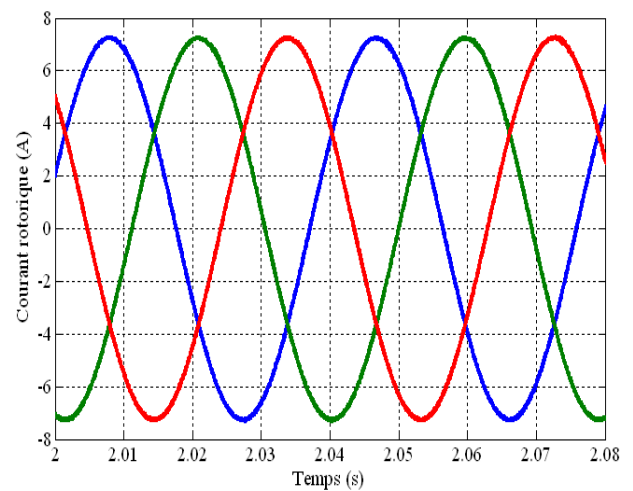
a. DTC classique.



b. DTC-HOSMC-ST.



a. DTC classique.



b. DTC-HOSMC-ST.

Figure. III.17. Le courant rotorique à flux fixe dans les deux cas de contrôle.

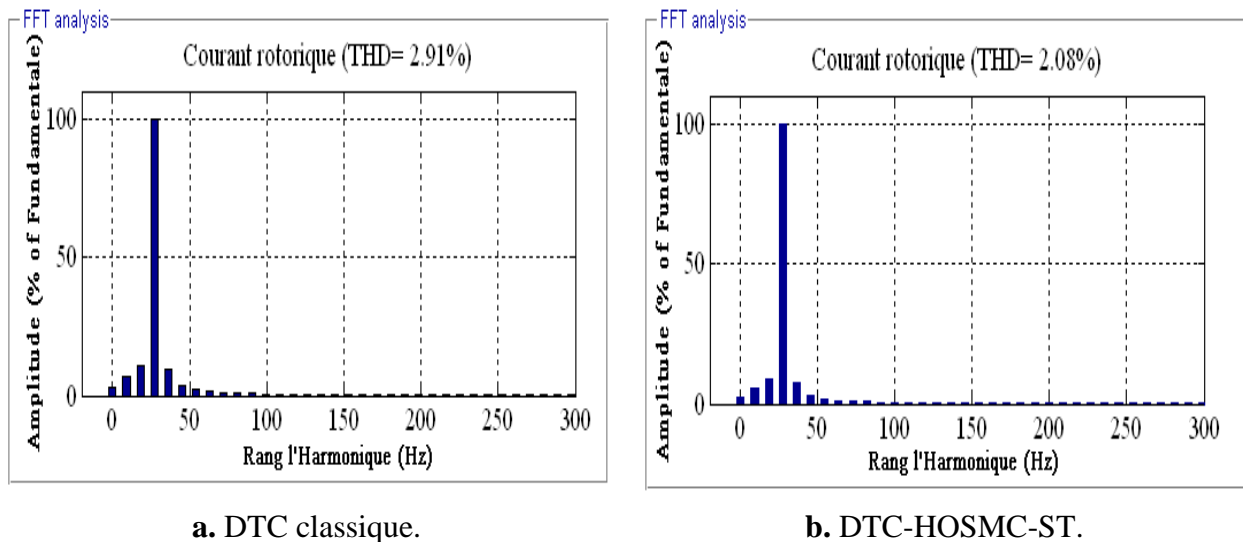


Figure. III.18. Rang l'harmonique du courant rotorique.

III.7. Conclusion

L'étude théorique de la commande par DTC basée sur MG d'ordre supérieur (DTC-HOSMC-ST) et son application au générateur asynchrone à double alimentation (GADA) par l'utilisation de la technique MLI vectorielle (SVM) est une stratégie de contrôle robuste pour contrôler le couple électromagnétique et le flux rotorique et pour améliorer les performances dynamique à la GADA présentées dans ce chapitre. En premier lieu, la technique de commande directe du couple DTC a été réalisée. Le deuxième lieu, la commande par MG d'ordre supérieur a été prise en compte dans le modèle DFIG proposé. Ensuite, la technique de DTC associée avec MG d'ordre supérieur basé sur l'algorithme de super-twisting a été réalisée en appelant ce dernier DTC-HOSMC-ST, après que, la technique DTC classique avec DTC-HOSMC-ST a été comparé. Les résultats de simulation sous MATLAB/SIMULINK montrent que la technique DTC-HOSMC-ST permette le bon contrôle au niveau de la GADA.

Afin d'optimiser des gains, K_p et K_i du régulateur PI qui est utilisé dans la commande vectorielle classique du MADA en mode autonome pour but d'améliorer les performances de résultats de simulation et expérimentaux, nous allons appliquer dans le prochain chapitre une métaheuristique méthode qui s'appelle la méthode d'optimisation par les racines de l'arbre « rooted tree optimization RTO ».

CHAPITRE IV

*Optimisation par la Technique RTO à la
MADA-Autonome*

IV.1. Introduction

Dans le chapitre trois, nous avons vu que la commande de la machine asynchrone à double alimentation par un régulateur PI classique présente plusieurs inconvénients, tel que l'obtention des ondulations du couple électromagnétique, du flux et du courant statorique dans le régime transitoire et permanent. Les techniques classiques (vectorielle, DTC, basée sur des régulateurs conventionnelles...etc.) permettent d'avoir des performances médiocres, mais si on veut aller plus loin dans l'amélioration de la commande des systèmes, il faut voir d'autres techniques et algorithmes de contrôle.

La capacité et la puissance que confèrent les techniques d'intelligences artificielles et les techniques d'optimisation dans la résolution des différents problèmes rencontrés dans le domaine industriel, notamment ceux liés à la commande des machines électriques, en trouvent dans l'utilisation de la logique floue, les réseaux de neurones, la commande prédictive et la commande d'optimisation par les méthodes méta-heuristiques, une des voies intéressantes particulièrement pour la mise en œuvre du noyau de la commande proposée.

Ce chapitre sera consacré à la description et l'application d'une nouvelle technique méta-heuristique introduite dans la commande des systèmes, à savoir : Optimisation par les racines des arbres (Rooted Tree optimisation RTO). Pour cela, on va aborder la commande de la MADA fonctionnant d'une façon autonome basée sur la technique de RTO pour l'optimisation des gains du régulateur PI. Ce dernier permet de réguler l'amplitude et la fréquence de la tension générée par le système étudié.

IV.2. Généralités sur les techniques de commande avancées

Le domaine des techniques d'intelligences artificielles (IA) et/ou méta-heuristiques est un domaine de recherche connaisse depuis quelques années un succès croissant dans divers domaines de science de l'ingénieur. Il est été appliqué à l'identification des paramètres, l'estimation dans l'espace d'états des systèmes de commande, régulation et optimisation des systèmes de commande non linéaires et non modélisables. Parmi les méthodes d'intelligences artificielles(IA) et/ou méta-heuristiques on peut citer :

- ✓ La logique floue (LF); est une branche des mathématiques, basée sur la théorie des probabilités et des concepts flous, a été introduite en 1965 par le Professeur L. Zadeh. Elle permet de faire correspondre un degré de vérité (d'appartenance) à une variable qui peut être linguistique [Cha 10]. Dans les ensembles flous, il est permis qu'une chose appartienne

partiellement à un certain ensemble; ceci s'appelle le degré d'appartenance. Dans les ensembles conventionnels, le degré d'appartenance est 0 ou 1 alors que dans la théorie des ensembles flous, le degré d'appartenance peut varier entre 0 et 1 (on parle alors de fonction d'appartenance μ) [Bor 15]-[Chi 13]-[Bag 99].

- ✓ Les réseaux de neurones artificiels (RNA); semble avoir le maximum d'impact dans le domaine de l'électronique de puissance et dans la commande de machines électriques, ce qui est évident par le nombre important de publications réalisées dans la littérature. Est une fonction algébrique non linéaire et bornée. Les réseaux de neurones artificiels sont une technique qui permet de faire un apprentissage plutôt numérique que symbolique et qui se fonde plutôt sur l'arithmétique que sur la logique (règles de production) [Bec 13]-[Cha 10]-[Tso 97].
- ✓ L'Algorithme génétique (AG); ont été créés par J.H. Holland pour mimer les processus (Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils ont été adaptés à l'optimisation par John Holland (Holland 1975), également les travaux de David Goldberg ont largement contribué à les enrichir observés dans l'évolution des espèces [Sal 97]. C'est actuellement une des méthodes les plus diffusées et les plus utilisées dans la résolution de problèmes d'optimisation dans de nombreux domaines d'application [Lab 16] [Sal 97]. L'avantage majeur des algorithmes génétiques est qu'ils ne nécessitent aucune condition sur la structure du problème ou de sa fonction objective comme la modularité, la continuité ou la différentiabilité : ce qui les rend convenables pour la résolution des problèmes combinatoires non convexes [Kar 11].
- ✓ L'optimisation par essaim de particules (PSO); L'optimisation par essaim de particules est une méthode née en 1995 aux Etats Unis sous le nom. Cette méthode est inspirée du comportement social des animaux évoluant en essaim. L'exemple le plus souvent utilisé est le comportement des nuées d'oiseaux et des bancs de poissons [Bek 13]-[Lab 16].
- ✓ L'optimisation par les racines de l'arbre; parmi tous les techniques méta-heuristiques. Dans cette section, nous présentons une nouvelle technique basée sur le comportement des racines des plantes dans la recherche de l'eau souterraine dans le désert et/ou les zones secs, appelé la technique d'optimisation des racines de l'arbre en Anglais (Rooted tree optimisation RTO).

IV.3. Généralités sur les racines de l'arbre (RTO)

La construction des bases et des installations pour les arbres souterrains était liée à son système racinaire; pour cela, le comportement social des racines souterraines est devenu une technique moderne pour résoudre les problèmes d'optimisation dans plusieurs systèmes de commande [Fer 12] et cela nous permet de obtenir une solution précise dans une période de calcul plus courte [Zha 10]. Après avoir découvert cette technique, les arbres ne constituent qu'un moyen de rendre l'environnement plus beau; ils jouent un rôle important grâce à leur comportement racinaire qui est devenu une technique méta-heuristiques [Fer 12]. Ceci suggère que l'algorithme des racines d'arbre dans sa recherche d'eau souterraine; sachant que ce comportement l'adopte dans les plantes du désert. Cela signifie que le premier nœud de l'arbre donne différentes racines pour commencer à chercher. C'est le premier groupe de solutions aléatoires [Lab 16]-[Ben 19]. Une nouvelle génération est obtenue à partir de l'évaluation de la première collection en fonction de la racine la plus proche de l'objectif et du degré de fitness, et les racines qui sont loin de l'objectif sont supprimées. Pour continuer la recherche, le critère d'arrêt est d'abord vérifié (nombre d'itérations). Si le nombre maximal de doublons n'est pas atteint, la meilleure solution est le meilleur degré de fitness [Bena 19]-[Lei 07].

Le but principal de l'application de l'algorithme aux racines de l'arbre dans ce travail est de déterminer et d'optimiser les paramètres du régulateur PI dans le but d'obtenir les meilleurs résultats de régulation. L'algorithme (RTO) est utilisé pour ajuster les gains K_p et K_i de l'unité de commande afin de maintenir la fréquence et l'amplitude de la tension statorique dans le MADA en mode autonome, en fonction des courants du rotor i_{rd} et i_{rq} .

IV.4. Architecture de la technique d'optimisation des racines des arbres

IV.4.1. Détecteur d'eau (Racines)

Les racines des arbres peuvent être considérées comme un détecteur d'eau souterraine [Liu 12], car le comportement des racines d'un arbre dépend du choix du meilleur endroit pour détecter et absorber de l'eau [Ben 19]. La recherche de l'eau commence par le nœud supérieur du tronc d'arbre qui nous donne à son tour des racines [Shi 82] dans la première couche de terre - première génération - cette dernière va chercher de l'eau de manière aléatoire et la racine la plus proche au degré d'humidité deviendra le nœud à partir duquel la génération se divisera et commencera à chercher à nouveau le meilleur endroit pour amener l'eau [Lab 16]- [Liu 12]. Figure (IV.1) montre les racines d'une plante du désert à travers la recherche de l'eau.

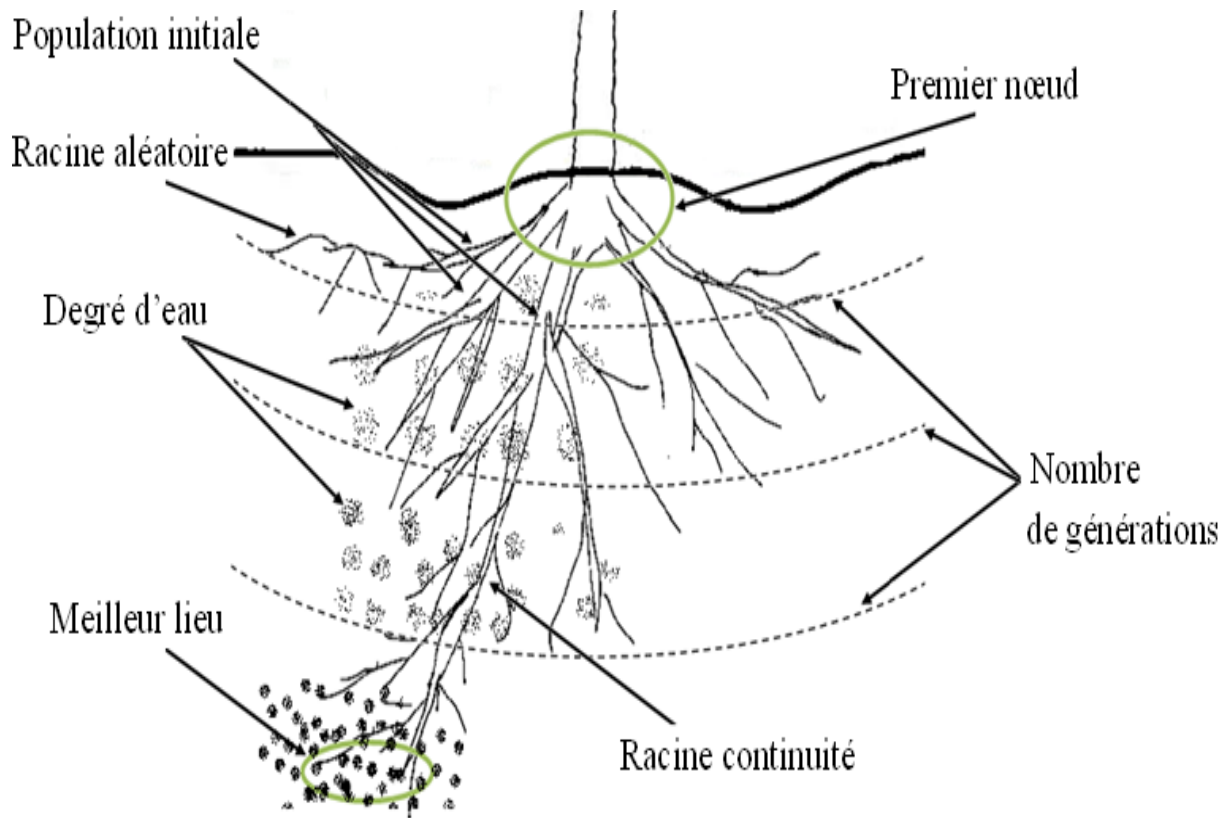


Figure. IV.1. Recherche de l'eau en fonction du comportement des racines de plantes du désert.

La stratégie de cet algorithme suit le comportement des racines de l'arbre à la recherche d'eau souterraine en fonction du degré de témoin sous terre. Ce comportement nous permet de dériver un nouvel algorithme, basé sur ce comportement. Pour appliquer cet algorithme, temps les variables linguistiques utilisés doivent être expliquées et identifier :

Racine: Candidat ou une solution suggérée.

Degré d'humidité entre D_w : Détermine le degré d'humidité entre la population.

Les variables (R_r , R_n , R_c) sont les taux qui affectent la convergence de l'accès à la solution.

IV.4.2. La base d'une racine aléatoire (Random root R_r)

Dans la recherche de la meilleure solution pour le début de la nouvelle population, il faut partir de la racine aléatoire la plus proche de l'eau. Les membres de la nouvelle population - la nouvelle génération - sont les solutions initiales proposées [Ben 19]-[Bena 19]-[Lab 16]-[Fer 12]. La nouvelle population est calculée en fonction de :

$$Y_{new}(k, it + 1) = Y_r(it) + b_3 \times D_w(k) \times randn \times m/it \quad (IV.1)$$

$Y_r(it)$: Le candidat précédent pour l'itération.

D_w : Degré d'humidité (Wetness degree).

b_3 : Est le paramètre ajustable.

IV.4.3. La base de la racine la plus proche de l'eau (Nearest root R_n)

La technologie du système racines des arbres ne permet pas de sélectionner les meilleures racines qui se rassemblent autour du lieu le plus humide, à partir duquel une nouvelle génération est créée et les racines distantes supprimées. Afin de calculer la nouvelle génération, la relation suivante est donnée en prenant en compte le nombre de candidats [Fer 12]-[Ben 19]-[Per 82].

$$Y_{new}(k, it + 1) = Y_{best}(it) + b_1 \times D_w(k) \times randn \times (m/(N \times it)) \quad (IV.2)$$

Où:

k : Numéro du candidat.

it : Numéro d'itération.

b_1 : Est le paramètre ajustable.

N : l'échelle de la population.

$Y_{new}(it + 1)$: Pour $(it + 1)$, obtenir un nouveau candidat.

m : La limite supérieure du paramètre et $randn$ est un numéro aléatoire normal compris entre [0, 1].

$Y_{best}(it)$: La meilleure solution de la génération précédente.

IV.4.4. La base de la racine continuité (Root continuity R_c)

Les racines qui ont été rassemblées autour de l'endroit le plus proche de l'eau continuent de créer une nouvelle génération de population calculée par la relation suivante.

$$Y_{new}(k, it + 1) = Y(k, it) + b_2 \times D_w(k) \times rand \times (Y_{best}(it) - Y(k, it)) \quad (IV.3)$$

Où:

b_2 : Est le paramètre ajustable.

$Y(k, it)$: Le candidat précédent pour l'itération.

IV.5. Fonction d'adaptation

Pour résoudre les problèmes de commande dans n'apport quel système comme le problème d'optimisation dans lequel on définit une ou plusieurs fonctions objectif, et l'on cherche à minimiser ou maximiser par rapport à l'ensemble des paramètres concernés. Pour pouvoir juger la qualité d'optimisation on a recherché a la fonction d'objectif de l'algorithme en peut appelle cette fonction (fitness ou le critère d'optimisation). C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir optimiser (trouver un optimum) [Ben 07]-[Col 02].

IV.6. Commande vectorielle de la MADA en mode Autonome

Comme d'autres types de générateurs, une MADA peut être aussi utilisée dans un système de production d'énergie isolé MADA-Autonome, mais une attention particulière doit être apportée à la régulation de l'amplitude et la fréquence de la tension générée [Pen 96]-[Dai 11]-[Abd 18].

La MADA en mode autonome est directement connecté à la charge. C'est-à-dire, la qualité de la tension l'alimentation dans le système MADA-Autonome est un important problème. La stratégie de contrôle dans le système étudié est maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension générée au stator de la machine. Pour ce la en va utiliser la commande vectorielle à flux statorique orienté.

La structure générale du système étudié est présentée sur la figure IV.2, la MADA est entraînée par une turbine éolienne à vitesse variable et contrôlée pour l'alimentation en tension des charges isolées sans la présence d'aucune source auxiliaire. La commande par flux orientée (FOC) est appliquée au niveau du côté rotor (CCR), le rotor de ce générateur est alimenté par une tension et une fréquence de maintien variables.

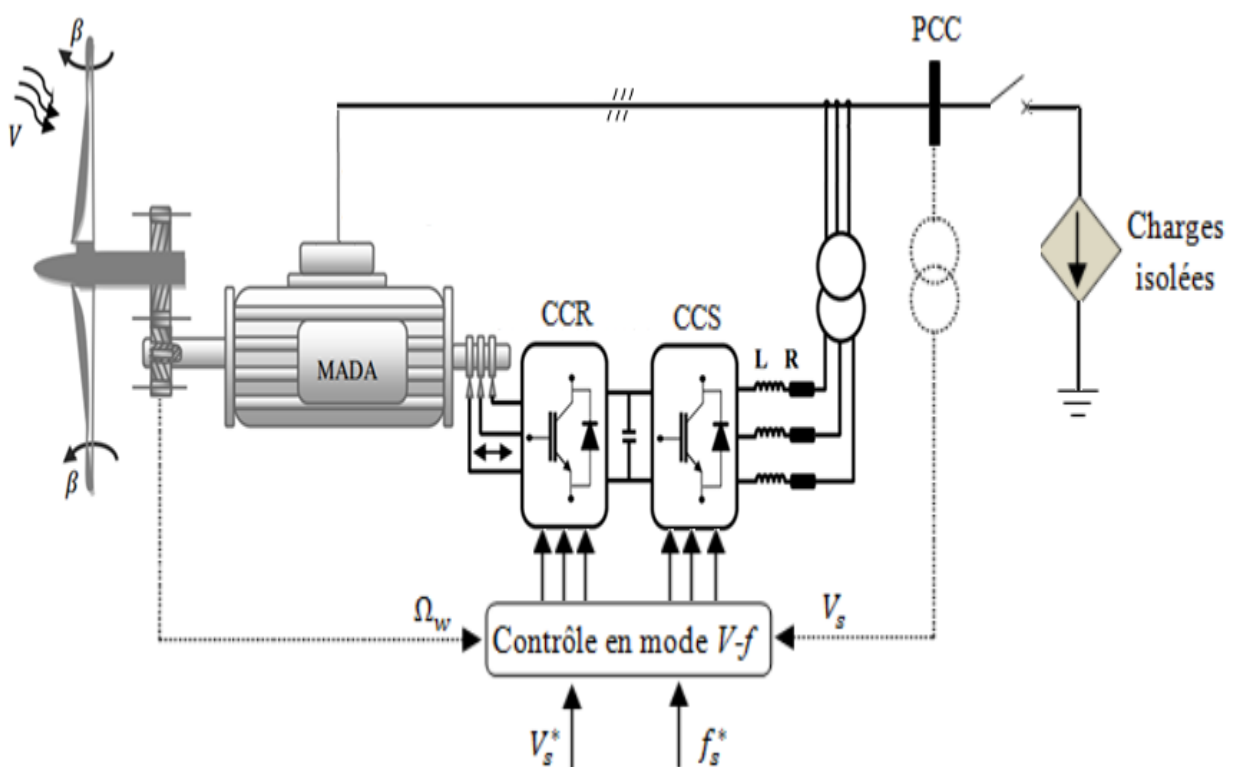


Figure. IV.2. Schéma bloc de la MADA dans une installation autonome.

La stratégie de commande du MADA en mode autonome fonctionne comme une source de tension est basée sur la commande vectorielle. Le convertisseur côté rotor contrôle la tension du

stator par les grandeurs rotoriques. Le convertisseur côté stator doit maintenir une tension constante du bus continu indépendamment de la direction de la puissance du rotor. Le circuit équivalent du MADA utilisant dq en rotation synchrone est illustré à la figure IV.3.

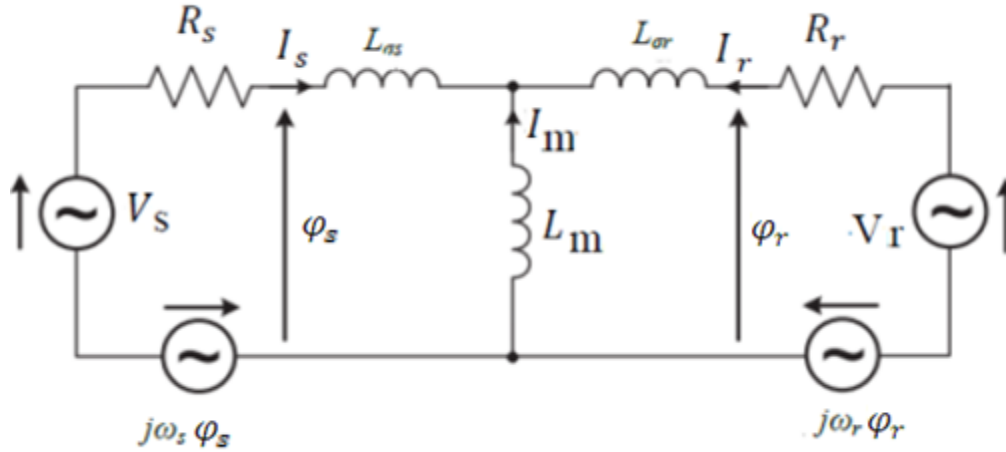


Figure. IV.3. Circuit équivalent de la MADA dans un le repère dq .

Le flux statorique est orienté suivant l'axe d dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant [Nia 17].

$$\begin{cases} \varphi_{sq} = 0 \\ \varphi_{sd} = \varphi_s \end{cases} \quad (IV.4)$$

En remplaçant l'équation (IV.4) dans (II.2) on trouve :

$$i_{rq} = -\frac{L_s}{M} i_{sq} \quad (IV.5)$$

IV.6.1. Contrôle du convertisseur côté rotor

L'objectif principale de la commande de la MADA en mode autonome est la régulation de la tension et la fréquence à une vitesse variable du MADA et/ ou à des charges différentes. Le convertisseur coté rotor est contrôlé par orientation du flux statorique, et la tension de sortie aux bornes du stator du MADA est régulée par le coutant (i_{rd}). Le courant de rotor de référence d'axe direct (i_{rd}^*) est obtenu à partir de l'erreur de tension V_s^* et V_s respectivement à travers le régulateur (PI), comme indiqué sur la figure IV.4.

L'amplitude de la tension statorique est calculée comme suit:

$$|V_s| = \sqrt{V_{ds}^2 + V_{qs}^2} \quad (IV.6)$$

La composante du courant de rotor i_{rq}^* est calculée à partir de la composante du courant de stator i_{sq}^* sous la forme :

$$i_{rq}^* = -\frac{L_s}{L_m} i_{sq}^* \tag{IV.7}$$

Les composants du rotor de référence des axes d et q (i_{qs}^* et i_{ds}^*) sont convertis en trios courants de rotor de référence de phase i_{rabc}^* en utilisant la transformation de Park inverse, [Seb 14]-[Abd 14].

La nouvelle technique basée sur l’algorithme RTO est utilisée pour déterminer et optimiser les paramètres du régulateur PI (K_p et K_i) dans les toutes les boucles de régulation.

La figure IV.4 présente le schéma bloc global d’implantation de l’algorithme RTO pour l’ajustement des gains K_p et K_i du régulateur PI associé à la commande basé sur la méthode du contrôle directe de la tension de la MADA-Autonome.

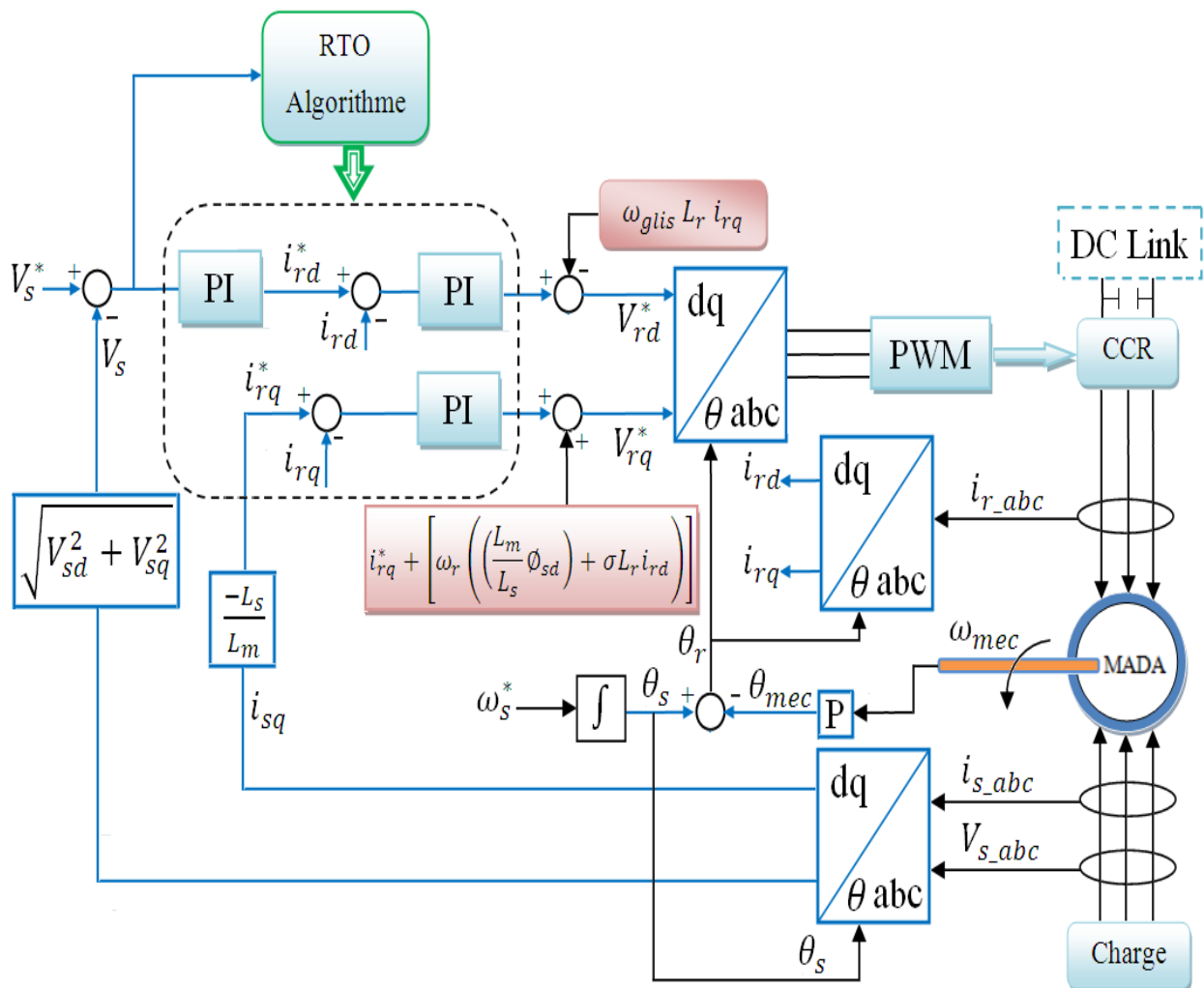


Figure. IV.4. Schéma bloc global basé sur la méthode de contrôle de tension directe.

Les impulsions sont générées vers le CCR à l'aide du contrôleur du courant MLI, en comparant les courants de référence rotorique de référence (i_{ra}^* ; i_{rb}^* ; i_{rc}^*) et les courants mesurés (i_{ra} ; i_{rb} ; i_{rc}).

La variation des courants et des flux rotorique directe et quadrature sont présentés par les expressions suivantes à partir de des équations (I.14) et (I.15):

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{1}{L_r\sigma} (v_{rd} - R_r i_{rd} + g\omega_s L_r i_{rq} \sigma) \\ \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{1}{L_r\sigma} (v_{rq} - R_r i_{rq} - g\omega_s L_r i_{rd} \sigma - \frac{gM V_s}{L_s}) \\ \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = -R_r i_{rd} + (\omega_s - \omega)\varphi_{rq} + v_{rd} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = -R_r i_{rq} + (\omega_s - \omega)\varphi_{rd} + v_{rq} \end{cases} \quad (IV.8)$$

IV.6.2. Dimensionnement de régulateur PI

La figure (IV.5) illustre le système équivalent des deux boucles de courant est égale à un système de second ordre à deux pôles et un zéro qui peut être placé par la théorie de commande classique en choisissant les gains appropriés des régulateurs PI.

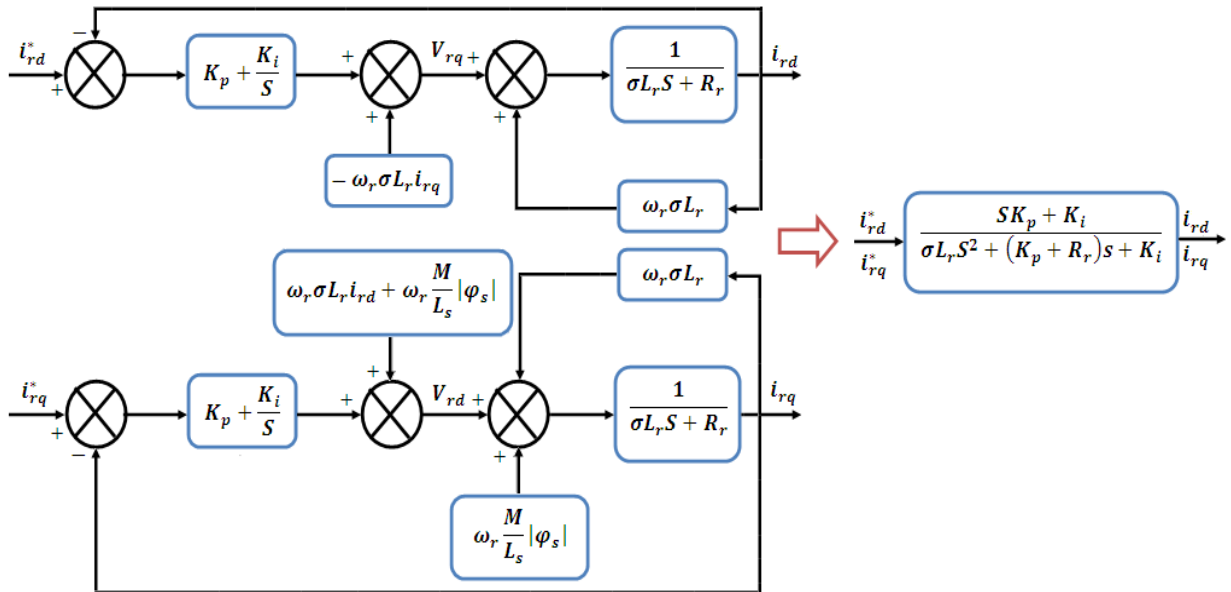


Figure. IV.5. Schéma équivalent du contrôle de courant.

Les fonctions des transferts des courants rotoriques directe et quadrature sont obtenues par l’annulation des termes de découplages par les termes de compensations.

$$\frac{i_{rd}(s)}{i_{rd}^*(s)} = \frac{\frac{K_i}{\sigma L_r}}{s^2 + s \frac{(R_r + K_p)}{\sigma L_r} + \frac{K_i}{\sigma L_r}} \quad (IV.9)$$

La boucle de régulation des courants peut se présenter par le schéma bloc de la figure IV.6, on note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l’axe *d* et l’axe *q*.

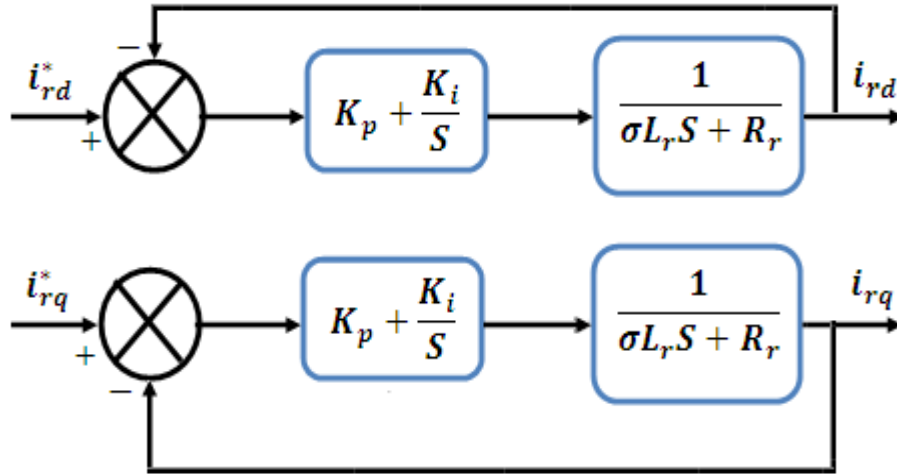


Figure. IV.6. Schéma de régulation des courants i_{rd} et i_{rq} .

Soit un régulateur PI de fonction de transfert suivante :

$$PI(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (IV.10)$$

La FTBO de la figure IV.6 sera :

$$FTBO(S) = \left(K_p + \frac{K_i}{S}\right) \cdot \left(\frac{1}{\sigma L_r S + R_r}\right) \quad (IV.11)$$

Donc la FTBF de la figure IV.6 sera :

$$FTBF(S) = \frac{SK_p + K_i}{\sigma L_r S^2 + (K_p + R_r)S + K_i}$$

(IV.12)

On a :

La fonction de transfert sous forme système de deuxième ordre est

$$G(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (IV.13)$$

Où ω_n est fréquence naturelle du système et ξ le rapport d'amortissement.

La boucle interne peut être soumise à déterminer les paramètres du régulateur PI, pour l'état critique d'amortissement.

Par analogie de l'expression (IV.13) par l'expression (IV.12) on trouve :

$$2\xi\omega_n = \frac{(R_r + K_p)}{\sigma L_r} \quad (IV.16)$$

$$\omega_n^2 = \frac{K_i}{\sigma L_r} \quad (IV.17)$$

Par substitution l'équation (IV.14) et (IV.15) dans l'équation (IV.16) on trouve :

$$\frac{8}{T_s} = \frac{(R_r + K_p)}{\sigma L_r} \quad (IV.18)$$

$$\left(\frac{4}{T_s}\right)^2 = \frac{K_i}{\sigma L_r} \quad (\text{IV.19})$$

$$K_p = \left(2 \left(\frac{4}{T_s}\right)^2 \sigma L_r\right) - R_r \quad (\text{IV.20})$$

$$K_i = \left(\frac{4}{T_s}\right)^2 \sigma L_r \quad (\text{IV.21})$$

IV.6.3. La méthode pour ajuste l'erreur du contrôleur PI

La figure IV.4 représente la mise en œuvre des boucles des régulations ; un régulateur classique PI est utilisé pour le contrôle l'amplitude de tension statorique V_s (contrôle de boucle externe), et deux régulateurs pour les courants (i_{rd}, i_{rq}) dans les boucles interne. On peut déterminer les paramètres optimale des régulateurs PI (K_p et K_i) par la technique RTO en se base sur l'erreur du tension statorique et/ou les erreurs des courants (voir l'annexe B).

Pour évaluer la robustesse de la stratégie de contrôle proposée RTO-PI, nous avons mené une étude en balayant le maximum de conditions de fonctionnement telle que, la variation de la tension, la variation de la charge résistive, on se base sur les critères d'optimisation suivant :

IAE: L'intégral de la valeur absolue de l'erreur (*IAE Integration Absolute Error*) qui définie par:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)|. dt \quad (\text{IV.22})$$

L'intégral de l'erreur quadratique (*ISE, Integrated of Squared Error*) est défini par :

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2. dt \quad (\text{IV.23})$$

L'intégral du produit de l'erreur par le temps (*ITAE, Integral Time Absolute Error*) est donné par:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|. dt \quad (\text{IV.24})$$

Pour applique l'algorithme de RTO la fonction d'objectif est défini de la façon suivante:

$$Sum (IAE) \quad (\text{IV.25})$$

Où:

$$e(t) = V_s^* - V_s \quad (\text{IV.26})$$

$e(t)$: Est l'erreur entre la consigne (valeur désirée) et la valeur mesurée.

V_s^* : Tension statorique référence.

V_s : Tension statorique mesurée.

Sum : Est l'opération de l'adition (instruction utilisée par le logiciel Matlab).

IV.7. Optimisation des gains du régulateur PI par la technique RTO

Dans cette section, la technique de racine de l'arbre RTO est appliquée pour optimiser les gains du régulateur PI classique, dans le cas de la commande vectorielle appliquée au MADA-Autonome, ce dernier afin de maintenir l'amplitude et fréquence de la tension statorique.

Pour appliquer l'algorithme de racine de l'arbre au contrôle MADA on doit suivre les étapes suivantes. Tout d'abord, les valeurs des variables (données d'entrée) sont définies (Rr, Rc, Rn où $Rr + Rc + Rn = 100\% = 1$), les constants (b_1, b_2, b_3), et le nombre des candidates N , où le tableau (IV.1) illustre les paramètres du RTO. Ensuite, on détermine la fonction d'objectif (Fitness fonction) et les paramètres optimaux de PI (Optimum gains) illustre dans les figures IV.11 et IV.12 respectivement. Dans notre étude on doit suivre les étapes suivantes:

Étape 1:

La première génération est prise au hasard à partir des données précédentes, puis classée par le degré d'aptitude décroissant. Devant cette génération, la meilleure valeur en forme de fitness peut être prise.

Étape 2:

A chaque individu de la population utilisé [K_p, K_i] et pour calculer la tension statorique, les valeurs maximale et minimale de l'aptitude (fitness) sont pris à partir des étapes précédentes, puis calculez le degré de témoin (degre witness D_w) avec la relation suivante:

$$D_w(k) = \begin{cases} \frac{f_k}{\max f_k} & \text{for the maximum objective} \\ 1 - \frac{f_k}{\max f_k} & \text{for the minimum objective} \end{cases} \quad \text{Où } k=1, 2, 3 \dots N \quad (\text{IV.27})$$

f_k : Le degré de fitness.

Réorganiser l'ensembles de la population selon le $D_w(k)$, puis on choisi la meilleure solution où les changements de degré de témoin varie dans l'intervalle [0-1].

Étape 3:

A partir de l'étape précédente, l'organigramme de la figure IV.7 résume l'étape 3.

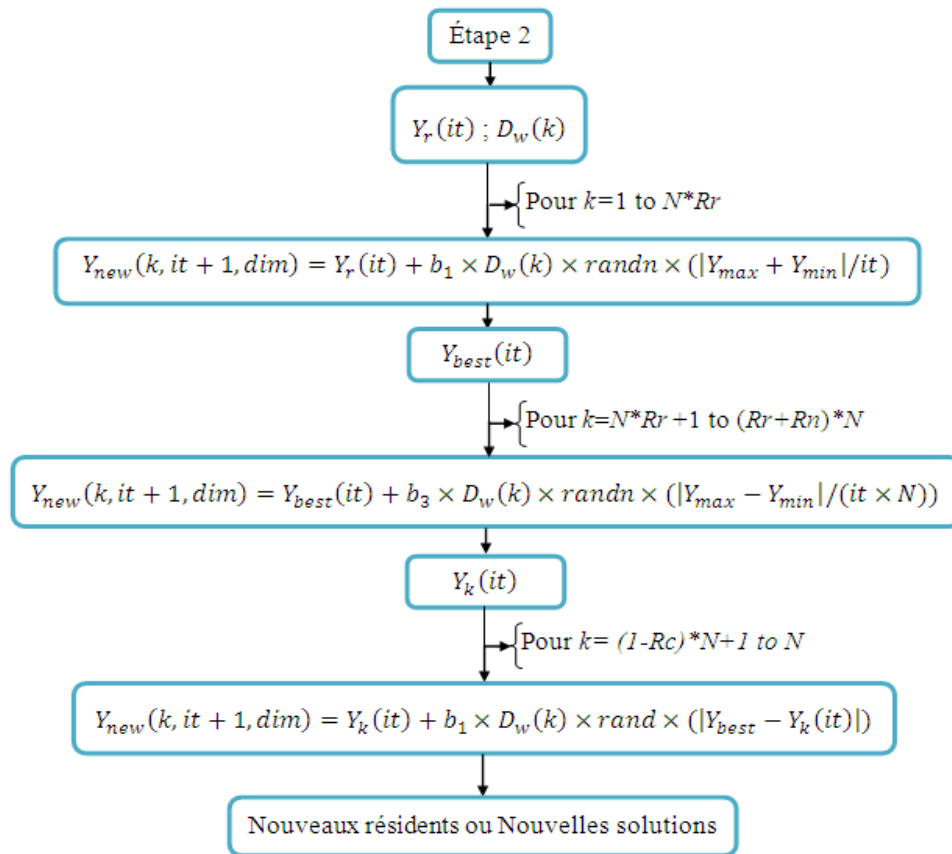


Figure. IV.7. L'organigramme de l'étape 3.

Où:

dim: Dimension de (RTO).

$Y_k(it)$: Le candidat précédent pour l'itération.

Y_{max} ; Y_{min} : Sont le minimum et maximum respectivement.

$Rr + Rn + Rc = 1, dim = 1: 2, N$ taille de RTO.

Étape 4:

Retournez à l'étape 2 si les critères d'arrêt ne sont pas remplis.

Étape 5:

Si le nombre d'itérations atteint le maximum dans ce cas, il faut passer à l'étape 6.

Étape 6:

L'individu qui nous donne les valeurs optimales pour le régulateur PI pour contrôler le MADA-autonome est la meilleure solution pour eux. Pour la mise en œuvre de l'algorithme RTO, nous avons exploité les équations dans les étapes (2 et 3) pour le développement d'un

programme sous le logiciel Matlab. La figure IV.8 illustre l'approche utilisée pour trouver les valeurs de la fonction objective.

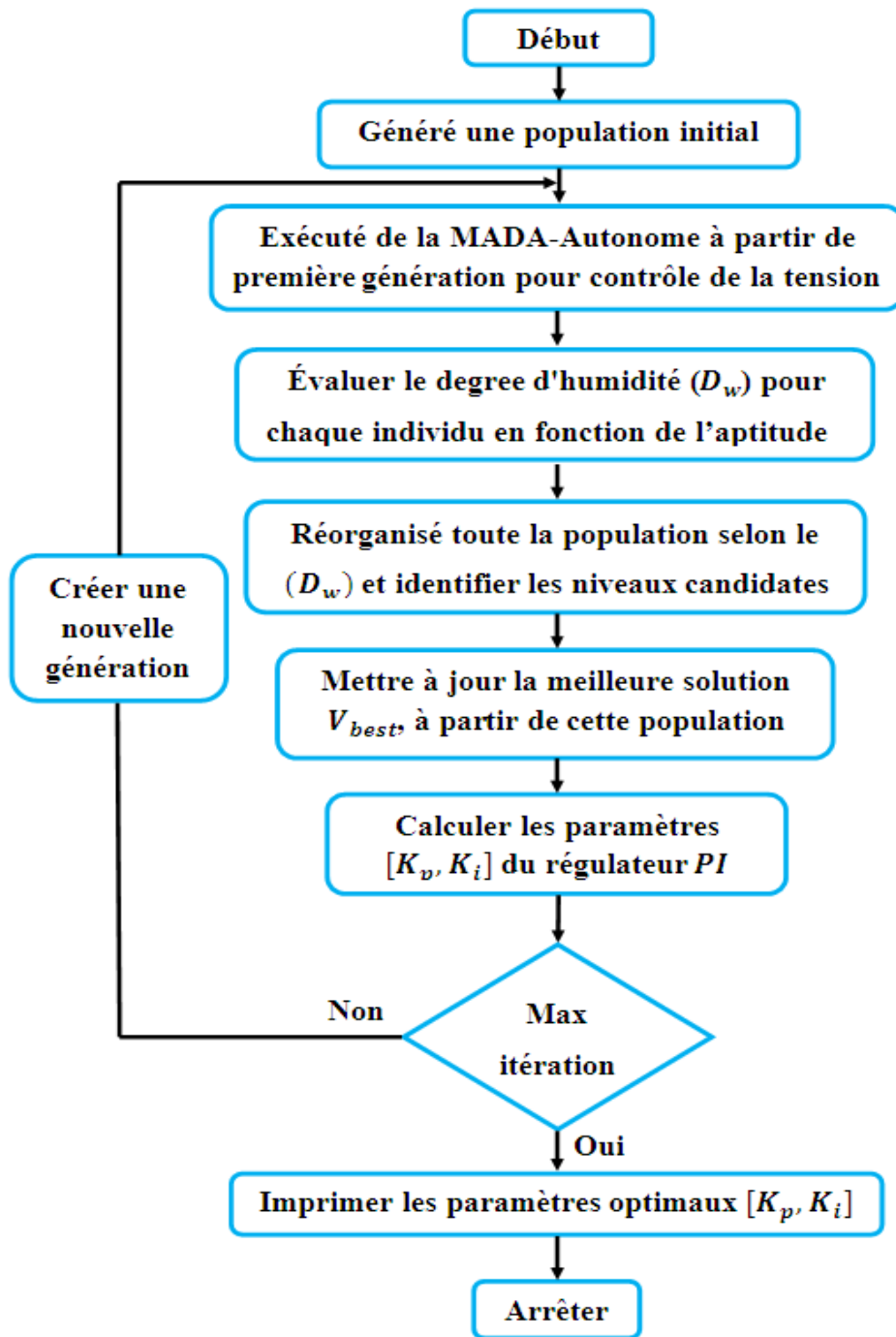


Figure. IV.8. L'organigramme du système de contrôle par RTO-PI.

IV.8. Résultats des simulations et expérimentaux

La plateforme expérimentale présentée dans la figure IV.9 a été élaborée au sein de l'équipe de recherche de commande, à Laboratoire de Génie Electrique de Biskra LGEB. Elle est constituée d'une éolienne (émulée par un moteur à courant continu), une machine à induction à

Chapitre IV Optimisation par la Technique RTO de la MADA-Autonome

rotor bobiné qui représente la MADA, ou le côté du stator est connecté à une charge résistive triphasée, et d'un système de prototypage numérique DSPACE. La génération de l'algorithme de contrôle proposé et ainsi que les impulsions de commande au convertisseur côté rotor (CCR) sont réalisés à l'aide du système numérique DSPACE, relié aux outils Matlab/Simulink par le bloc d'interface Real Time Interface (RTI). Le système DS1104 se compose des éléments suivants :

- La carte mère DS1104, montée dans l'ordinateur. Elle gère le fonctionnement global du système et exécute le programme principal.
- Des entrées/sorties numérique 20 bits.
- Une carte DSPACE de la société Texas Instrument portant la référence TMS320F240.
- Quatre sorties MLI monophasées plus une sortie MLI triphasée.
- Deux codeurs incrémentaux.
- Des entrées numériques 14 bits.
- Un panneau de connexion multi-entrées, multi-sorties qui assure la liaison entre les différentes sorties des capteurs et la carte DS1104 (PC).

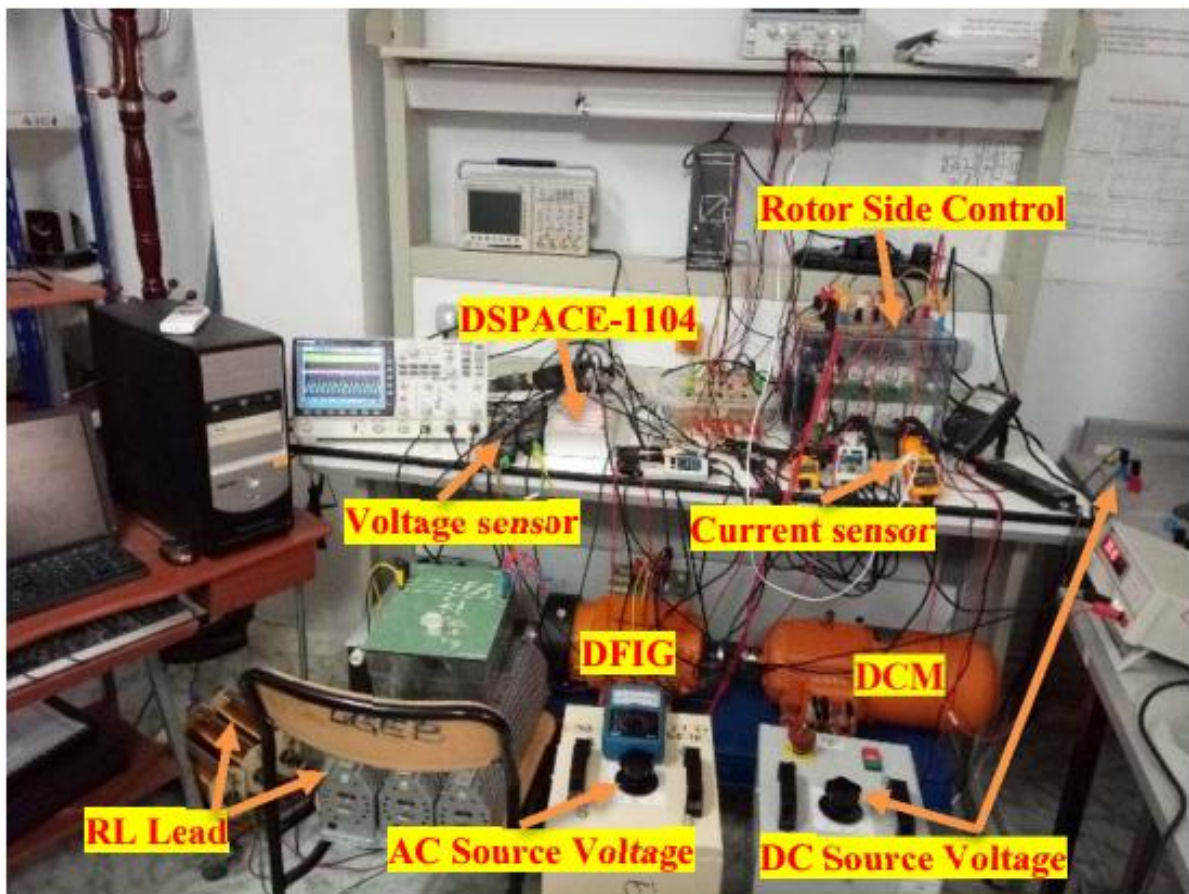


Figure. IV.9. Photographie du montage expérimentale.

La structure du banc illustrée sur la figure IV.10 est constituée par les parties suivantes :

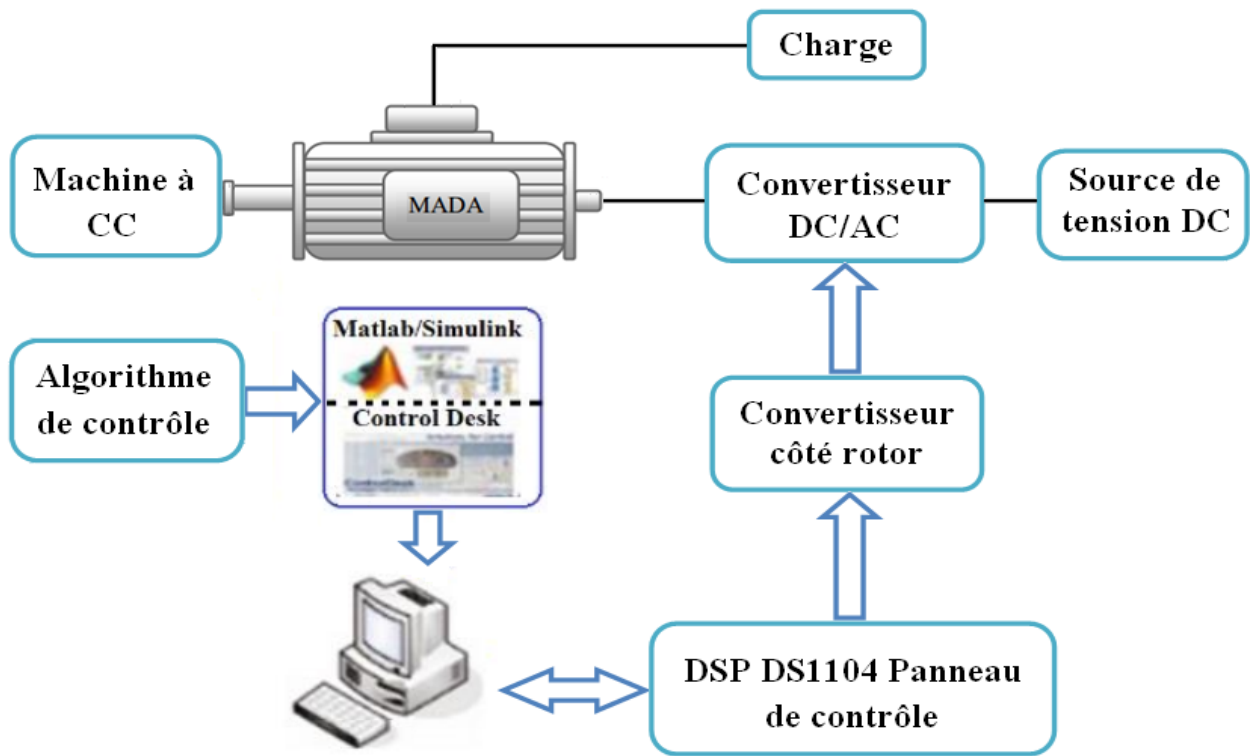


Figure. IV.10. Présentation de l'étape expérimentale.

Les paramètres de RTO utilisés sont présentés dans le tableau B.2 (Voir l'annexe B)

Les variations de la fonction objectif et les variations des gains optimaux K_i et K_p pendant la simulation sont présentées respectivement par les figures IV.11 et IV.12.

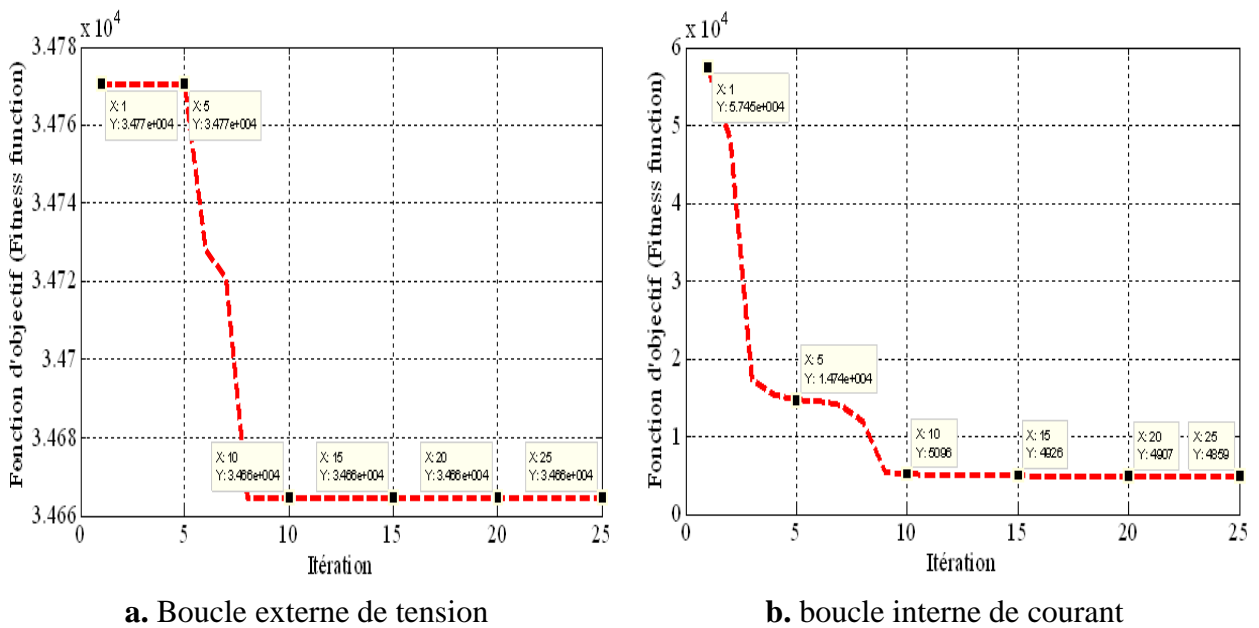


Figure. IV.11. Les variations de la fonction objective.

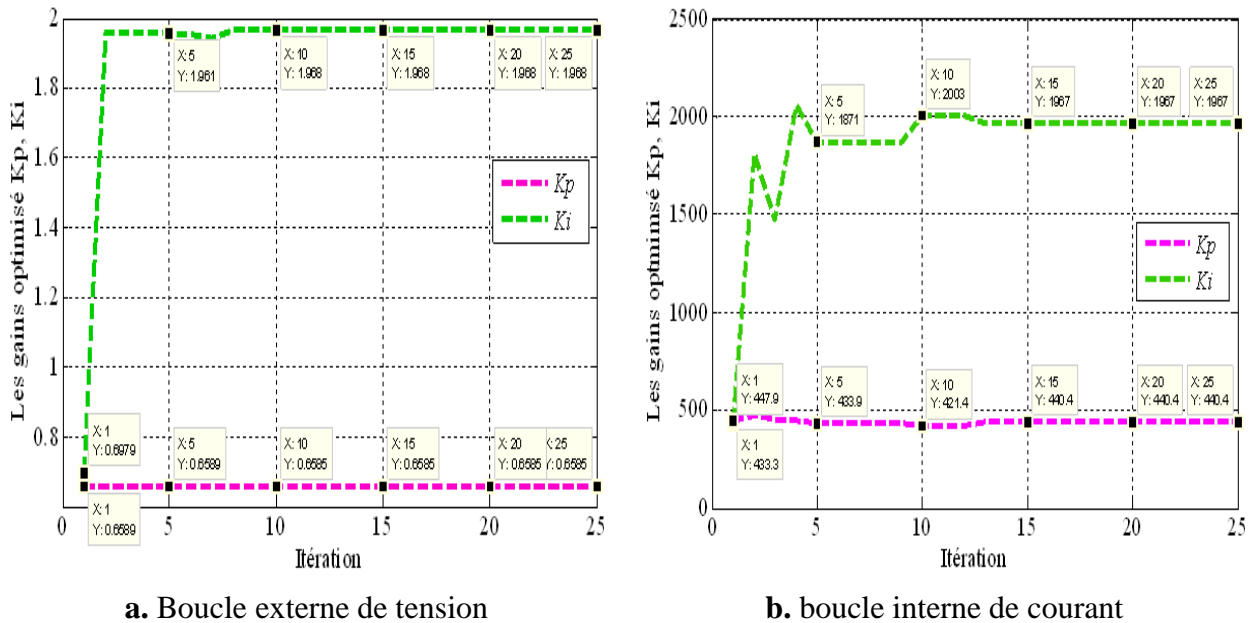


Figure. IV.12. Les variations des gains optimaux K_p et K_i .

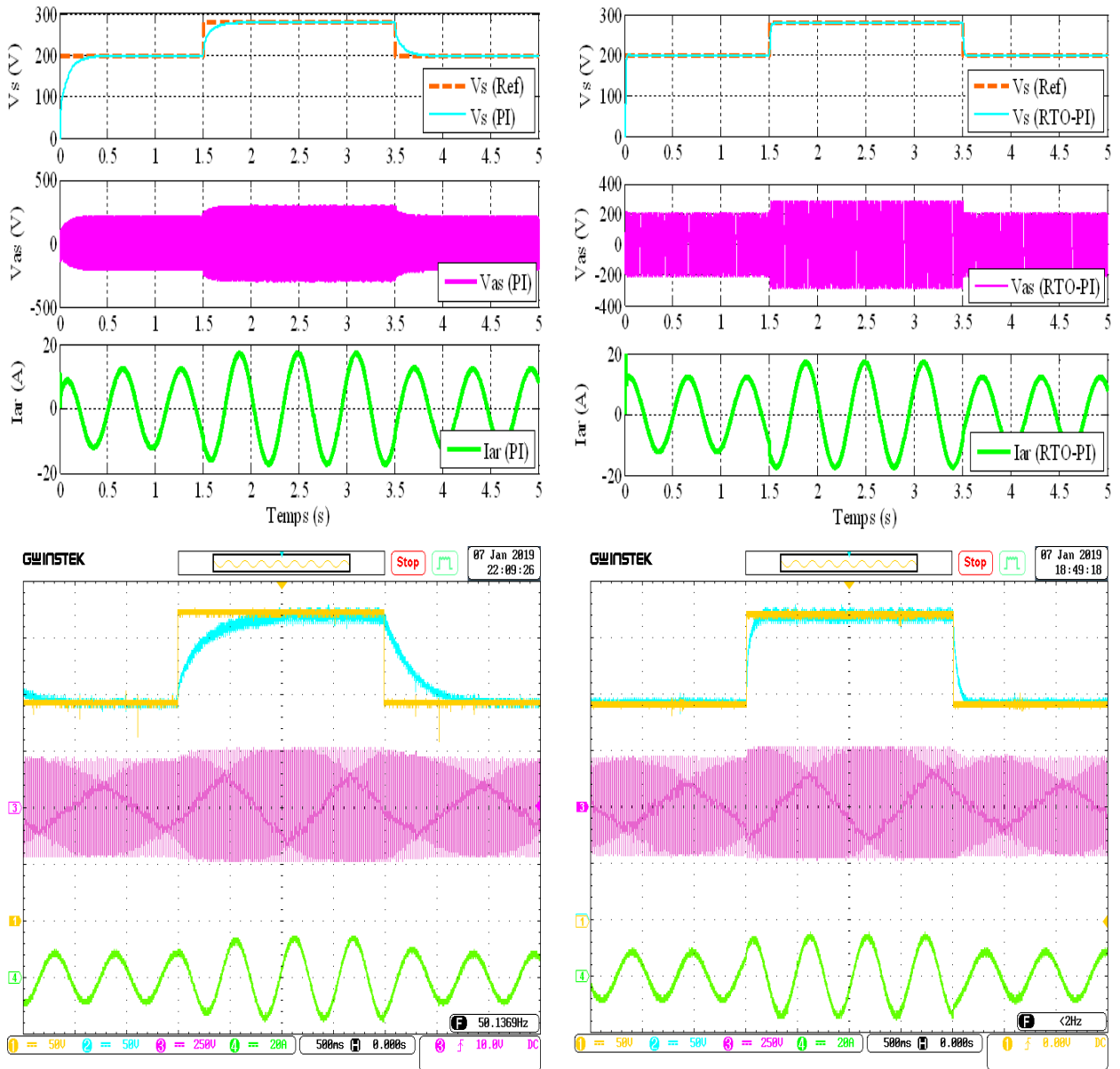
Les performances du système commandé par les régulateurs ont été simulé et valider. Nous avons attelé à une étude comparative des deux structures de commande à RTO-PI et PI classique, ou plusieurs tests sont effectués, en balayant le maximum des conditions de fonctionnement, variation de la tension de référence, la vitesse de la machine ainsi que la variation de la charge, on a trouvé les résultats suivantes :

➤ **Variation de la tension de référence**

A partir d'un régime établi de la capacité et pour les conditions de charge fixées ($\Omega_{ref} = 1450$ tr/min), nous avons simulé et valider le schéma bloc de la régulation ainsi obtenu. Les figures VI.13 IV.14 et VI.15 montrent le comportement des structures RTO-PI et PI dans le cas de la variation brusque de la tension de référence statorique de 200 V à 280 V pendant la période comprise entre 1.5s à 3.5s. Après un régime transitoire, dû au démarrage de la machine, la réponse de la tension avec le contrôleur RTO-PI est quasi instantanée et suit parfaitement sa référence et sans dépassement (Voir Figure VI.13.b IV.14.b et VI.15.b), ainsi qu'on peut remarquer que le temps de réponse du système commandé par RTO-PI est plus optimale qu'avec la commande classique PI (Figures VI.13.a IV.14.a et VI.15.a). Le courant rotorique de forme sinusoïdale, ce qui minimise la puissance déformante consommée et améliore le facteur de puissance.

Lors du régime permanent, on peut remarquer que les oscillations de la réponse temporelle de la puissance active statorique et du couple électromagnétique du système contrôlé par le

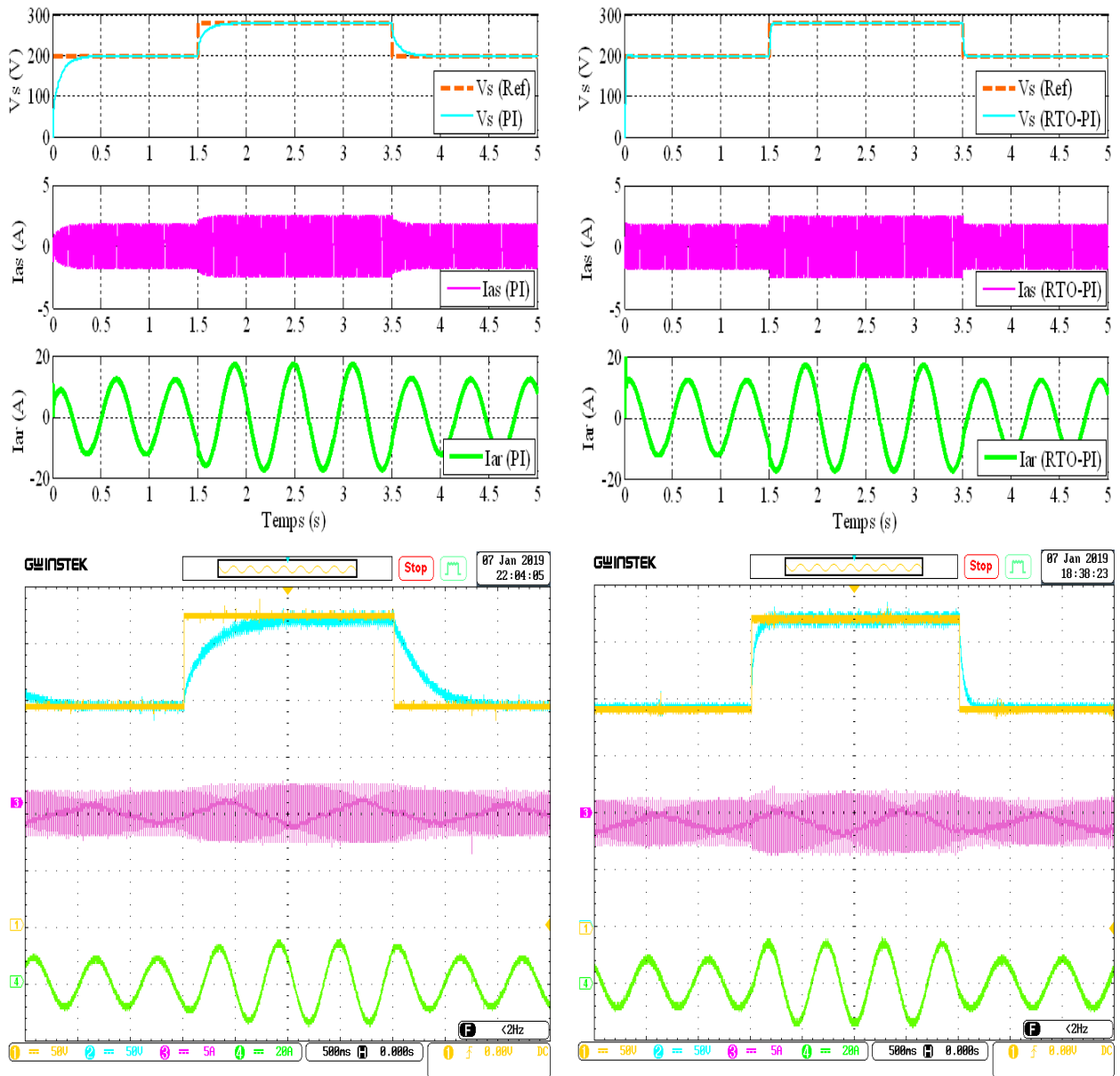
modèle RTO-PI sont considérablement améliorées par rapport à celle obtenue par le contrôleur PI classique (Voir Figures VI.15.b).



a. PI classique

b. RTO-PI

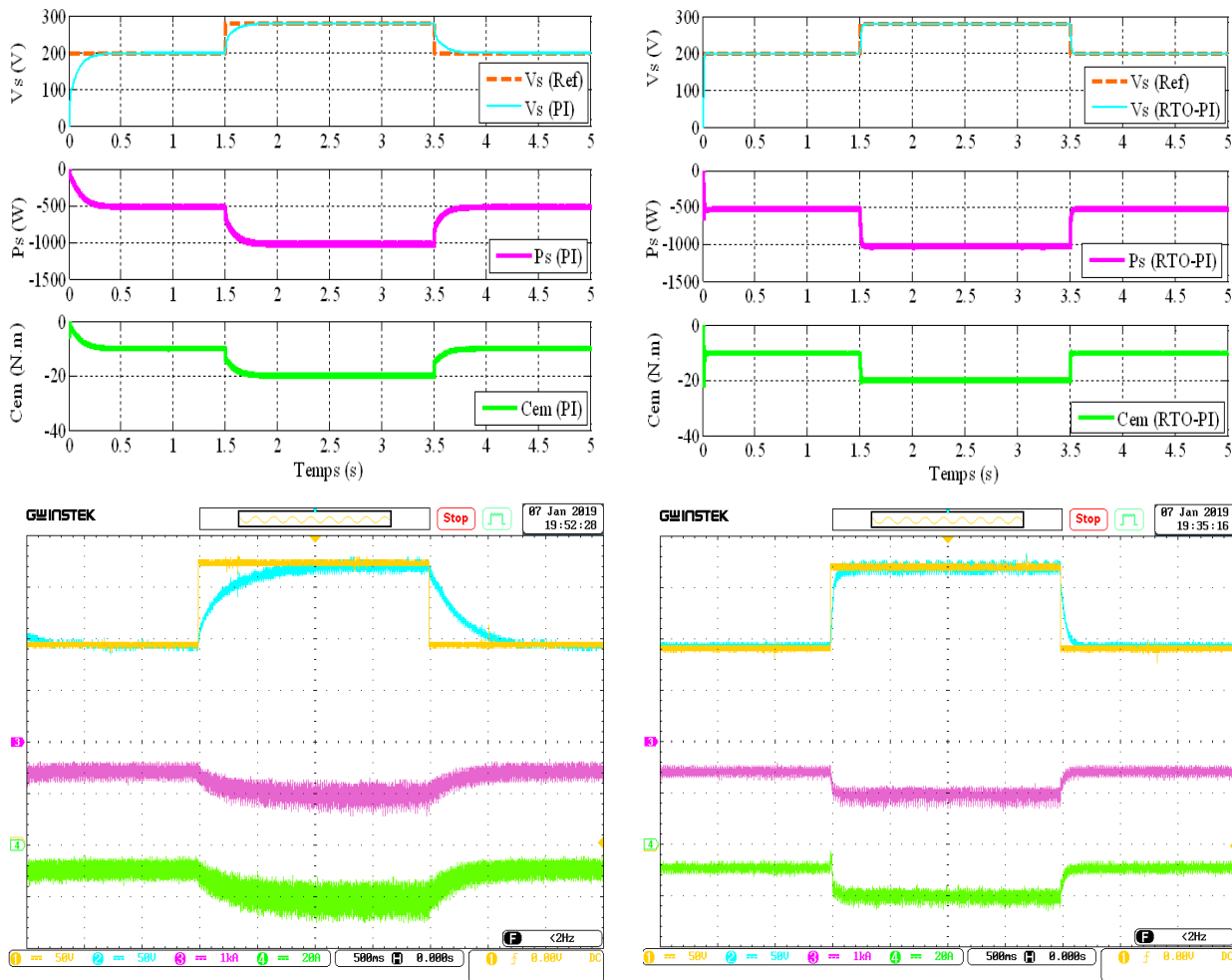
Figure. IV.13. La tension statorique et le courant rotorique pour le PI conventionnel et RTO-PI sous variation de tension, Ch1:L'amplitude de la tension statorique référence (50V/div.). Ch2: L'amplitude de la tension statorique (50V/div). Ch3: Phase de tension statorique (a) (250V/div). Ch4: Phase de courant rotorique current (a) (20A/div).



a. PI classique

b. RTO-PI

Figure. IV.14. La tension statorique, le courant statorique et rotorique pour le PI conventionnel et RTO-PI sous variation de tension, Ch1:L'amplitude de la tension statorique référence (50V/div.). Ch2: L'amplitude de la tension statorique (50V/div). Ch3: Phase de courant statorique (a) (5A/div). Ch4: Phase de courant rotorique current (a) (20A/div).



a. PI classique

b. RTO-PI

Figure. IV.15. La tension statorique, la puissance active et le couple électromagnétique. Ch1: L'amplitude de la tension statorique référence (50V/div.). Ch2: L'amplitude de la tension statorique (50V/div). Ch3: La puissance active statorique Ps (w) (1kw/div). Ch4: Le couple électromagnétique (20N.m/div).

➤ **Variation brusque de la charge**

Dans un deuxième essai et pour tester la robustesse du système, nous avons appliqué un échelon de charge résistive dont la valeur est située entre 1.5s et 3.5s. Les figures VI.16, VI.17 et VI.18 présentent le cas de la variation brusque de charge résistive (de 2 kw à 4 kw) pour les deux techniques de contrôle. On peut observer que la tension dans la liaison continue statorique suit bien sa tension de référence avec une présence des piques remarquable au niveau de la tension contrôlée avec le contrôleur PI classique.

Les résultats de simulations et expérimentaux confirme la robustesse et la capacité à minimiser la perturbation de charge du système avec le RTO-PI par rapport au régulateur PI (Voir les figures VI.16.b VI.17.b et VI.18.b). Les figures IV.16 et IV.17 montre que le courant et la

tension d'alimentation sont de formes sinusoïdales ce qui réduire la consommation de la puissance déformante. Le changement rapide du courant statorique et/ou rotorique montre que le système à une bonne réponse dynamique pour cette variation brusque de la charge pour les deux techniques.

L'appel en puissance active est important entre ces deux instants à cause de l'augmentation de la charge (Figure VI.18). On peut remarquer que lors du régime permanent que les oscillations sont relativement importantes au niveau de la puissance et du couple, contrôlés par le régulateur PI par rapport à celle obtenue par le contrôleur RTO-PI ce que dégrade le bon fonctionnement et les performances de la machine.

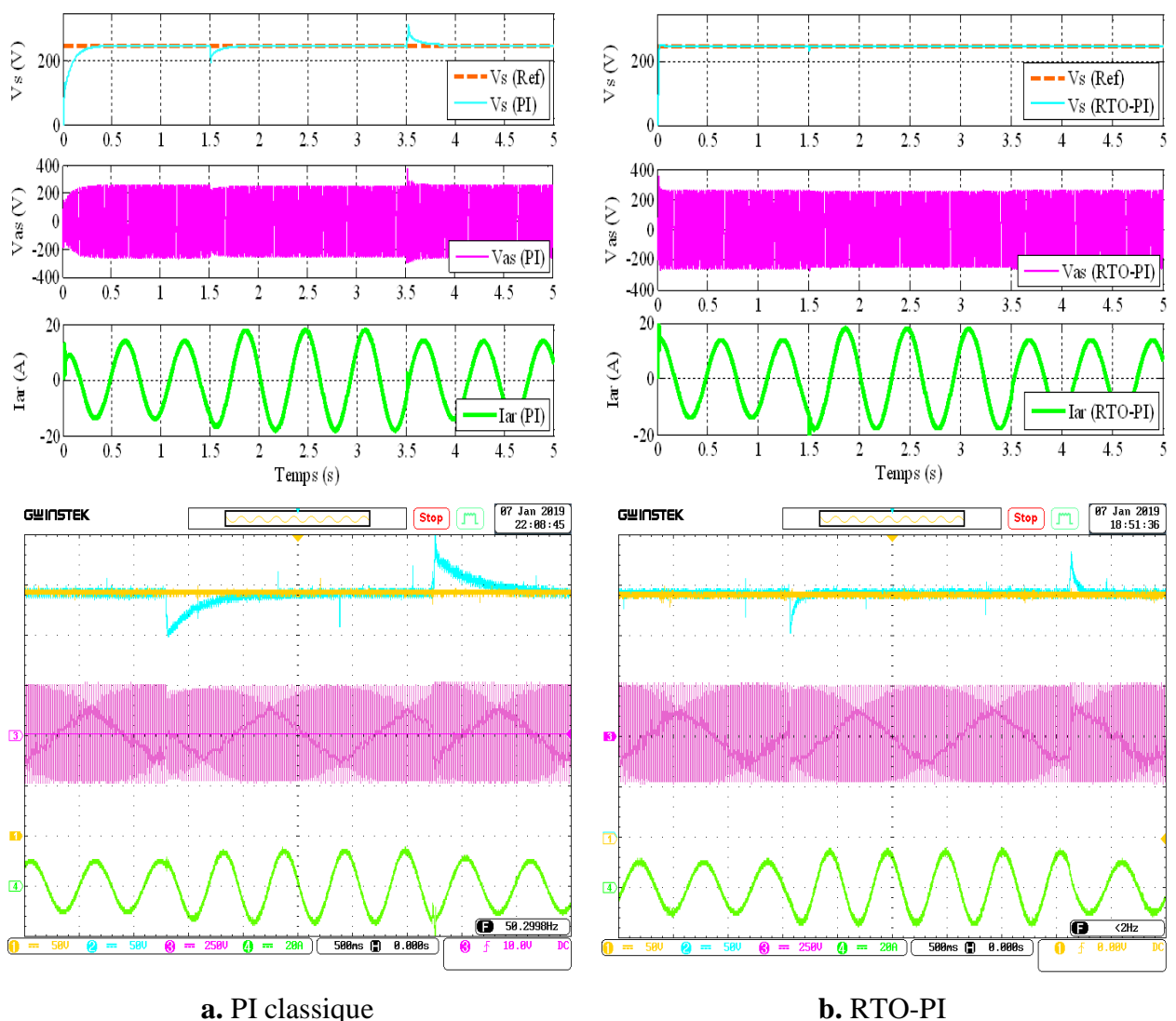
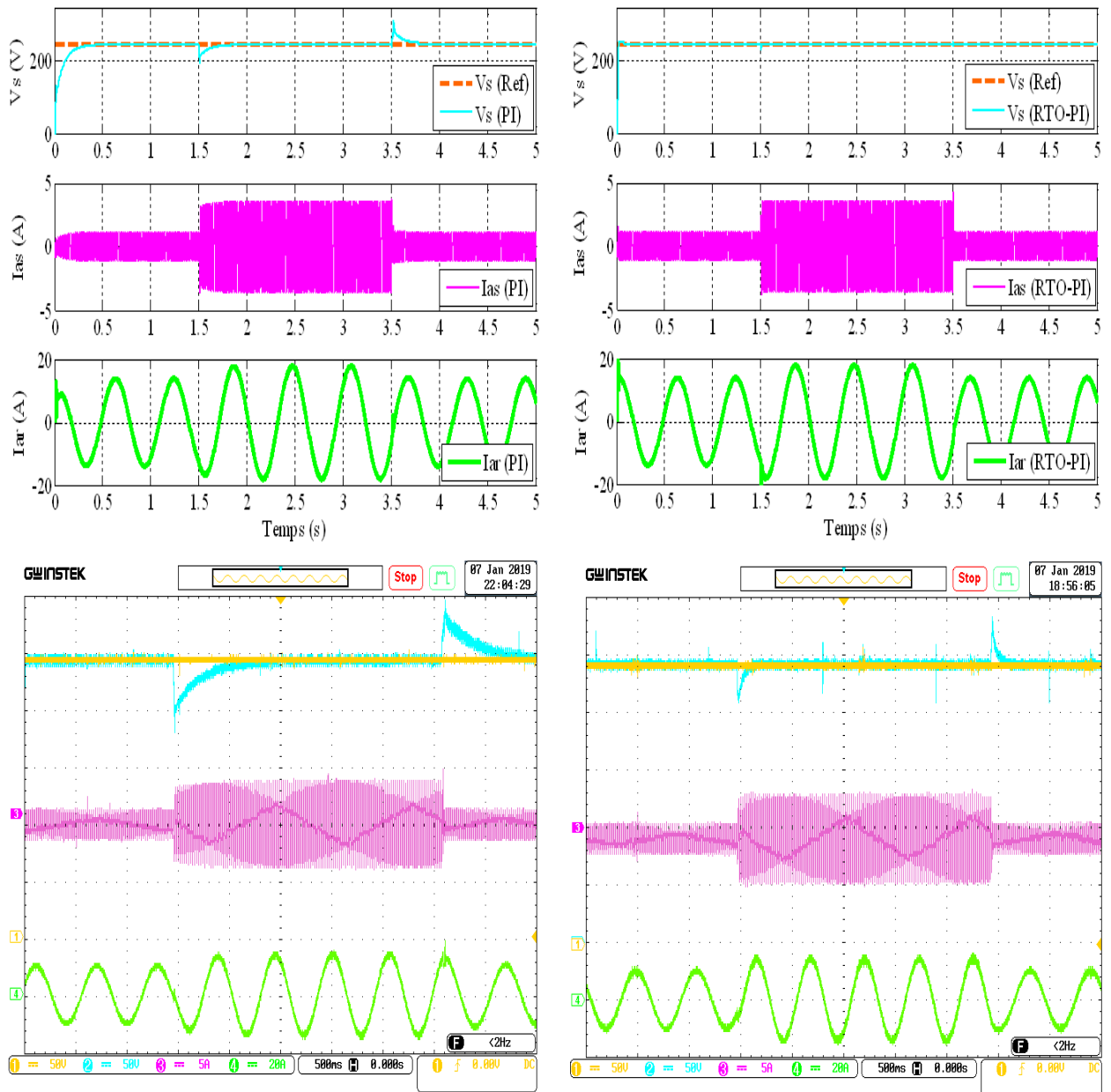


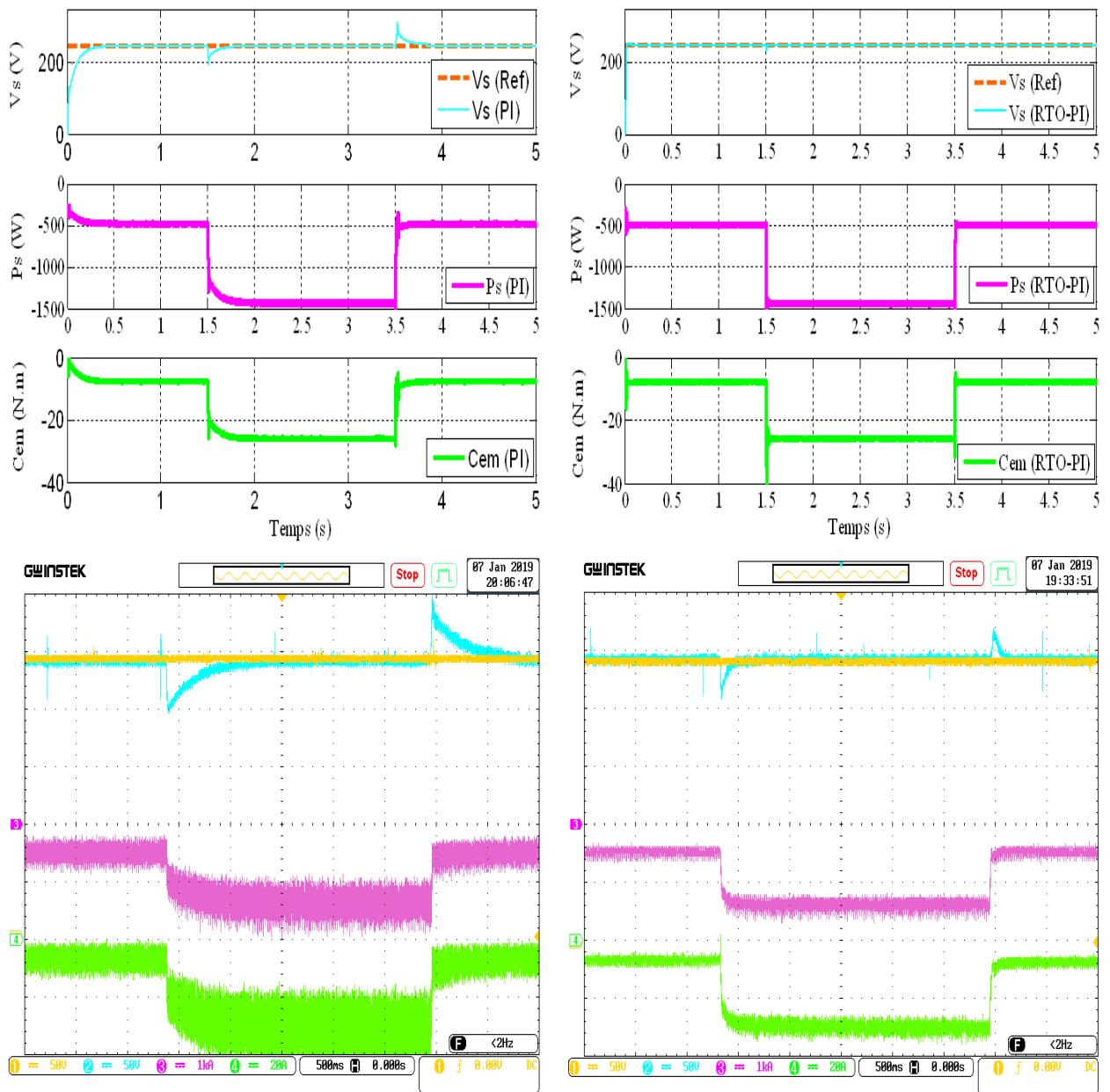
Figure. IV.16. La tension statorique et le courant rotorique pour le PI conventionnel et RTO-PI sous variation de tension, Ch1:L'amplitude de la tension statorique référence (50V/div.). Ch2: L'amplitude de la tension statorique (50V/div). Ch3: Phase de tension statorique (a) (250V/div). Ch4: Phase de courant rotorique (a) (20A/div).



a. PI classique

b. RTO-PI

Figure. IV.17. La tension statorique, le courant statorique et rotorique pour le PI conventionnel et RTO-PI sous variation de tension, Ch1:L'amplitude de la tension statorique référence (50V/div.). Ch2: L'amplitude de la tension statorique (50V/div). Ch3: Phase de courant statorique (a) (5A/div). Ch4: Phase de courant rotorique current (a) (20A/div).



a. PI classique

b. RTO-PI

Figure. IV.18. La tension statorique, la puissance active et le couple électromagnétique. Ch1: L'amplitude de la tension statorique référence (50V/div.). Ch2: L'amplitude de la tension statorique (50V/div). Ch3: La puissance active statorique Ps (w) (1kw/div). Ch4: Le couple électromagnétique (20N.m/div).

Les figures VI.19, IV.20 et VI.21 présentent l'analyse spectrale d'harmonique THD des courants rotorique et statorique ainsi que la tension statorique avec les régulateurs RTO-PI et PI. On peut constater que la technique RTO offre une amélioration pour la compensation d'harmoniques des courants et de la tension qu'avec la commande par la technique PI, ce qui

permet de minimiser la consommation de la puissance déformante, les pertes par effet Joule et d'améliorer le coefficient de déplacement.

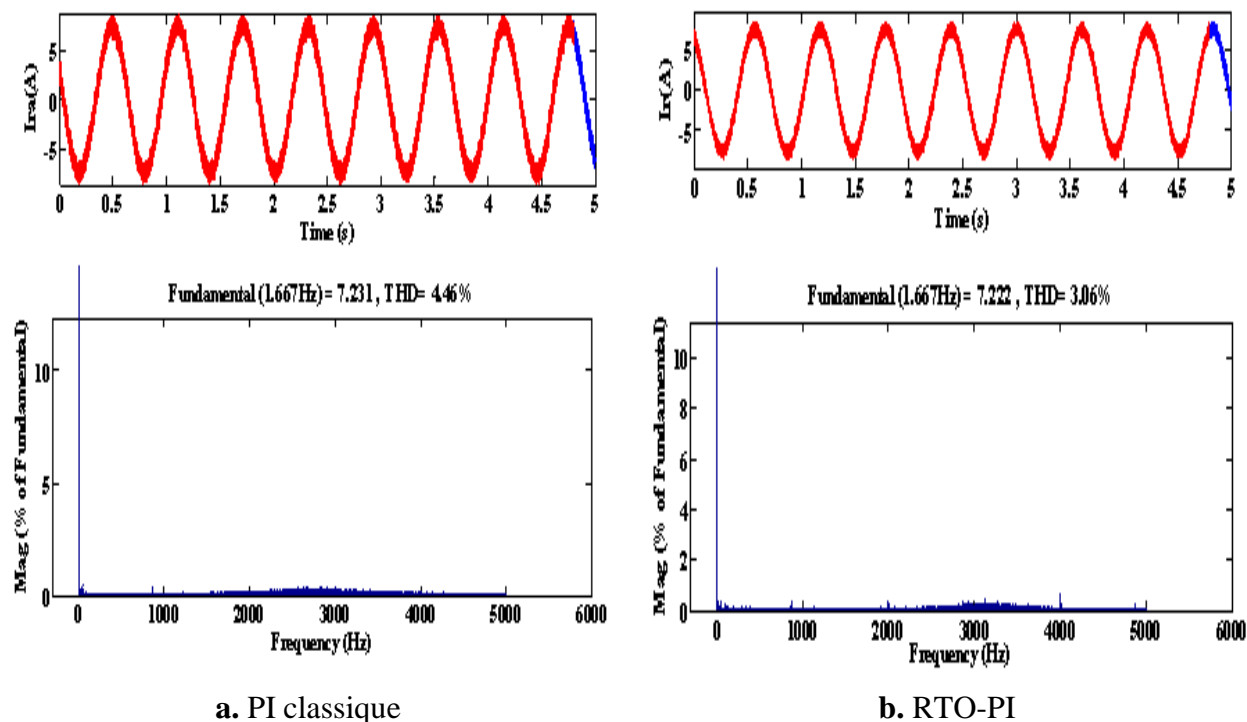


Figure. IV.19. Spectre d'harmonique du courant rotorique.

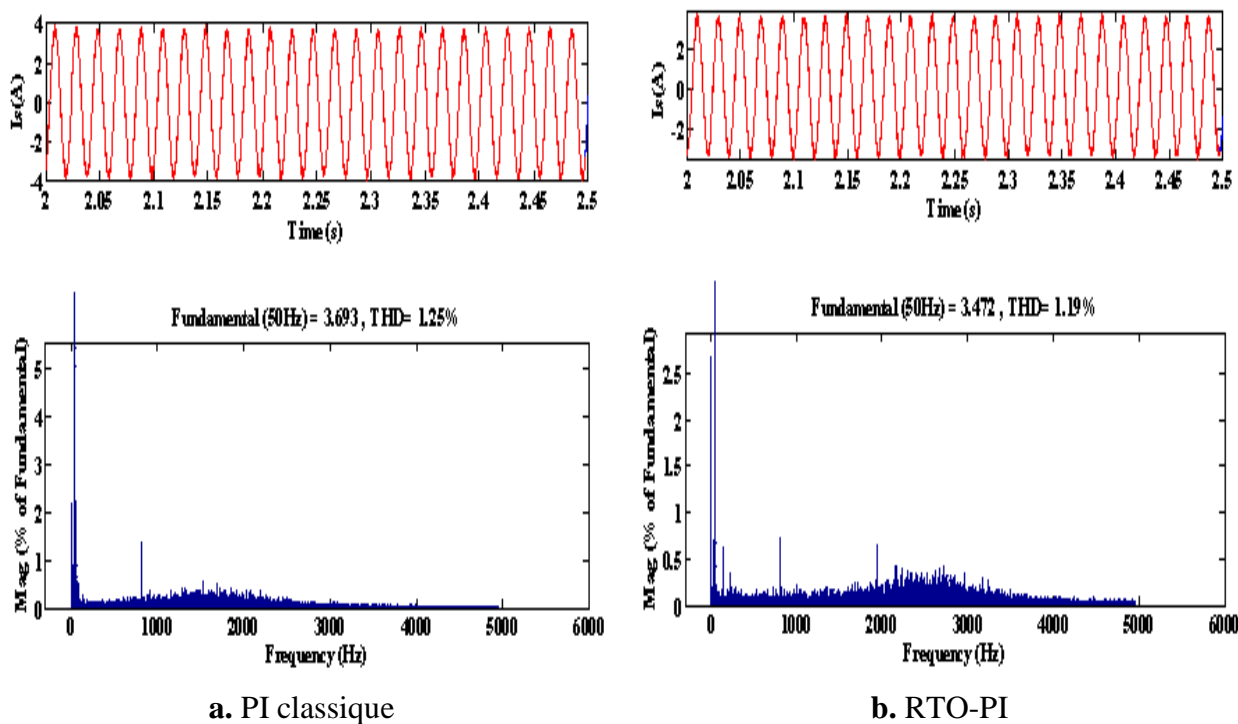


Figure. IV.20. Spectre d'harmonique du courant statorique.

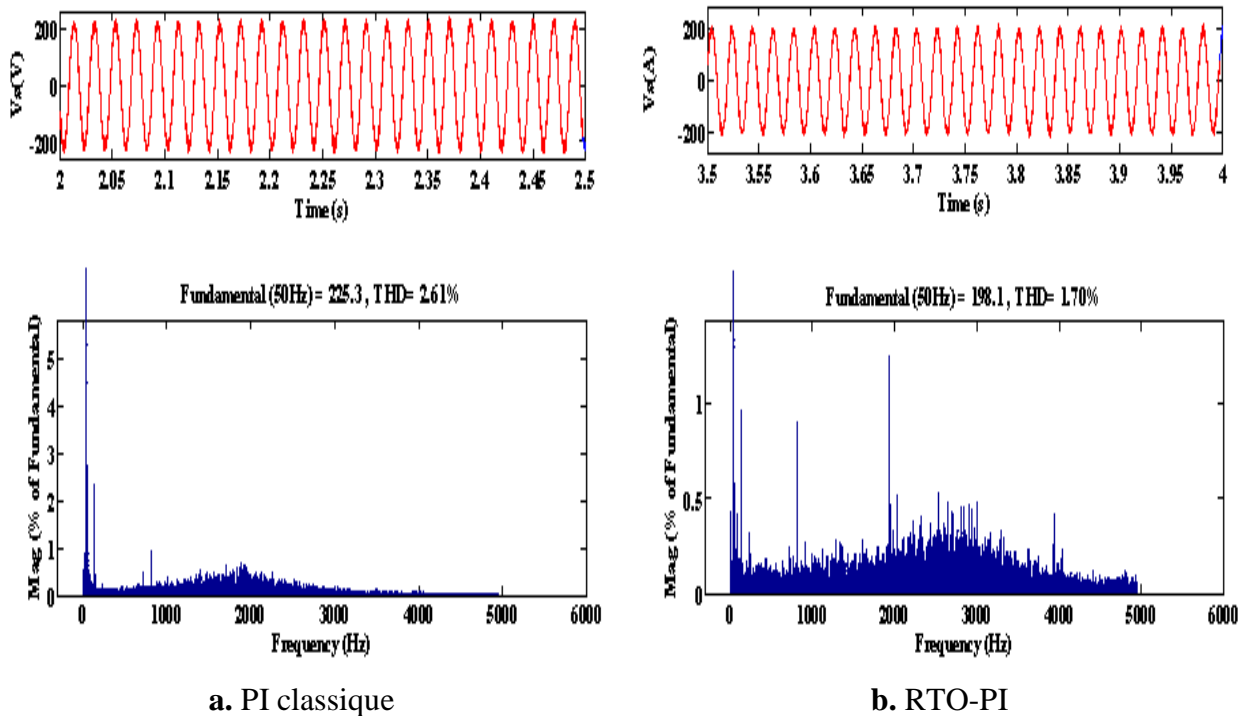


Figure. IV.21. Spectre d'harmonique de tension statorique.

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, on a utilisé deux stratégies de contrôle dans la boucle de régulation de la MADA connectée à une charge fixe: une nouvelle technique basée sur l'optimisation par les racines des arbres (RTO) et la structure conventionnelle (PI). La conception du régulateur à RTO-PI est faite pour l'optimisation de ces paramètres dans le but de minimiser l'erreur entre la valeur de consigne et réelle de la tension et/ou des courants, dans le régime transitoire et permanent et à chaque situation du système.

Les résultats de simulation et expérimentale obtenus montrent l'efficacité de la technique appliquée dans notre système, ce qui nous a permis de bien réguler la tension à la sortie du convertisseur, de réduire la consommation de la puissance réactive et déformante et de minimiser les harmoniques dans le courant ainsi que les ondulations de couple ce qui permet le bon fonctionnement du système globale.

*Conclusion Générale et Perspectives
Futures*

Conclusion Générale et Perspectives Futures

Le marché des énergies renouvelables a connu une évolution considérable durant ces dernières années. La consommation intensive de l'énergie électrique, l'instabilité des prix des hydrocarbures et le souci de préserver l'environnement ont conduit plusieurs pays à initier des programmes nationaux et internationaux destinés à produire de l'énergie électrique à partir de ressources renouvelables. La production d'énergie renouvelable, notamment celle du type éolien, se distingue par son caractère aléatoire et intermittent, qui est souvent à l'origine de sérieux problèmes causant des instabilités aux réseaux électriques, ainsi sont placés les objectifs souhaités de notre travail et où l'amélioration des performances et la maîtrise de l'exploitation de l'énergie éolienne constitue le souhait principal.

Pour se faire, nous avons su et pu traiter les points objectifs suivants :

- Une utilisation de la machine asynchrone à double alimentation pilotée par son convertisseur coté rotor (CCR), la modélisation et la commande robuste pour la régulation de la puissance active et réactive d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation alimentée (GADA) par des convertisseurs à deux niveaux coté rotor (CCR) à travers l'exploitation de l'énergie éolienne. L'utilisation de la technique MPPT nous a assurée un maximum en matière de puissance extraite du vent.
- Une nette amélioration de la qualité de l'énergie fournie au réseau électrique par la MADA et une synthèse de la commande robuste des grandeurs du GADA: Couple électromagnétique et le flux rotorique qui est la commande à structure variable particulièrement la commande par mode glissant d'ordre supérieur basée sur la commande directe du couple (DTC).
- Une maximale garantie en matière de niveau de tension et de fréquence requis, tout en assurant un partage efficace de la charge demandée par MADA en mode autonome. Pour améliorer la commande vectorielle classique, un algorithme d'optimisation par les racines des arbres (RTO) a été proposé afin d'optimiser le mieux possible et faisable les gains du régulateur PI ceci permettra et assurera un minimum en matière d'écart entre la valeur de référence et celle mesurée. Les résultats issus des simulations et des expérimentations

Conclusion Générale et Perspectives Futures

effectuées présentent une meilleure et nette amélioration des niveaux des tensions statoriques et des courants rotoriques de la MADA en mode autonome.

- Une mise en œuvre d'un banc d'essais expérimental développé et installé localement au laboratoire (LGEB) à l'université de Biskra, composé d'une machine asynchrone à rotor bobiné d'une puissance de l'ordre de trois (03) kW associée à une machine à courant continu d'une puissance de l'ordre d'un (01) kW, émulant l'aérogénérateur, piloté par une carte DSPACE (DS1104). Ceci nous grandement permet et assurer une validation expérimentale des résultats théoriques issus des simulations effectuées sur l'outil Matlab/Simulink.

D'après les résultats tirés des simulations et relevés des expériences pratiques, dans le cas de la MADA connectée à une charge, les constatations suivantes peuvent être mises en évidence :

- Les algorithmes à base de méthodes méta-heuristiques sont relativement compliqués du point de vue structure et de mise en œuvre en les comparant aux régulateurs utilisant le réglage conventionnel.
- La stratégie de commande utilisant les régulateurs classiques assure de résultats satisfaisant. Ces résultats sont, de plus en plus, mis en cause et en en échec par le manque, parfois flagrant, de la robustesse due, non seulement à une modélisation peu précise, mais aussi et principalement aux conditions de fonctionnement, telles que l'effet de variation de la charge et de la tension ou aussi des paramètres internes de la machine.
- La technique de commande basée sur l'algorithme d'optimisation par les racines d'arbres assure une meilleure qualité intrinsèque et offre aussi une excellente robustesse surtout vis-à-vis la variation des paramètres internes de la machine.
- L'algorithme à base de méthodes méta-heuristiques ne constitue aucunement un outil de substitut aux autres types de commande, mais, plutôt, une technique complémentaire utilisée, en particulier, pour la régulation des processus complexes ou aussi dans le cas d'absence de modèles convenables et bien précis des systèmes à réguler.

Conclusion Générale et Perspectives Futures

En se basant sur nos propres constatations et remarques issues de notre expérience tirée en fin de ce travail de recherche, nous proposons, en matière de **perspectives futures** et en termes de **continuité naturelle** de ce travail, ce qui suit :

- ✓ Une validation sur sites industriels des résultats théoriques de la MADA connectée au réseau électrique.
- ✓ En matière de développement et d'amélioration des performances dynamiques des systèmes d'entraînements et de commande, il est utile d'examiner la technique d'optimisation par RTO pour voir de près son impact sur les gains et aussi sur la matrice d'inférence des régulateurs flous ou sur d'autres régulateurs.

Références

Références

A

- [Abd 13] Sabrina ABDEDAIM, "Optimisation de deux Systèmes de Génération Renouvelable (Photovoltaïque et Éolienne) connectés au réseau", *Thèse Doctorat en sciences en Génie Electrique, Université Mohamed Khider-Biskra, 19 Décembre 2013.*
- [Abd 14] S. ABDEDAIM, A. BETKA, S. DRID, M. BECHERIF, "Implementation of MRAC Controller of A DFIG Based Variable Speed Grid Connected Wind Turbine", *Elsevier Energy Conversion and Management, Elsevier, 281-288, 2014.*
- [Abd 12] Lilia Abdelhalim, "Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement ", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Maîtrise des Energies, Université Hadj Lakhdar de Batna, 26 Avril 2012.*
- [Abd 00] E. S. Abdin, W. Xu "Control design and dynamic performance analysis of wind turbine-induction generator unit" *IEEE Trans. on Energy Converse, Vol. 15, No. 1, pp. 91-96, 2000.*
- [Abd 18] Fateh ABDOUNE, "Amélioration des performances des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à double alimentation", *Thèse Doctorat en Sciences, Systèmes Electro-énergétiques, Université A. Mira-Bejaia, 21 Février 2018.*
- [Afr 11] African Economic Outlook. www.oecd.org/dev/publications/africanoutlook, 2011.
- [Akk 10] Nadia AKKARI, "Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation", *Thèse Doctorat, Université de Batna, 02 juin 2010.*
- [Ard 16] Sid Ahmed el Mehdi ARDJOUN, "commande d'un système d'énergies renouvelables multi sources relié au réseau électrique", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Djillali Liabes - Sidi-Bel-Abbes, 18 Avril 2016.*

B

- [Bag 99] Lotfi BAGHLI, "Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques", *Thèse Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré Nancy-1, France, 14 Janvier 1999.*
- [Bat 00] H. D. BATTISTA, R. J. MANTZ, C. F. CHRISTIANSEN, "Dynamical Sliding Mode Power Control of Wind Driven Induction Generators", *IEEE, Vol. 15, Issue. 4, December 2000.*
- [Bec 13] Ali M. BECHOUCH, "Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : Application à une éolienne", *Thèse Doctorat en électrotechnique de l'Université, 22/04/2013.*

- [Bek 14] Youcef BEKAKRA, "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation ", *Thèse l'obtention Doctorat en sciences, Réseaux Electriques, Université Mohamed Khider Biskra, 21 Octobre 2014.*
- [Bek 17] Saiah. BEKKAR, Djelloul. SAIAHA, Amine. Boudghene. STAMBOULI, "Prospective analysis for a long-term optimal energy mix planning in Algeria: Towards high electricity generation security in 2062", *Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 73, Pages 26-43, June 2017.*
- [Bel 10] B. BELTRAN, "Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant D'ordre Supérieur", *Thèse Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2010.*
- [Ben 07] R. BENABID, "Optimisation multi objectif de la synthèse des FACTS par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques", *Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Amar Telidji, Laghouat, 2007.*
- [Ben 13] Afaf BENAMOR, "Commande Directe des Puissances d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau", *Thèse Magister en Électrotechnique, Maitrise d'énergies électriques, Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued, 08 Octobre 2013.*
- [Ben 19] A. BENAMOR, M.T. BENCHOUIA, K. SRAIRI, M.E.H. BENBOUZID, "A new rooted tree optimization algorithm for indirect power control of wind turbine based on a doubly-fed induction generator", *ISA Transactions, Elsevier, Vol. 88, pp. 296-306, May 2019.*
- [Bena 19] A. BENAMOR, M.T. BENCHOUIA, K. SRAIRI, M.E.H. BENBOUZID, "A novel rooted tree optimization apply in the high order sliding mode control using super-twisting algorithm based on DTC scheme for DFIG", *Electrical Power and Energy Systems, Vol. 108, pp. 293-302, June 2019.*
- [Ben 12] F. BENCHABANE, A. TITAOUINE, O. BENNIS, K. YAHIA, D. TAIBI, "Sensorless fuzzy sliding mode control for permanent magnet synchronous motor fed by AC/DC/AC converter", *International Journal of System Assurance Engineering and Management, Vol. 3, N° 3, pp. 221-229, 2012.*
- [Benn 19] Fateh BENNACEUR, Nachida Kasbadji MERZOUK, Mustapha MERZOUK, Ahmed HADJI, "Technical and economic viability of a wind farm installed in a windy area of Algerian western south region", *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, pp. 4-7, 2019.*
- [Ben 11] H. BENANNI, "Machine asynchrone à double alimentation : Les lois de commande en régime permanent", *Thèse Doctorat, Université de Laval, Québec, 2011.*
- [Ben 92] U. BENZ, "Réglage par Mode de Glissement Hybride, Applique au Réglage de Position de Systèmes Electromécaniques", *Thèse Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 1992.*
- [Ber 99] P. BERLU, "Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance", *Thèse Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.*

- [Bor 15] Abdelhalim BORNI, "Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique", *Thèse Doctorat en sciences en électrotechnique, Modélisation des machines électriques, Université Constantine 1, 12 Mars 2015.*
- [Bou 07] T. BOUAOUICHE, "Commande à Structure Variable et Etude de l'Intégration d'Eolienne à base de Machine Asynchrone à Double Alimentation sur le Réseau Electrique" *Thèse Doctorat, Au Centre de Recherches et de Transfert de Technologie de Saint-Nazaire, 7 Mai 2007.*
- [Bou 15] Zinelaabidine BOUDJMA, "Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque)", *Thèse Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali Liabes, Sidi bel-Abbès, 10 Février 2015.*
- [Bou 15] Abderrahmen BOUGUERRA, "Commande Tolérante aux Défauts d'un Appareil à Vol Vertical", *Thèse Doctorat en sciences, Université de M'Sila, 05 Mars 2015.*
- [Bou 07] Abdelmadjid BOUMEDEIENE, "Recherche et développement de nouvelles approches de commandes d'une machine synchrone autopilotée alimentée en tension" *Thèse Doctorat, ENP Alger, 2007.*
- [Bou 16] Elhadj BOUNADJIA, Abdelkader DJAHBAR, "Direct Torque Control of Saturated Doubly-Fed Induction Generator using High Order Sliding Mode Controllers", (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 7, N° 7, 2016.*
- [Boy 06] Armand BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," *Thèse Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 11 Décembre 2006.*

C

- [Cam 03] Haritza CAMBLONG, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génératrice d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variables", *Thèse Doctorale, Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métiers Centre de Bordeaux, 18 Décembre 2003.*
- [Can 00] C. CANUDAS, "Commande des moteurs asynchrones Volume 1 : Modélisation, contrôle vectoriel et DTC", HERMES Science Europe Ltd, pp. 183-213, 2000.
- [Cha 10] Azeddine CHAIBA, "Commande de la Machine asynchrone a double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle" *Thèse Doctorat en Sciences, en Electrotechnique, Université de Batna, 11 Juillet 2010.*
- [Chi 17] Said CHIKHA, "Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne", *Thèse Doctorat en Sciences en génie électrique de Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, 03 Juillet 2017.*
- [Chi 13] Abdesselem CHIKI, "Conception d'une commande floue directe du couple (FDTC) de la machine asynchrone basée sur la SVM", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université de Batna, 2 Février 2013.*
- [Col 02] Y. COLLETO, P. SIARRY, "Optimisation multi-objectif", EYROLLES, November 2002.

- [Cou 08] V. COURTECUISSÉ, "Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique", *Thèse Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, le 20 Novembre 2008.*

D

- [Dai 11] T. DAIDO et A. AL, "Study on a start-up method during a blackout of a doubly fed induction generator applied to gas engine cogeneration system", *The 8th International Conference on Power Electronics, Korea, June 2011.*
- [Dav 07] A. DAVIGNY, "Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie," *Thèse Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.*
- [Dep 88] M. DEPENBROAK, "Direct Self-Control (DSC) of Inverter-Fed Induction Machine", *IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 3, N°. 4. Oct, pp. 420-429, 1988.*
- [Djer 15] Youcef DJERJIR, "Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Option Commande Electrique, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 05 Novembre 2015.*

E

- [Edj 16] Essaid EDJEKOUANE, "Contribution à la Commande et à l'Observation des Systèmes Mécatroniques" *Thèse Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 04 Juillet 2016.*
- [Ela 03] S. El AIMANI, "Modelling and simulation of doubly fed induction generator for variable speed wind turbines integrated in a distribution network", *In: 10th European, 2003.*
- [Ela 04] S. El AIMANI, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", *Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lille, Université des Sciences et Technologies de Lille, 06 Décembre 2004.*
- [Elb 06] A. ELBACHA, M. T. LAMCHICHI, M. CHERKAOUI, "Contrôle direct de couple d'une machine asynchrone, système de régulation de vitesse avec anti emballement", *Physical and Chemical News, ISSN 1114-3800, pp. 128-134, 2006.*
- [Emi 63] S.V. EMILYANOV, "On peculiarities of variables structure control systems with discontinuous switching functions", *Doklady ANSSR, Vol. 153, pp. 776-778, 1963.*

F

- [Fer 12] Lai FERN Ow, Eng Koon SIM, "Detection of urban tree roots with the ground penetrating radar Plant", *Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology: Official Journal of the Societa Botanica Italiana, Vol. 146, , pp. 288-297, 2012.*

G

- [Gai 10] Arnaud GAILLARD, "Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service", *Docteur Université Henri Poincaré, Nancy-I en Génie Electrique, 30 avril 2010.*
- [Gao 95] W. GAO, Y. WANG, A. HOMAIFA, "Discrete-Time Variable Structure Control Systems", *IEEE Trans. on Ind. Elec, Vol. 42, N°. 2, Aprl, pp. 117-122, 1995.*
- [Ghe 11] T. GHRNNAM, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation", *Thèse Doctorat, l'Ecole Centrale de Lille et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.*
- [Gho 01] R. GHOSN, "Contrôle Vectoriel de la Machine Asynchrone à Rotor Bobiné à Double Alimentation", *Thèse Doctorat, ENSEEIHT, Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre 2001.*

H

- [Had 17] Brahim HADDAH, Abdelkrim LIAZID, Paula FERREIRA, "A multi-criteria approach to rank renewables for the Algerian electricity system", *Renewable Energy Vol. 107, pp. 462-472, July 2017.*
- [Had 09] A. Hamida HADRI, A. ALLAG, M. Y. HAMMOUDI , S. M. MIMOUNE , S. ZEROUALI, M. Y. AYAD, M. BECHERIF, E. MILIANI, A. MIRAOU, "nonlinear adaptive backstepping approach applied to a three phase PWM AC-DC converter feeding induction heating", *Elsevier, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 14, N°. 4, pp. 1515-1525, 2009.*
- [Ham 13] Naouel HAMDI, "Amélioration des performances des aérogénérateurs", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Modélisation et Commande des Machines Electriques, Université Constantine 1, 03 Juillet 2013.*
- [Hus 09] Ayman HUSSAIN, "Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants", *Thèse Doctorat Université de Reims champagne, 2009.*

I

- [Idj 10] M. Kassa IDJDARENE, "Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira-Béjaia et Lille 1(France), 23 Mai 2010.*

K

- [Ken 12] Fairouz KENDOULI, "Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique de Université Mentouri de Constantine, 2012.*

- [Kha 14] Abdeloahab KHATTARA, "Modélisation, Commande et Gestion de l'énergie d'un Générateur Eolien", *Thèse Doctorat en Science, Génie Electrique, Université Mohamed Khider–Biskra, 01 Décembre 2014.*
- [Kja 05] S.B. KJAER, J.K. PEDERSEN, F. BLAABJERG, "A Review of single-phase grid connected inverters for photovoltaic modules", *IEEE transactions on industry applications, Vol.41, N°.5, pp.1292-1305, September/October 2005.*
- [Kou 02] K. KOUZI, "Commande vectorielle d'un moteur à induction sans capteur vitesse par un réglage PI-Flou à gains flou adaptés associé à un observateur d'état par mode de glissement", *Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de Magister, Université de Biskra, 2002.*

\mathcal{L}

- [Lab 16] Yacine LABBI, Djilani BEN ATTOUS, A. Hossam GABBAR, Belkacem MAHDAD, Aboelsood ZIDAN, "A new rooted tree optimization algorithm for economic dispatch with valve-point effect", *Electrical Power and Energy Systems 79 pp. 298–311, 2016.*
- [Lei 07] Ding LEI, Pan ZHENCUN, Su Yongz HI, et AL, "Splitting and is landing of networked dispersed generators", *Electric Power Automation Equipment, Vol. 27, N°7, pp. 25-29, 2007.*
- [Liu 12] Yaping Liu, Shuo Zhang, Baosheng Wang, "MR-PBGP: A Multi-Root Tree Model for Parallel BGP", *IEEE 14th International Conference on High Performance Computing and Communications, N°.IRT1012. 978-0-7695-4749, 2012.*
- [Llo 04] A. LLOR, B. ALLARD, L. XUEFANG, J. M. RETIF, "Comparison of DTC implementation for Synchronous machines", *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. IEE 35 th annual, Vol. 5, N°. 20-25, pp. 3581-3587, June 2004.*
- [Lop 07] M. LOPEZ, "contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée," *Thèse Doctorat, Université de Paris-Sud 11, France, 2007.*
- [Lou 16] Mourad LOUCIF, "Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur", *Thèse Doctorat 3ème Cycle Génie Electrique, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 12 May 2016.*

\mathcal{M}

- [Mac 02] M. MACHMOUM, F. POITIERS, C. DARENGOSSE, A. QUERIC, "Dynamic performances of a doubly-fed induction machine for a variable-speed wind energy genery generation power System Technology", *Proceedings International Power Conference 2002. Vol. 4, pp. 2431-2436, 13-17. October. 2002.*
- [Men 07] A. MENACER, "Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à indication pour diagnostic et développement de commande robuste ; robuste vis-à-vis de défaut", *Thèse Doctorat, Université de Batna Décembre 2007.*

- [Mer 16] Aimene Merzak, "Services au système et gestion d'interactions énergétiques transitoires dans un parc éolien of shore", *Thèse Doctorat Energie électrique, Université du Havre, Français, 12 October 2016.*
- [Mer 12] M.S. MERZOUGA, H. BENALLA, L. LOUZE, "Sliding mode control (SMC) Of permanent magnet synchronous generators (PMSG)", *Energy Procedia Vol.18, pp. 43 – 52, 2012.*
- [Min 19] Ministère de l'Energie 2019, <http://www.energy.gov.dz>
- [Mir 05] A. MIRCKI, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", *Thèse Doctorat De L'Institut national polytechnique de Toulouse, Février 2005.*
- [Mon 12] P. MONJEAN, "Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et on shore équipées de liaisons en continu", *Thèse Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2012.*
- [Mul 03] B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, H. BENAHMED, "Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne", *JCGE '03, Saint-Nazaire, 5 et 6 Juin 2003.*

N

- [Naa 05] A. NAASSANI, E. MONMASSON, j.p. LOUIS, "Synthesis of direct torque and rotor flux control Algorithms by means of sliding-mode theory", *IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, N°. 3, pp. 785- 799, June 2005.*
- [Nia 17] H. NIAN, C. WU, P. CHENG, "Direct Resonant Control Strategy for Torque Ripple Mitigation of DFIG Connected to DC Link through Diode Rectifier on Stator", *IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, N°.9, pp. 6936–45, 2017.*
- [Nes 07] A. NESBA, "Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone" *Thèse Doctorat d'état, ENP, 2007.*

P

- [Pen 96] RS. PENA et A. AL, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine", *IEE Proc Electric Power Appl; 143:380-7, 1996.*
- [Per 82] Thomaso PERRY, "The ecology of tree roots and the practical significance there", of *Journal of arboriculture Vol.8, N°.8, August 1982.*
- [Per 19] Perspective monde, date de consultation: 28/2/2019, source: Banque mondiale.
- [Poi 03] Frederic POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome- Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", *Thèse Doctorat en Sciences en Electronique et Génie Electrique, Université de Nantes Français, 19 décembre 2003.*

\mathcal{R}

- [Ram 00] D. RAMUZ, "Machine Généralisée Alimentée par Deux Convertisseurs", *Thèse Doctorat, UFR des Science Techniques et Gestion de l'industrie, Université de Franche-Comté- Mai 2000.*
- [Rez 15] Salam Eddine REZGUI, "Techniques de commande avancées de la machine asynchrone : étude comparative et application", *Thèse Doctorat en sciences, Université de Frères Mentouri Constantine, 08 Juin 2015.*
- [Ria 17] Lea RIACHY, "Contribution à la commande d'un onduleur multi niveaux, destinée aux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques ", *Thèse Doctorat en Génie Electrique, Université le Havre Normandie, 15 Décembre 2017.*
- [Rou 16] Riyadh ROUABHI, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Batne2, 01 Décembre 2016.*

\mathcal{S}

- [Sag 98] C. SAGET, "La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne", *REE, N°. 7, pp. 42-48, Juillet 1998.*
- [Sal 97] Lucas SALUDJIAN, "Optimisations en Electrotechnique par Algorithmes Génétiques", *Thèse Doctorat en sciences, de Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, Français, 27 Juin 1997.*
- [Sch 99] E. SCHAEFFER, "Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils Paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts", *Thèse Doctorat, Université de Nantes 1999.*
- [Seb 14] H. SEBAA, KR. Guerriche GUERRICHE, T. BOUKTIR, "Optimal Sizing and Placement of Renewable Energy Source in Large Scale Power System using ABC", *In Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), IEEE International Ouarzazate, Morocco, pp. 294–299, 17-19 Oct. 2014.*
- [Seg 06] Guy. SEGUIER, "Convertisseurs De l'électronique De Puissance: La Conversion Alternative-Continue", *Vol.1, 3ème éditions, Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 2006.*
- [Shi 82] Yossi SHILOACH, Uzi VISHKIN, "O (log n) Parallel Connectivity Algorithm", *Journal of algorithms 3, pp. 57-67, 1982.*
- [Sid 11] Lilia SIDHOM, "Sur les différentiateurs en temps réel: algorithmes et applications", *Thèse Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France 29/09/2011.*
- [Slo 91] J. J. E. SLOTINE, Weiping. LI, "Applied nonlinear control", *Prentice Hall, ISBN 0-13-040890-5, 1991.*

\mathcal{T}

- [Tak 86] I. TAKAHASHI, T. NOGUCHI, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-22, pp. 820–827, 1986.
- [Tak 89] I. TAKAHASHI, Y. OHMORI, "High-Performance Direct Torque Control of An Induction Motor", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 25, Issue: 2, pp. 257-264, Mar/Apr 1989.
- [Tal 16] Hicham TALHAOUI, "Contrôle par mode glissant : Observation et estimation paramétrique d'une machine à induction avec défauts", *Thèse Doctorat en sciences, Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra*, 28 Janvier 2016.
- [Tam 15] Azzouz TAMAARAT, "Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra*, 08 Décembre 2015.
- [Tan 04] K. TAN and S. ISLAM, "Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors", *IEEE Transaction on energy Conversion*, Vol. 19, N°. 2, pp. 392-399, June 2004.
- [Tou 15] Abdelwahed. TOUATI, E. ABDELMOUNIM, M. ABOULFATAH, Abd elmjid. ABOULOIFA, "Design of an MPPT based on the torque estimator for variable speed turbines", *1 st International Conference on Electrical and Information Technologies ICEIT'2015, IEEE, Marrakech, Morocco*, 978-1-4799-7479, 5/15, 2015.
- [Tou 08] Riad TOUFOUTI, "Contribution a la commande directe du couple de la machine asynchrone", *Thèse Doctorat en sciences, en électrotechnique, machines électriques, Université Mentour Constantine*, 02 Juin 2008.
- [Tsi 89] J. TSINIAS. Sufficient, LYAPUNOV, "Conditions for stabilization. Mathematical Control Signal Systems", *Mathematics of Control, Signals, and Systems*, Vol. 2, Issue 4, pp. 343-357, December 1989.
- [TSO 97] H.S. Tsoukalas, R. E. Uhrig "Fuzzy and neural approaches in engineering" *New York: Wiley and Sons*, 1997.

\mathcal{U}

- [Utk 93] V. UTKIN, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993.
- [Utk 99] V. UTKIN, J. GULDNER, j. SHI, "Sliding Mode Control in Electromechanical systems", *Taylor and Francis*, ISBN: 0-7484-0116-4, 1999.

\mathcal{V}

- [VID 04] Paul-Etienne VIDAL, "Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation", *Thèse Doctorat, Génie Électrique, L'institut National Polytechnique de Toulouse*, soutenue le 14 décembre 2004.

W

- [Wan 12] Y. WANG, "Evaluation de la Performance des Réglages de Fréquence des Eoliennes à l'Echelle du Système Electrique : Application à un Cas Insulaire", *Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille. 20 Novembre 2012.*

Y

- [You 99] K. YOUNG, V. UTKIN, O. ZGUNER, "A control engineer's guide to sliding mode control", *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 7 :328–342, 1999.

Z

- [Zeg 14] S. ZEGHLACHE, "Commande non linéaire d'un appareil à vol vertical", *Thèse Doctorat, Université de M'Sila, 2014.*
- [Zha 10] Shaozhong. ZHANG, Jingjing YANG, "Analysis of User Critical Interests Based on an Improved Shortest Root Tree Algorithms", *IEEE*, 978-1-4244-6789, 1 October 2010.

Annexes

Annexe A

A.1. Calcul des paramètres du régulateur PI pour la MADA

Les régulateurs à action proportionnelle-intégrale PI sont très répandus dans le domaine de la commande des machines électriques, l'action du régulateur proportionnelle P assure la rapidité de la réponse dynamique, et l'action du régulateur intégral élimine l'erreur statique en régime permanent.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place deux boucles des régulations ; boucle de régulation de puissance et de courant.

➤ Boucle des puissances

Nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation, nous négligeons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Les boucles de régulation des puissances P_s^* et Q_s^* peuvent se présenter par la figure A.1.

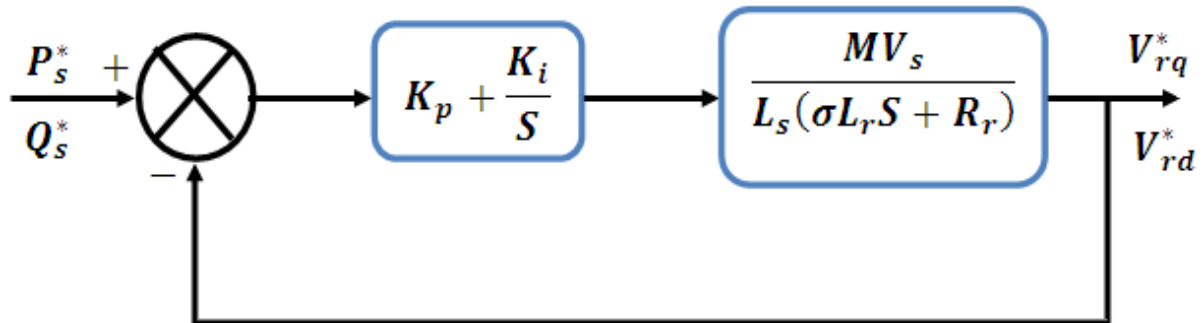


Figure. A.1. Schéma de régulation des puissances P_s^* et Q_s^* .

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q . Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (\text{A.1})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure A.1 s'écrit comme suit :

$$FTBO(S) = \frac{K_i}{S} \left(S \frac{K_p}{K_i} + 1 \right) \cdot \left(\frac{MV_s / L_s R_r}{\sigma T_r S + 1} \right) \quad (\text{A.2})$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par éliminer le zéro de la fonction de transfert est conduit à l'égalité suivant :

$$\sigma T_r = \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{A. 3})$$

$$\text{Où : } T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Après la compensation la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(S) = \frac{K_i M V_s}{S L_s R_r} \quad (\text{A. 4})$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre de la fonction de transfert sous la forme suivant :

$$G(S) = \frac{1}{1 + \tau S} \quad (\text{A. 5})$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) sera :

$$FTBF(S) = \frac{K_i M V_s / S L_s R_r}{1 + \frac{K_i M V_s}{S L_s R_r}} \quad (\text{A. 6})$$

Par analogie l'expression (A. 6) par l'expression (A. 4), on obtenir :

$$\tau = \frac{L_s R_r}{K_i M V_s} \quad (\text{A. 7})$$

τ : Est le temps de réponse du système.

Par l'expression (A.3) et (A.7), on trouve :

$$\begin{cases} K_p = K_i \sigma T_r = \frac{\sigma L_s L_r}{\tau M V_s} \\ K_i = \frac{L_s R_r}{\tau M V_s} \end{cases} \quad (\text{A. 8})$$

La constante du temps du système est égale $\tau = 0.001s$.

➤ **Boucle des courants**

Les fonctions de transferts des courants rotoriques directe et quadrature sont obtenues à partir de l'équation (A. 9) et par l'annulation des termes de découplages par les termes de compensations :

$$\frac{i_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r S} ; \frac{i_{rq}}{V_{rq}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r S} \quad (\text{A. 9})$$

La boucle de régulation des courants i_{rd} et i_{rq} peut se présenter par le schéma bloc de la figure A.2 :

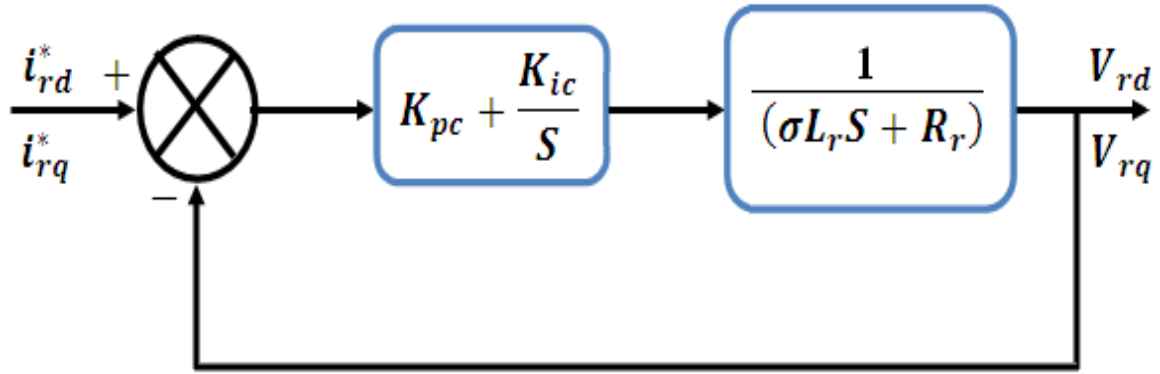


Figure. A.2. Schéma de régulation des courants i_{rd} et i_{rq} .

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q . Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI(S) = K_{pc} + \frac{K_{ic}}{S} \quad (\text{A. 10})$$

La FTBO de la figure A.2 comme suit :

$$FTBO(S) = \frac{K_{ic}}{S} \left(S \frac{K_{pc}}{K_{ic}} + 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_r \left(1 + \frac{\sigma L_r}{R_r} S \right)} \right) \quad (\text{A. 11})$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par éliminer le zéro de la fonction de transfert est conduit à l'égalité suivant :

$$\sigma T_r = \frac{K_{pc}}{K_{ic}} = \frac{\sigma L_r}{R_r} \quad (\text{A. 12})$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant comme suit :

$$FTBO(S) = \frac{K_{ic}}{R_r S} \quad (\text{A. 13})$$

Donc la FTBF de la figure II.22 sera :

$$FTBF(S) = \frac{K_{ic}/R_r S}{1 + \frac{K_{ic}}{R_r S}} \quad (\text{A. 14})$$

Par analogie de l'expression (A.14) par l'expression (A.5), on trouve :

$$\tau = \frac{R_r}{K_{ic}} \quad (\text{A. 15})$$

$$\begin{cases} K_{pc} = K_{ic} \sigma T_r = \frac{\sigma L_r}{\tau} \\ K_{ic} = \frac{R_r}{\tau} \end{cases} \quad (\text{A. 16})$$

A.2. Paramètres du système éolien

Tableau. A.1. Paramètres de la turbine éolienne.

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique</i>
Nombre des pales	3
Rayon du rotor R	3m
Gain du multiplicateur de vitesse G	5.4
Moment d'inertie total J	$0.2Kg\ m^2$
Coefficient de frottement visqueux f	$0.001N.m\ s/rad$
Valeur de la densité d'air ρ	$1.22Kg/m^3$

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

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique</i>
Puissance nominale P_n	4kW
Courant nominal I_n	15/8.6A
Tension nominale statorique V_s	220/380V
Fréquence nominale statorique f	50Hz
Vitesse nominale	1440tr/min
Résistance statorique R_s	1.2Ω
Résistance rotorique R_r	1.8Ω
Inductance statorique L_s	0.1554H
Inductance rotorique L_r	0.1568H
Inductance mutuelle M	0.15H
Nombre de paires de pôles p	2

Annexe B

B.1. Mise en œuvre de la commande numérique

La carte DSPACE1104 est une interface entrée-sortie (I/O) entre l'électronique de puissance et la partie logicielle appelée MATLAB/Simulink/Control desk. Pour chaque période d'échantillonnage, le Ds1104 reçoit les signaux d'entrée des capteurs (courants, tensions des ports ADC et vitesse du codeur via les ports INC) et génère les signaux de commande numériques. Ces signaux sont fournis par le programme MATLAB/Simulink avec une (real-time interface RTI), où les ports d'entrée/sortie du DS1104 sont accessibles dans la bibliothèque de Simulink.

La carte contrôleur DSPACE1104 est illustrée à la figure B.1. Le processeur principal du DS1104 est le MPC8240 avec un noyau Power PC 603e de 250MHz. Il a une mémoire de DRAM synchrone de 32 Mo et une mémoire flash de démarrage de 8 Mo pour les applications.

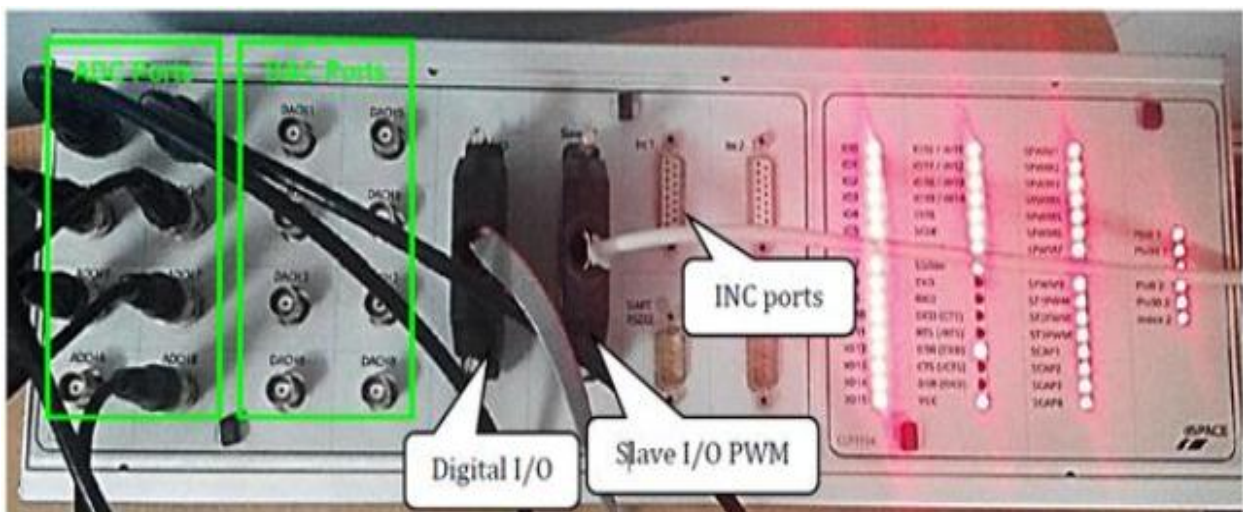


Figure. B.1. Carte DSPACE1104.

La figure B.2 illustre les caractéristiques de la carte DS1104.

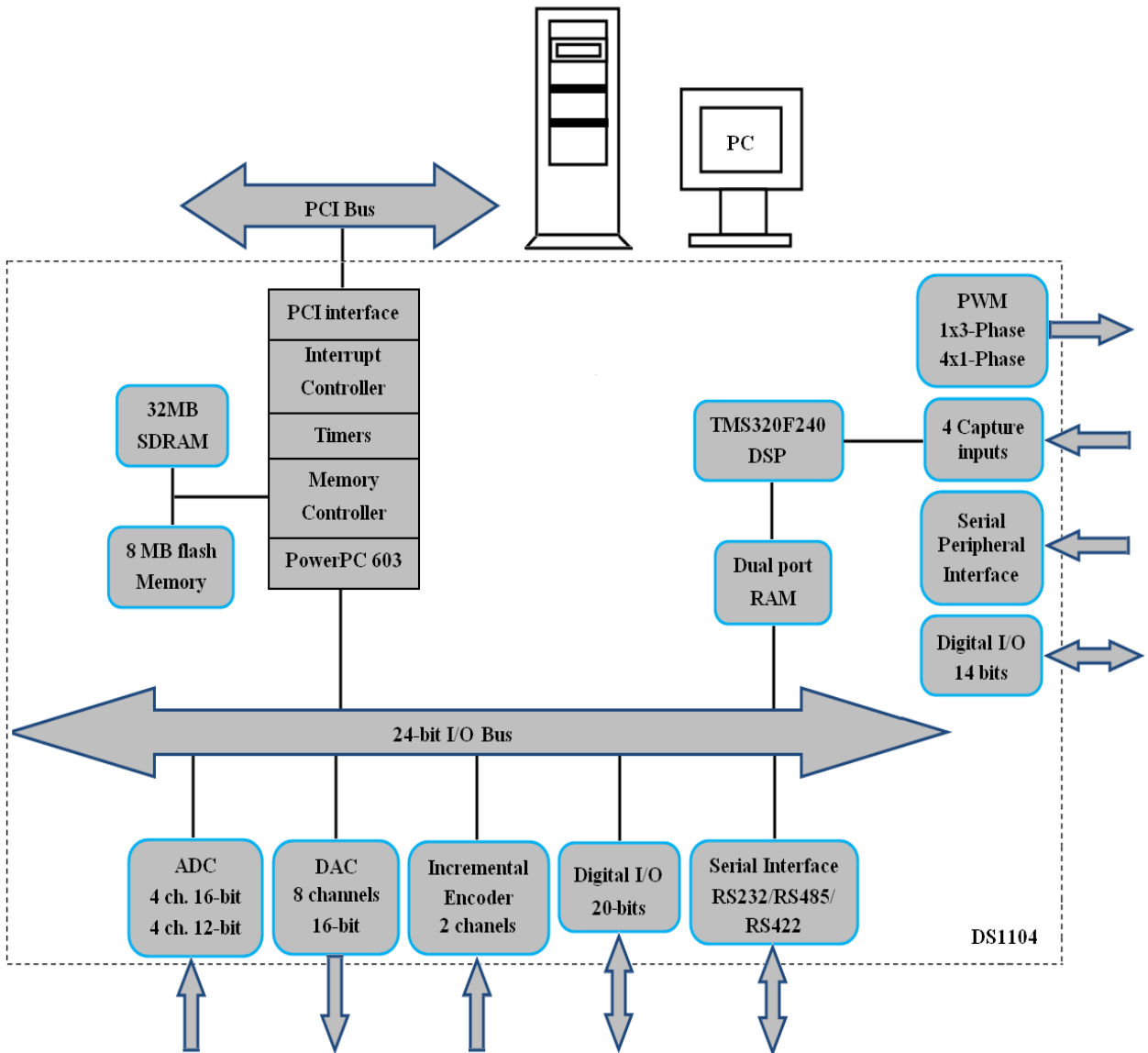


Figure. B.2. Schéma bloc de la carte DS1104.

B.2. Paramètres du système MADA en mode autonome

Tableau. B.1. Paramètres de la MADA de 3kW.

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique</i>
Puissance nominale P_n	3kW
Tension nominale statorique V_s	220/380V
Fréquence nominale statorique f	50Hz
Vitesse nominale	1450tr/min
Résistance statorique R_s	1.6 Ω
Résistance rotorique R_r	2.62 Ω
Inductance statorique L_s	0.1965H
Inductance rotorique L_r	0.1965H
Inductance mutuelle M	0.1770H

Tableau B.2 Paramètres de l'algorithme RTO

Paramètres	Units	Value
La taille de RTO	-	25
Le nombre maximal d'itération	-	25
$b_1 = b_2 = b_3$	-	2
$Rr = Rn$	-	0.3
Rc	-	0.4
dim	-	2