

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



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

**Thème**

**Commande prédictive d'une Génératrice Synchrones à aimant permanent  
(GSAP)**

Encadré par :

Dr. BENAMOR Afaf

Réalisé par :

- KERROUCHE Mohammed

- GAGAA Ali Abdullah Ali

- HATHROUBI Kamel

**2020-2021**

# Dédicaces

*C'est avec un cœur plein de joie que je dédie ce modeste travail :*

*A ceux qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté : mon exemple de vie mon très cher père et ma très chère mère pour leurs sacrifices et encouragements durant toute la période de mes études.*

*A tous mes frères et sœurs.*

*A toute la famille Kerrouche.*

*A mes amis.*

*A tous mes collègues et tous ceux dont les noms ne figurent pas sur cette liste.*

*KERROUCHE MOHAMMED*

# Dédicaces

*C'est avec un cœur plein de joie que je dédie ce modeste travail :*

*A ceux qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté : mon exemple de vie mon très cher père et ma très chère mère pour leurs sacrifices et encouragements durant toute la période de mes études.*

*A tous mes frères et sœurs.*

*A toute la famille GAGAA.*

*A mes amis.*

*A tous mes collègues et tous ceux dont les noms ne figurent pas sur cette liste.*

*GAGAA ALI ABDULLAH ALI*

# Dédicaces

*C'est avec un cœur plein de joie que je dédie ce modeste travail :*

*A ceux qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté : mon exemple de vie mon très cher père et ma très chère mère pour leurs sacrifices et encouragements durant toute la période de mes études.*

*A tous mes frères et sœurs.*

*A toute la famille Hathroubi.*

*A mes amis.*

*A tous mes collègues et tous ceux dont les noms ne figurent pas sur cette liste.*

*KAMEL HATHROUBI*

# Remerciements

---

*Nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant de nous avoir donné la santé et le pouvoir d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous remercions nos parents pour leur patience, leurs encouragements et leur soutien.*

*Nos remerciements vont à Dr. BEN AMOR Afaf d'avoir accepté de nous encadrer, pour ces précieux conseils et sa disponibilité.*

*Nous tenons, aussi, à remercier les membres du jury de nous faire l'honneur de lire et d'évaluer ce travail.*

*C'est avec une certaine émotion et beaucoup de sincérité que je voudrais remercier toutes les personnes ayant soutenu mon travail.*

*En fin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette mémoire.*

# *"Commande prédictive d'une Génératrice Synchrone à aimant permanent (GSAP)"*

## ***Résumé :***

Ce travail présente une étude de la commande de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent (**GSAP**) dans le contexte d'une conversion de l'énergie associée aux la technique de commande prédictive de réglage (**MPC**).

Dans la première partie de la thèse, assurer la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une Génératrice synchrone à aimants permanent (**GSAP**) est présentée. L'utilisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents rend les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesses variables plus attractifs que ceux à vitesses fixes à cause de la possibilité d'extraction optimale de l'énergie dans les différentes conditions de fonctionnement, avec l'exploitation de la modélisation de redresseur à **MLI** en tension.

La deuxième partie de cette thèse, s'intéresse à l'application de la commande prédictive (**MPC**) dans notre système de conversion d'énergie. D'autre part, la fréquence de commutation est non maîtrisable que redresseur à **MLI** au niveau de la tension  $V_{dc}$  sont important. Dans le but d'améliorer cette structure et de fournir une bonne dynamique du tension  $V_{dc}$ , on a associé à la (**GSAP**) la commande prédictive (**MPC**), où le système est soumis à des variations paramètres. Pour valider les performances de ce type de commande des tests en simulation sont effectués. Les résultats de simulation trouvés, sont analysés pour montrer les performances de ce type de commande.

## ***Mots clés :***

Energie Eolienne, Machine synchrone à aimant permanent **MSAP**, Turbine éolienne, Redresseur à **MLI**, Technique de prédictive control (**MPC**).

## الملخص:

يقدم هذا العمل دراسة للتحكم في مولد الرياح المتزامن مع المغناطيس الدائم (GSAP) في سياق تحويل الطاقة المرتبط بتقنية التحكم في الضبط التنبئي (MPC).

في الجزء الأول من الأطروحة ، تم تقديم نمذجة لسلسلة تحويل طاقة الرياح باستخدام مولد متزامن مغناطيسي دائم (GSAP). إن استخدام مولد الرياح المتزامن ذو المغناطيس الدائم يجعل أنظمة تحويل طاقة الرياح المتغيرة السرعة أكثر جاذبية من أنظمة السرعة الثابتة بسبب إمكانية استخراج الطاقة الأمثل في ظل ظروف تشغيل مختلفة ، مع استخدام نمذجة مقوم الجهد MLI.

يتعلق الجزء الثاني من هذه الأطروحة بتطبيق التحكم التنبئي (MPC) في نظام تحويل الطاقة لدينا. من ناحية أخرى ، لا يمكن التحكم في تردد التبديل حيث أن مقوم MLI على مستوى الجهد  $V_{dc}$  مهم. من أجل تحسين هذا الهيكل وتوفير ديناميكيات جيدة لجهد  $V_{dc}$  ، قمنا بربط (GSAP) التحكم التنبئي (MPC) ، حيث يتعرض النظام لتغيرات المعلمات. للتحقق من صحة أداء هذا النوع من التحكم ، يتم إجراء اختبارات المحاكاة. تم تحليل نتائج المحاكاة التي تم العثور عليها لإظهار أداء هذا النوع من التحكم.

## الكلمات المفتاحية:

طاقة الرياح، آلة متزامنة مع دائمة مثل MSAP ، توربينات الرياح ، المعدل مع MLI ، تقنية التحكم التنبئي (MPC).

### ***Abstract:***

This work presents a study of the control of the permanent magnet synchronous wind generator (**GSAP**) in the context of energy conversion associated with the technique of model predictive control (**MPC**).

In the first part of the thesis, modeling a wind power conversion chain using a Permanent Magnet Synchronous Generator (**GSAP**) is presented. The use of the permanent magnet synchronous wind generator makes variable speed wind energy conversion systems more attractive than fixed speed ones because of the possibility of optimal energy extraction under different operating conditions, with the use of the voltage **MLI** rectifier modeling.

The second part of this thesis is concerned with the application of predictive control (**MPC**) in our energy conversion system. On the other hand, the switching frequency is uncontrollable as **MLI** rectifier at the voltage level  $V_{dc}$  are important. In order to improve this structure and provide good dynamics of the  $V_{dc}$  voltage, we have associated (**GSAP**) predictive control (**MPC**), where the system is subjected to parameter variations. To validate the performance of this type of control, simulation tests are carried out. The simulation results found are analyzed to show the performance of this type of control.

### ***Keywords:***

Wind power, Synchronous machine with permanent like **MSAP**, Wind turbine, Rectifier with **MLI**, Technique of predictive control (**MPC**).

## *Sommaire*

**Résumé**

**Notations et symboles**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale** 1

### ***Chapitre I: Etat de l'Art des Systèmes de Conversion***

I.1. Introduction 4

I.2. Définition de l'énergie éolienne 4

I.3. Différents types d'éolienne 4

I.3.1. Eoliennes à axe horizontal 5

I.4. Eolienne à axe vertical 5

I.5. Principales composants d'une éolienne 6

I.6. Fonctionnement d'une éolienne 7

I.6.2. Eolienne à vitesse variable 8

I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 9

I.7.1. Avantages 9

I.7.2. Inconvénients 9

I.8. Machine électrique et système de conversion d'énergie éolienne 9

I.8.1. Machines asynchrones (MAS) 9

I.8.2. Machine synchrone 10

I.9. Présentation de la MSAP 10

I.9.1. Avantages de la MSAP 11

I.9.2. Inconvénients 11

I.10. Principe de fonctionnement de la MSAP	12
I.11. Matériaux magnétiques pour les machines électriques à aimants permanents	13
I.12. Conclusion	14
<b><i>Chapitre II: Modélisation et Simulation de la GSAP</i></b>	
II.1. Introduction	15
II.2. Description	15
II.3. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone	15
II.4. Modélisation de la génératrice synchrone a aimants permanents	16
II.4.1. Hypothèses simplificatrices de la GSAP	17
II.4.2. Équations électriques de la GSAP	17
II.4.3. Principe de la transformation de Park	18
II.4.4. Equations magnétiques	20
II.4.5. Expression du couple électromagnétique	22
II.4.6. Equations mécaniques	22
II.4.7. Modèle d'équation d'état	22
II.5. Simulation de la GSAP	24
II.5.1. GSAP à vide	24
II.5.2. GSAP en court-circuit	26
II.5.3. GSAP en charge séparée ( <b><i>Rch</i></b> , <b><i>Lch</i></b> )	27
II.6. Modélisation de la turbine éolienne	31
II.6.1. Modélisation du vent	31
II.6.2. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal	32
II.6.3. Modélisation de la turbine	33
II.6.4. Modèle du multiplicateur	35
II.6.5. Equation dynamique de l'arbre	35
II.6.6. Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK	36

II.7. Modélisation de redresseur de Tension a MLI	37
II.7.1. Principe de fonctionnement d'un redresseur MLI	38
III.7.2 Modélisation du convertisseur	39
II.8.Conclusion	45
<b><i>Chapitre III: Commande Prédicative de la GSAP : Application dans l'Aérogénérateur</i></b>	
III.1. Introduction	46
III.2. Historique de la commande prédictive	47
III.3. Principe de la commande prédictive	47
III.4. Commande prédictive généralisée	48
III.5. Principe de fonctionnement du Générateur Prédicative Contrôle GPC	49
III.6. Formulation du modèle	49
III.7. Développement de prédicteur	51
III.8. Critère d'optimisation	52
III.9. Commande prédictive généralisée cascade	53
III.10. Application de la Commande prédictive a la GSAP	54
III.11. Résultats de simulation	57
III.12. Conclusion	57
<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>61</b>

**Annexe****Références bibliographiques**

## *Notations et symboles*

MS	Machine Synchrone.
MAS	Machine Asynchrone.
MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanent.
MADA	Machines asynchrones à double alimentation.
GSAP	Génératrice Synchrone à Aimant Permanent.
GPC	Generalized Predictive Control.
$[V_a V_b V_c]^t$	Vecteur tension de phases statoriques.
$[i_a i_b i_c]^t$	Vecteur courant de phases statoriques.
$[\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^t$	Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.
$\varphi_d$ et $\varphi_q$	Flux statorique sur l'axe d et l'axe q.
$V_{dq}$	Tension statorique sur les axes d et q.
$V_{abc}$	Tensions des phases statoriques.
$I_{abc}$	Courants des phases statoriques.
$\theta$	Position statorique.
$\lambda$	La vitesse spécifique ou normalisée.
$\Omega_t$	Vitesse de rotation avant multiplicatrice en rad/s.
$C_p$	Le coefficient de puissance.
$\lambda_{opt}$	Le coefficient de vitesse réduite optimale.
$\omega$	La pulsation des courants statoriques [rad / s ].
$R_s$	La résistance des phases statoriques.
$P(\theta)$	Transformation de Park.
$P(\theta)^{-1}$	Transformation inverse de Park.
$L_d , L_q$	Inductances d'axes directe et en quadrature.
$\varphi_f$	représente le flux des aimants.

$C_{em}$	Le couple électromagnétique.
$J$	Moment d'inertie de la partie tournante ( $kg.m^2$ ).
$f$	Coefficient de frottement visqueux ( $N.m.s/rad$ ).
$C_r$	Couple résistant ( $N.m$ ). <i>Le couple moteur appliqué sur la génératrice.</i>
$\Omega$	Vitesse mécanique ( $rad/s$ ).
$H$	La hauteur de la turbine.
$R$	le rayon de la turbine.
$\tau$	Constante du temps électrique.
$d$	Indice de l'axe direct.
$q$	Indice de l'axe en quadrature.
$s,r$	Indice relatif au stator et rotor respectivement.

## *Liste des figures*

### ***Chapitre I: Etat de l'Art des Systèmes de Conversion***

<b>Figure.I.1.</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent	4
<b>Figure.I.2.</b> Technologie éolienne à axe horizontale	5
<b>Figure. I.3.</b> Technologie éolienne à axe vertical	6
<b>Figure. I.4.</b> Constitution d'une éolienne	6
<b>Figure.I.5.</b> Structure d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents	11
<b>Figure.I.6.</b> Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent	13
<b>Figure.I.7.</b> Cycle d'hystérésis	13

### ***Chapitre II: Modélisation et Simulation de la GSAP***

<b>Figure. II.1.</b> Schéma représentatif de la GSAP	16
<b>Figure. II.2.</b> Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park	18
<b>Figure. II.3.</b> Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park	19
<b>Figure..II.4.</b> Modèle de Park pour la GSAP	21
<b>Figure. II.5.</b> Schéma équivalent de la GSAP dans le repère dq	21
<b>Figure. II.6.</b> Schéma bloc de GSAP en MATLAB/Simulink	24
<b>Figure. II.7.</b> Schéma équivalent de la GSAP dans le cas à vide	28
<b>Figure. II.8.</b> Tensions $V_{abc}$ à vide	28
<b>Figure. II.9.</b> Tensions $V_{dq}$ à vide	28
<b>Figure. II.10.</b> Schéma équivalent de la GSAP dans le cas en court-circuit	26
<b>Figure. II.11.</b> Courant $I_{abc}$ en court-circuit	26
<b>Figure. II.12.</b> Courant $I_{dq}$ en court-circuit	27
<b>Figure. II.13.</b> Schéma équivalent de la GSAP dans le cas à en charge	28
<b>Figure. II.14.</b> Tensions $V_{abc}$ en charge	28

<b>Figure. II.15.</b> Tensions $V_{abc}$ en charge avec zoom	29
<b>Figure. II.16.</b> Tensions $V_{dq}$ cas en charge	29
<b>Figure. II.17.</b> Courants $I_{abc}$ en charge	29
<b>Figure. II. 18.</b> Courants $I_{abc}$ en charge avec zoom	30
<b>Figure. II. 19.</b> Courants $I_{dq}$ en charge	30
<b>Figure. II. 20.</b> Le couple électromagnétique en charge	30
<b>Figure. II. 21.</b> Schéma de la turbine éolienne	31
<b>Figure. II. 22.</b> Modèle mécanique simplifié de la turbine	32
<b>Figure. II. 23.</b> Coefficient de puissance $C_p$ en fonction du ratio de vitesse $\lambda$ et de l'angle de l'orientation de pale $\beta$	34
<b>Figure. II. 24.</b> Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne	36
<b>Figure. II. 25.</b> Modèle en bloc de la turbine	37
<b>Figure. II. 26.</b> Topologies de base d'un redresseur de tension	38
<b>Figure. II. 27.</b> Schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau	39
<b>Figure. II. 28.</b> Pont redresseur MLI	39
<b>Figure. II. 29.</b> Etats de commutation du pont redresseur MLI	40
<b>Figure. II. 30.</b> Schéma bloc de redresseur à MLI	43
<b>Figure. II. 31.</b> Schéma bloc de redresseur à MLI par MATLAB/Simulink	44
<b>Figure. II.32.</b> La Tension de redresseur MLI $V_{dc}$	44
<b><i>Chapitre III: Commande Prédictive de la GSAP : Application dans l'Aérogénérateur</i></b>	
<b>Figure. III.1.</b> principe de commande prédictive	48
<b>Figure. III.2.</b> Principe de fonctionnement de la commande prédictive généralisée	49
<b>Figure. III.3.</b> Modèle numérique de représentation pour le GPC	50

<b>Figure. III.4.</b> Structure d'une commande prédictive généralisée cascade	54
<b>Figure. III.5.</b> Structure de control prédictive de GSAP	55
<b>Figure. III.6.</b> Tensions $V_{abc}$ dans deux cas de simulation	57
<b>Figure. III.7.</b> Tensions $V_{abc}$ dans deux cas avec zoom	58
<b>Figure. III.8.</b> Courant $I_{abc}$ dans deux cas de simulation	58
<b>Figure. III.9.</b> Courant $I_{abc}$ dans deux cas avec zoom	58
<b>Figure. III.10.</b> Tension $I_{dq}$ dans deux cas de simulation	59
<b>Figure. III.11.</b> Tension $I_{dq}$ dans deux cas de simulation	59
<b>Figure. III.12.</b> Tension $V_{dc}$ dans deux cas de simulation	59
<b>Figure. III.13.</b> Vitesse mécanique	60

## *Liste des tableaux*

### *Chapitre II: Modélisation et Simulation de la GSAP*

**Tableau. II.1** Valeurs des tensions simples selon les états possibles des interrupteurs 41

### *Chapitre III: Commande Prédictive de la GSAP : Application dans l'Aérogénérateur*

**Tableau.III.1** Vecteurs tension selon les états des clés dans le plan ( $\alpha, \beta$ ) 56

# **Introduction générale**

## *Introduction Générale*

**L**es besoins énergétiques de la planète s'amplifient à une vitesse croissante dans toutes les régions du monde. La dépendance excessive vis-à-vis des importations d'énergie en provenance d'un petit nombre de pays, pour la plupart instables politiquement, et la volatilité des prix du pétrole et du gaz se traduisent par une situation chancelante de l'approvisionnement énergétique qui représente déjà un lourd fardeau pour l'économie mondiale. D'autre part les effets néfastes des combustibles fossiles sur l'environnement ajoutent une autre dimension de ce problème. Les usines d'énergie chargent l'atmosphère en gaz qui génèrent les effets de serre et des particules créant ainsi des îlots de chaleur, cause principale des changements du climat. La génération et la consommation d'énergie sont responsables de 50 à 60 pour cent des gaz à effets de serre émis dans l'atmosphère. L'utilisation intense d'énergie augmente la pollution atmosphérique ce qui laisse penser la croissance supplémentaire dans le proche avenir. Delà vient l'importance de soutenir des sources d'énergie comme celle du vent.

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne utilisent dans leur grande majorité des générateurs synchrones ou asynchrones. Toutefois, pour des raisons de rendement très élevé et grande puissance massique, la machine synchrone à aimant permanents est de plus en plus utilisée. Quelle que soit la machine utilisée, le fonctionnement en générateur autonome se distingue par des contraintes. En effet, en raison de la nature fluctuante du vent la préoccupation principale de ce fonctionnement, c'est de maintenir l'amplitude de la tension générée à des valeurs constantes quelles que soient la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance demandée dans une certaine plage. Cela passe alors par la mise en œuvre d'une commande du système éolien

Les machines synchrones étaient principalement utilisées pour produire de l'énergie électrique à partir de sources mécaniques provenant de différentes sources, sous la forme de générateurs fonctionnant dans une gamme de puissance allant de quelques watts à quelques centaines de mégawatts. Les génératrices synchrones aimants permanentes, prennent de plus en plus dominant par rapport aux autres machines électriques. Ces types de machines peuvent extraire un maximum d'énergie en minimisant, contraintes mécaniques, en éliminant le multiplicateur de vitesse, ce qui améliore fiabilité du système et coûts de maintenance réduits.

En revanche, lorsque des performances sévères sont requises, les commandes classiques montrent vite leurs limites. En effet l'une des principales difficultés rencontrées dans la commande des procédés est la présence de retard dus essentiellement aux caractéristiques physique du système à contrôler (constante de temps d'éléments chauffants, acquisition-conversion de signaux...). Ces retards sont souvent la cause de problèmes rencontrés lors de l'application de commande classique. C'est pour résoudre ce type de problème qu'a été introduite la notion de commande prédictive.

La commande prédictive est un terme général qui englobe un ensemble de méthodes différentes (PFC, DMC, GPC, EPSAC, NLPC...). Néanmoins, toutes ces techniques utilisent la même philosophie de contrôle et le principe de fonctionnement est le même

L'objectif principal du travail présenté dans cette thèse est centré sur l'application des principes de la commande prédictive généralisée (GPC). Cette commande est introduite à la fin des années 80 et elle est considérée comme étant la plus populaire des méthodes de prédiction, particulièrement pour des processus industriels. La GPC est basée sur la minimisation d'un critère quadratique au sens d'un horizon fuyant et dépend de quatre paramètres qui sont les deux horizons de prédiction minimum et maximum, l'horizon de commande et le facteur de pondération de la commande, dont l'ajustement optimal ne peut être garanti.

A partir de réglage de la tension de bus continu introduits par le convertisseur AC/DC, en passant par le contrôle de la génératrice synchrone à aimant permanent. L'ensemble des résultats est obtenu par simulation, en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink.

Le premier chapitre, et dans un premier temps, l'état de l'art sur l'évolution des systèmes de conversion d'énergie éolienne sera exposé à commencer par quelques notions fondamentales sur l'énergie éolienne. Ensuite, on présente les différents éléments de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, à savoir le modèle aérodynamique de la turbine, les différents types des machines électriques et en particulier la génératrice synchrone à aimant permanent GSAP.

La première partie du second chapitre, sera consacrée à la modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent avec trois cas à vide, en court-circuit et en charge. Ensuite on présente la modélisation de turbine éolienne et le convertisseur AC/DC à MLI,

seront exposés dans la deuxième partie de ce chapitre. Et pour terminer, on présente les résultats de simulation.

Dans le troisième chapitre, nous avons proposé la stratégie de commande prédictive généralisée (GPC) appliquée au contrôle de la tension de redresseur à MLI en tension de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), dans un système de conversion d'énergie éolienne. Pour améliorer les performances de la commande de (GSAP) classique et minimiser les oscillations de tension de bus continu, la validation des performances de réglage est faite par simulation.

Enfin, nous concluons ce travail par une conclusion générale, suivie de quelques perspectives pour la continuité de ce travail dans le futur.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'Art des Systèmes de Conversion**

## I.1. Introduction

L'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables prometteuses qui est pratiquement illimitée même si elle présente un comportement aléatoire mais avec les récentes recherches dans les domaines des turbines éoliennes à vitesse variable, l'électronique de puissance et les techniques de commandes avancées ont permis le contrôle des puissances produites par ces aérogénérateurs, ainsi tendent à rendre l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine traditionnelle [SAT 06] [POI 03] [DJE 11].

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'aux différents types de générateurs utilisés dans cette chaîne de conversion.

## I.2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice Figure I.1 [POI 03].

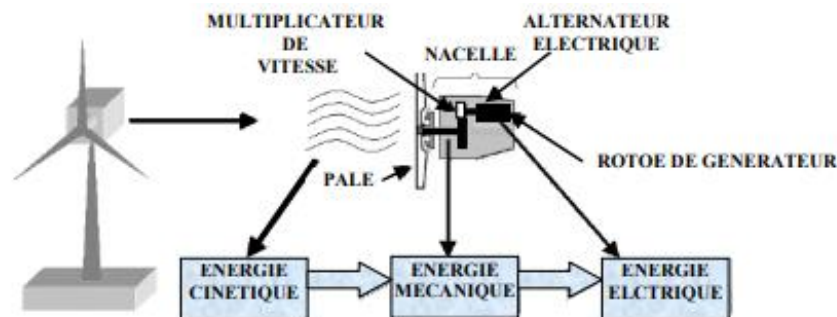


Figure.I.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent [BEN 19].

## I.3. Différents types d'éolienne

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- Les turbines éoliennes à axe horizontal ;
- Les turbines éoliennes à axe vertical.

### I.3.1. Eoliennes à axe horizontal

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales. La voile peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downwind). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. La Figure I.2 technologie éolienne à axe horizontale [ADA 05] [RED 09] [TEN 09].



**Figure.I.2.** Technologie éolienne à axe horizontale[LAT 12].

### I.4. Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années 1920 avec un certain succès. Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisés, puisque les contraintes mécaniques au niveau du sol occupent plus d'espace [ADA 05] [RED 09] [IDJ 10].

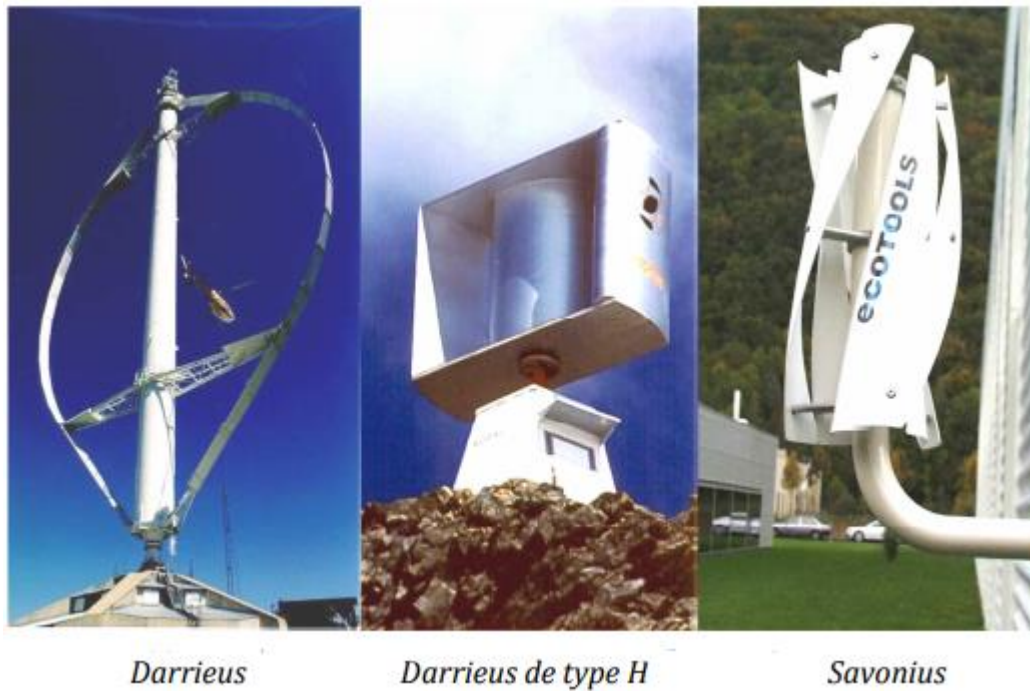


Figure. I.3. Technologie éolienne à axe vertical[LAT 12].

### I.5. Principales composants d'une éolienne

Existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux

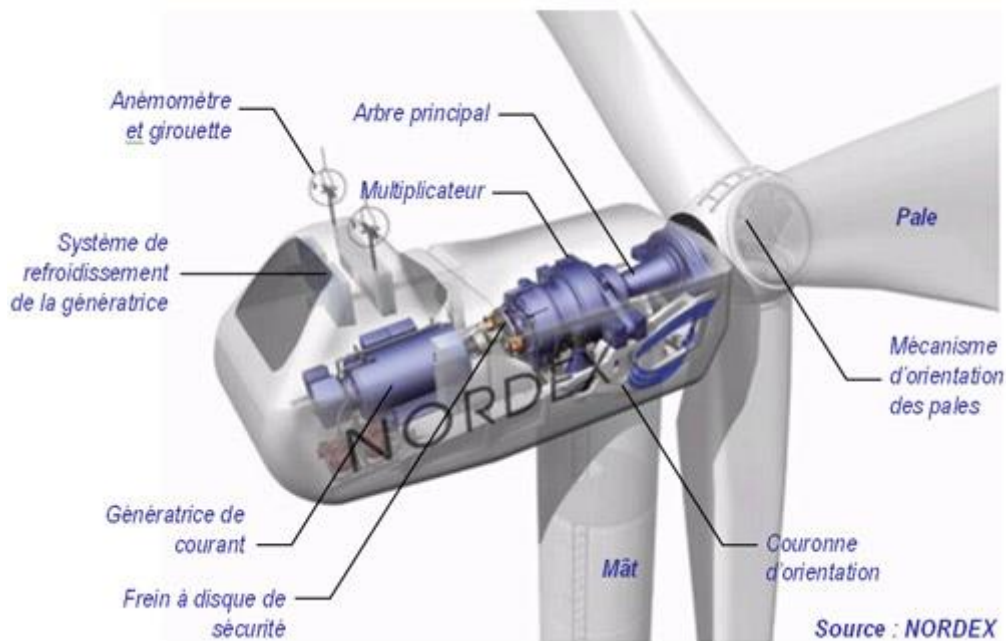


Figure. I.4. Constitution d'une éolienne.

**Le mât :** Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur) [GHE 11] .

**La nacelle :** Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de commande, système de refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne[HAM 08] .

**Le rotor :** Partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute [POI 03].

## **I.6. Fonctionnement d'une éolienne**

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau.

### **I.6.1. Eolienne à vitesse fixe**

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes 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 MS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif).

Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1% [BOU 16].

✓ ***Avantage du fonctionnement à vitesse fixe***

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

- ✓ Structure simple.
- ✓ Absence des convertisseurs de puissance.
- ✓ Moins cher

✓ ***Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe***

Cette stratégie pose beaucoup de problèmes au niveau de l'exploitation de l'énergie extraite :

- ✓ Puissance extraite non optimisée (On rate les maximas théoriques).
- ✓ Rendement très faible pour les moyens et faibles vents.
- ✓ Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- ✓ Perte de control de la puissance réactive.
- ✓ Magnétisation de la génératrice non contrôlée.

### **I.6.2. Eolienne à vitesse variable**

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. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, 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 [BOU 16].

## **I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

### **I.7.1. Avantages**

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels ;
- ✓ Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [ART 06] ;
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [HAR 03].

### **I.7.2. Inconvénients**

- ✓ L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif [HAR 03] ;
- ✓ Le bruit des pales ;
- ✓ L'impact sur les oiseaux (les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux) ;
- ✓ La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante [HAR 03].

## **I.8. Machine électrique et système de conversion d'énergie éolienne**

Dans cas des éoliennes à vitesse variable, il utilise plusieurs types des machines par rapport les éoliennes à vitesse fixe (constant) :

### **I.8.1. Machines asynchrones (MAS)**

L'utilisation de la machines Asynchrones est largement répandue dans le domaine de la production d'énergie renouvelable. Il existe deux types de Machine Asynchrone pouvant être couplés avec une éolienne : Machine Asynchrone à cage, Machines Asynchrones à double alimentation (MADA).

#### **✓ Machine asynchrone a cage**

Les machines asynchrones à cage sont utilisées en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence [IDJ 10] .Elles sont rarement exploitées car elles ne sont pas concurrentielles avec les autres types de machines. Ces machines « rapides » nécessitent d'être associées à leur turbine éolienne, beaucoup plus lente, à travers un multiplicateur de vitesse mécanique.

**✓ Machines asynchrones à double alimentation (MADA)**

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone dont le rotor (bobiné) est raccordé au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance. Cette interface adapte l'amplitude et la fréquence des courants rotorique, en contrôlant la tension aux bornes du rotor en fonction du point de fonctionnement de la machine. On s'autorise ainsi une variation de vitesse de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme. Le stator est lui directement connecté au réseau [ROB 04].

**I.8.2. Machine synchrone**

La machine synchrone est utilisée dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (Centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires), les générateurs synchrones sont aussi utilisés dans le domaine éolien pour des puissances allant de 500 kW à 2 MW mais ils sont bien plus coûteux que les générateurs à induction de la même taille [TEN 09].

**✓ Machine synchrone a rotor bobiné**

La connexion directe au réseau de puissance implique que la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB) tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système sans balais avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système.

**✓ Machine synchrone a aiment permanent**

La fréquence de la tension produite par le MSAP dépend de la vitesse de rotation. Il ne peut donc ne pas être connecté directement au réseau électrique [LOP 06]. Ce type de générateur utilise un aiment permanent à rotor multi-pôles, ce qui donne l'avantage d'avoir un grand couple massique. Donc la machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor

[AID 13].

**I.9. Présentation de la MSAP**

L'avantage principal des machines synchrones à aimants permanents réside dans la haute vitesse et génèrent des puissances très élevée. Les développements actuels sont dus à la

baisse des coûts des composants semi-conducteurs de puissance, à l'apparition d'aimants permanents à haute performance et à faible perte fer. Le stator de la machine à un bobinage conventionnel identique à celui de la machine synchrone usuelle. Le champ magnétique d'excitation du rotor est fourni par des aimants permanents, contrairement à la machine conventionnelle.



**Figure.I.5.** Structure d'un Moteur Synchrone à Aimants Permanents.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- ✓ Les machines synchrones à rotor bobiné
- ✓ Les machines synchrones à réluctance
- ✓ Les machines synchrones à aimants permanents [KHA 06] [LAC 07].

### **I.9.1. Avantages de la MSAP**

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages :

- ✓ Puissances massiques élevées ;
- ✓ Absence de contacts glissants ;
- ✓ Un bon rendement ;
- ✓ Absence des balais et d'alimentation continue ;
- ✓ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage ;
- ✓ Fonctionnement en survitesse [BID11] [TLE 00].

### **I.9.2. Inconvénients**

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- ✓ Coût élevé des aimants;
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure;
- ✓ Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine;
- ✓ Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps [TLE 00].

### **I.10. Principe de fonctionnement de la MSAP**

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [OUB10].

**Le stator** : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de  $120^\circ$  dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [MAH12] .

**Le rotor** : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique [AIN 13].

Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

- ✓ Rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe. Dans ce type de machine, l'inducteur est à pôles saillants ;
- ✓ Rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer.

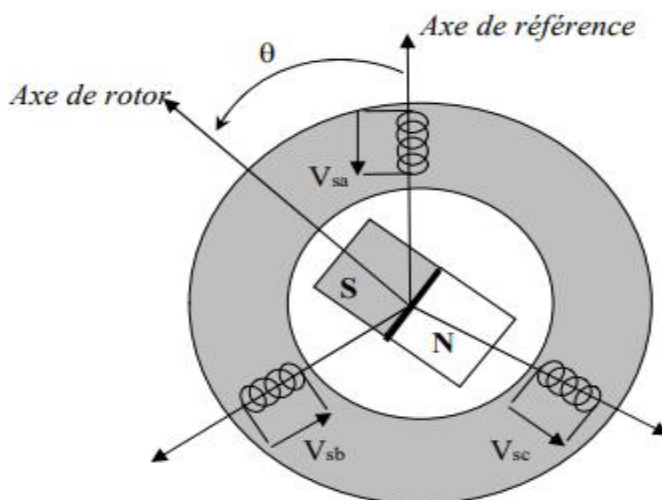


Figure.I.6. Schéma d'une machine synchrone à aimant permanent [KHA 06].

### I.11. Matériaux magnétiques pour les machines électriques à aimants permanents

Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis Figure I.7 et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants permanents » car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur [LAC 89]. La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux » qui ne manifestent de propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation externe.

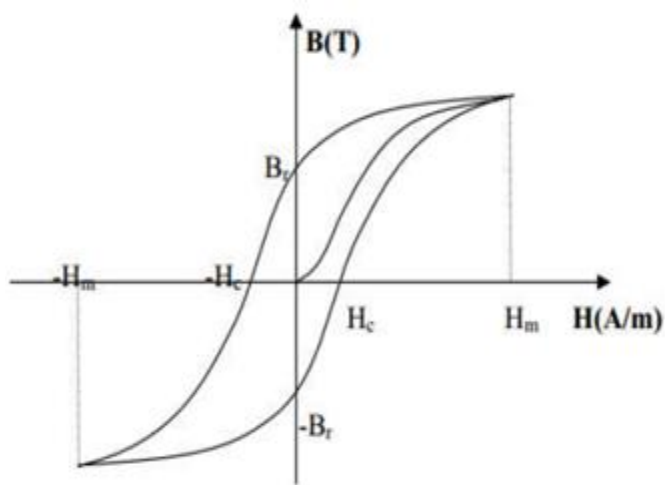


Figure.I.7. Cycle d'hystérésis.

## **I.12. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une brève description et un rappel des concepts nécessaires à la compréhension du système de conversion éolienne. Des formes non similaires d'éoliennes ont été décrites, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Les composantes des différents types des chaînes de conversion ont été présentées. Avec l'étude générale de la machine synchrone à aimants permanent MSAP, dans notre thèse nous allons prendre la machine synchrone à aimants permanent en mode générateur GSAP.

Dans le chapitre suivant, on va présenter la modélisation mathématique des différentes composantes de la chaîne de la conversion.

**Chapitre II**

**Modélisation et Simulation**

**de la GSAP**

## II.1. Introduction

La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique,..... Dans la machine à aimants permanents MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques.

Dans ce chapitre, nous avons proposé le concept un modèle de simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents GSAP.

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation de la turbine éolienne, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance lie du système de commande.

Ce chapitre est composé de trois parties : la première partie est consacrée à la modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent, et on terminera cette partie par une simulation de ces configurations (GSAP et turbine) en fonctionnement générateur. Dans la deuxième partie est consacrée à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, et où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillées.

La troisième et dernière partie nous présenter ont la modélisation de redresseur à MLI.

## II.2. Description

La génératrice synchrone à aimants permanents se compose d'une partie fixe et un autre tournant. L'induit ou stator est constitué d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé à  $2p$  pôles. Les bobines constituant cet enroulement sont décalées de  $\frac{2\pi}{3}$  et toujours raccordées en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. Le rotor ou inducteur comporte  $p$  pôles nord et  $p$  pôles sud intercalés [HAM 13] [DIO 18] [MER 19]

## II.3. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone

Le principe de fonctionnement de la génératrice synchrone à aimants permanents, est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation d'un aimant (nommé rotor) passant devant les faces de trois bobines fixes (appelées stator) alimentées par le réseau,

Cette variation provoque l'apparition d'une force électromotrice d'induction dans chacune des bobines, créant ainsi un courant triphasé [MER 19] [RED 09]. La génératrice synchrone à aimants permanents, permet d'effectuer la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique alternative, est plus particulièrement une machine triphasée fournissant un système équilibré de tensions et de courants alternatifs [ZID 15].

#### II.4. Modélisation de la génératrice synchrone a aimants permanents

La modélisation des machines est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatifs sont en générale, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Ce non linéarité est dû aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasé – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations).

Cette machine comporte comme toutes les autres machines triphasées un stator bobiné. Mais, dans ce cas là (MSAP) le rotor est remplacé par des aimants, et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotoriques ainsi que la présence d'une source d'alimentation afin de fournir le courant d'excitation [MEG 09] [MER 19]. La MSAP. En effet, elle a une large utilisation dans le domaine de l'entraînement électrique à une vitesse variable [KHA 07].

La modélisation de la GSAP consiste à construire un modèle mathématique de la machine, en traduisant les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. Ce cela permet d'étudier le comportement de différentes variables de manière dynamique et statique et d'utiliser ce modèle dans les simulations [ZIR 17].

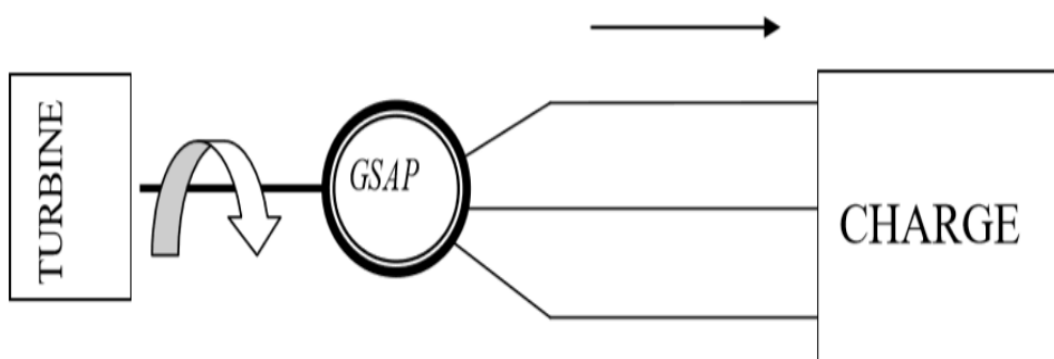


Figure. II.1. Schéma représentatif de la GSAP.

### II.4.1. Hypothèses simplificatrices de la GSAP

Pour une représentation plus simple du modèle mathématique de la machine synchrone électrique nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes [MAY 08] [MAY 14] [ZID 15] [RED 09].

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique. . La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator ;
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau et l'effet d'encoche est négligeable ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température ;
- La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator ;
- L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air ;
- Caractéristique magnétique de la machine linéaire ;
- Symétrie de la machine et alimenté par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales ;
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer ;
- L'influence des pièces polaires.

### II.4.2. Équations électriques de la GSAP

Les équations électriques régissant le fonctionnement de la GSAP dans le repère fixe lié au stator (a, b, c) de la machine s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [-R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$[V_a \ V_b \ V_c]^t$  : Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a \ i_b \ i_c]^t$  : Vecteur courant de phases statoriques.

$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$  : Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

$R_s$  : La résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérés sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

### II.4.3. Principe de la transformation de Park

Le modèle diphasé de la GSAP s'effectue par une transformation du repère triphasé réel en un repère diphasé fictive, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux, et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de Park.

Le repère  $(d, q)$  peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant, Selon l'objectif de l'application. La Figure II.2 présente la MSAP en modèle vectoriel (modèle de Park). Le repère  $(oa)$  est fixe. Le repère  $(d, q)$  tourne avec la vitesse de synchronisme  $\omega r$ .

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor Figure II.2.

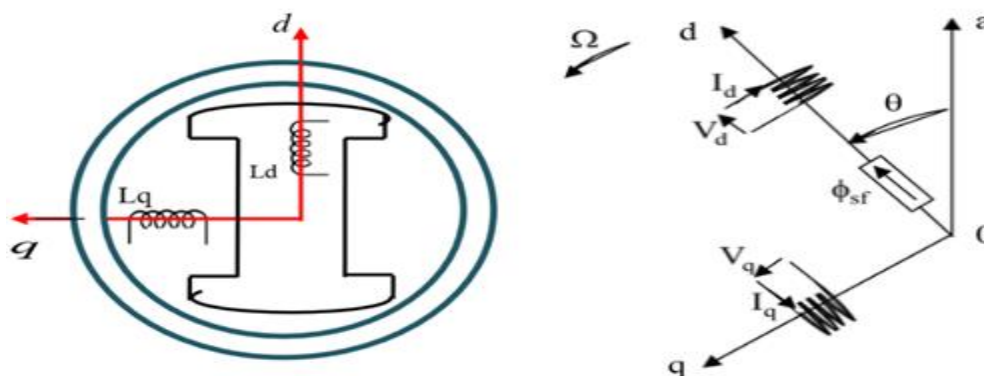


Figure. II.2. Représentation de la MSAP dans le repère  $(d, q)$  de Park.

Les deux bobines  $d$  et  $q$ , tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère  $(d, q)$ , nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de

la machine [REK 91].

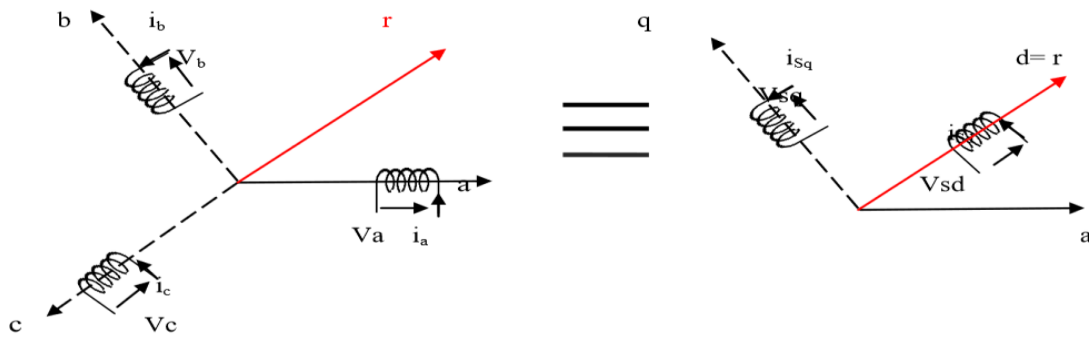


Figure. II.3. Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.

➤ **Passage direct : triphasé au diphas**

L'équation qui traduit le passage du système triphasé au système diphasé (d, q) est donnée par:

$$[X_{dq0}] = P(\theta)[X_{abc}]^T$$

Avec :  $P(\theta)$  : la matrice de passage direct de Park.

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

Où, X représente les variables considérées de la machine qui sont tensions, courants ou flux Alors:

$$[V_d V_q V_0] = P(\theta)[V_a V_b V_c]^T$$

$$[i_d i_q i_0] = P(\theta)[i_a i_b i_c]^T$$

$$[i_d i_q i_0]^T = P(\theta)[i_a i_b i_c]^T$$

$$[\varphi_d \varphi_q \varphi_0]^T = P(\theta)[\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^T$$

$X_0$ : La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est en équilibre.

➤ **Passage inverse : diphasé au triphasé**

La transformée de Park inverse est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées, elle est définie par :

$$[X_{abc}] = P(\theta)[X_{dq0}]^T$$

Et la matrice de passage inverse de Park  $(\theta)^{-1}$  est donnée par :

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

#### II.4.4. Equations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoidale des conducteurs,  $\varphi_{ds}$  et  $\varphi_{qs}$  sont fonctions linéaires des courants  $i_d$  et  $i_q$  :

$$\begin{cases} \varphi_d = -L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = -L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

$L_d, L_q$  : Inductances d'axes directe et en quadrature.

$L_d$  et  $L_q$  sont les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de  $\theta$ .

$\varphi_f$  : Représente le flux des aimants.

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant  $i_d$  et  $i_q$  dans les repères de Park Figure II.4, et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega \varphi_q \\ V_q = -R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Par remplace l'équation du flux (II.2) en trouve

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega L_d i_d + \omega \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

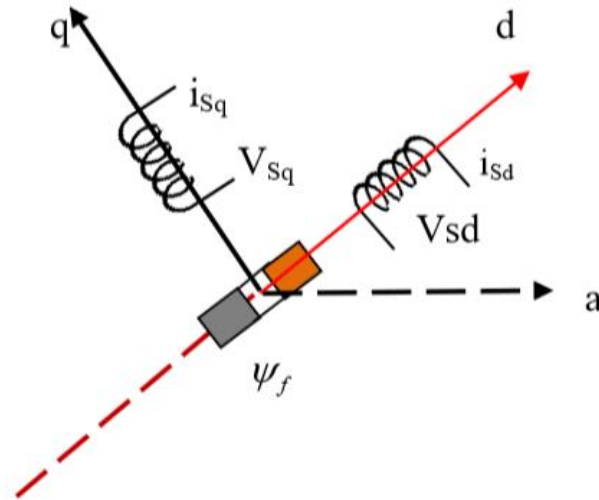


Figure..II.4. Modèle de Park pour la GSAP.

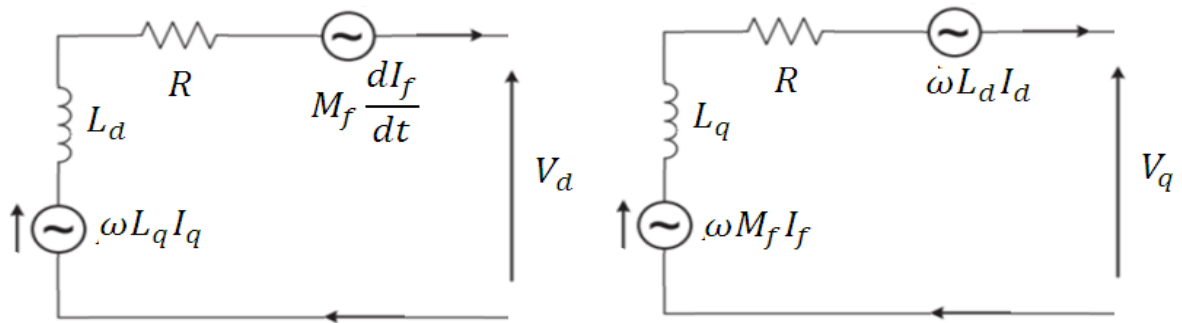


Figure. II.5. Schéma équivalent de la GSAP dans le repère dq.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & 0 \\ 0 & -L_q & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 \\ -L_d & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -L_d & 0 & 1 \\ 0 & -L_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 \\ 0 & -L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \left( \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \right) \quad (\text{II.7})$$

$$[V] = -[R][I] + [L] \frac{d}{dt} [I] + \omega ([A][I] + [Phi]) \quad (\text{II.8})$$

$$\omega = \omega_m P \quad (\text{II.9})$$

### II.4.5. Expression du couple électromagnétique

Si on néglige le frottement sec, le couple électromécanique fourni est transmis à la charge et d'autre part, sert à l'accélération du rotor et à la comparaison du frottement visqueux. Selon la loi de Newton, l'équation fondamentale de la mécanique est:

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [REK 91] :

$$C_{em} = \frac{3}{2}P[\varphi_d I_q - \varphi_q I_d] \quad (\text{II.10})$$

En remplaçant  $\varphi_d, \varphi_q$  par leurs expressions il vient

$$C_{em} = \frac{3}{2}P[(L_d - L_q)I_d I_q + I_q \varphi_f] \quad (\text{II.11})$$

Si la MSAP à rotor lisse ( $L_d = L_q$ ):

$$C_{em} = \frac{3}{2}P I_q \varphi_f \quad (\text{II.12})$$

### II.4.6. Equations mécaniques

L'équation mécanique développée par la génératrice GSAP est donné comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{II.13})$$

$J$  : Moment d'inertie de la partie tournante ( $kg.m^2$ ) ;

$f$  : Coefficient de frottement visqueux ( $N.m.s/rad$ ) ;

$C_r$  : Couple résistant ( $N.m$ ). Le couple moteur appliqué sur la génératrice ;

$\Omega$  : Vitesse mécanique ( $rad/s$ ).

### II.4.7. Modèle d'équation d'état

Le modèle général de l'entrée-sortie de la machine synchrone à aimants permanents est lié au choix de vecteur d'état. Dans le cas des équations de la MSAP, dans le repère lié au rotor, les composantes des vecteurs d'entrées de la machine sont les tensions  $V_d, V_q$  et les courants  $i_d$  et  $i_q$  statoriques sont les composantes du vecteur de sortie. Notre objectif dans ce qui suit est de mettre les équations sous la forme d'équations d'état suivant:

➤ **Modèle générale d'état de la GSAP**

$$[\dot{i}] = [A][I] + [B][V]$$

A partir de l'équation (II.4) on peut trouver l'équation (II.14)

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{V_d}{L_d} - \frac{R_s}{L_d} i_d - \omega \frac{L_q}{L_d} i_q \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{V_q}{L_q} - \frac{R_s}{L_q} i_q - \omega \frac{L_d}{L_q} i_d + \frac{\omega}{L_q} \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & \frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & \frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \quad \rightarrow$$

$$[A] = [A_1] + \omega [A_2] = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix}$$

$$[B] = [B_1] + \omega [B_2] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}$$

Donc la forme générale d'état de la GSAP est:

$$[\dot{i}] = ([A_1] + \omega [A_2])[I] + ([B_1] + \omega [B_2])[V] \quad (\text{II.16})$$

A partir des dernières équations d'état on peut résumer le schéma global de la GSAP dans la Figure II.6.

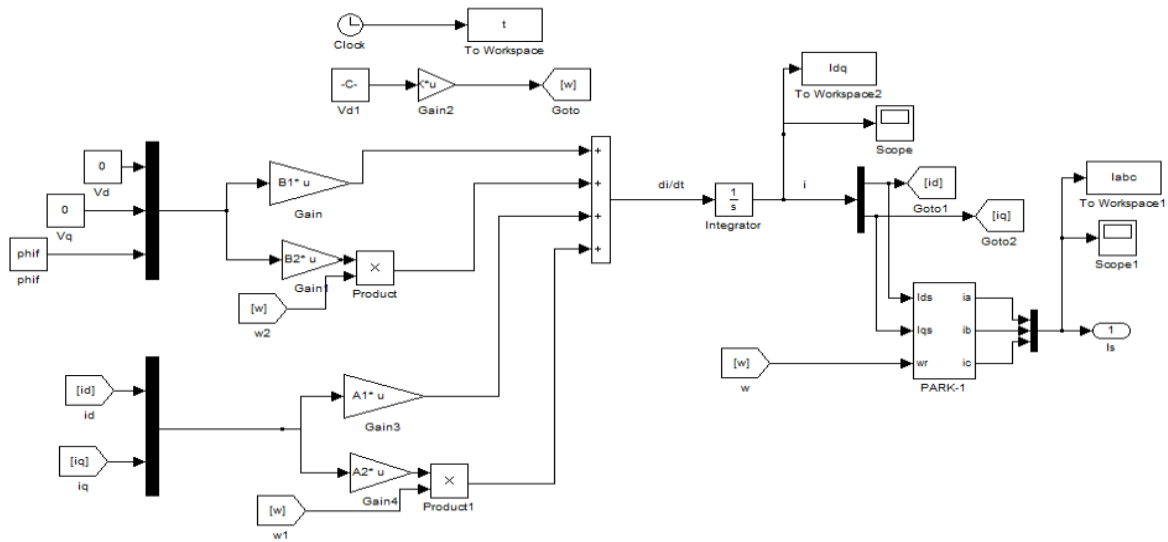


Figure. II.6. Schéma bloc de GSAP en MATLAB/Simulink.

## II.5. Simulation de la GSAP

Dans cette partie la GSAP nous présentons la simulation de la GSAP de trois cas distincts "à vide, en court-circuit et en charge". Dans le troisième cas, le stator de la machine est relié à une charge 'R, L' telle que : ' $R_{ch}, L_{ch}$ '.

### II.5.1. GSAP à vide

$$\begin{cases} i_d = 0 \\ i_q = 0 \end{cases} \quad (II.17)$$

Les expressions des tensions et couple deviennent:

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \varphi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (II.18)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 \\ 0 & -L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \omega \left( \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \right) \quad (II.19)$$

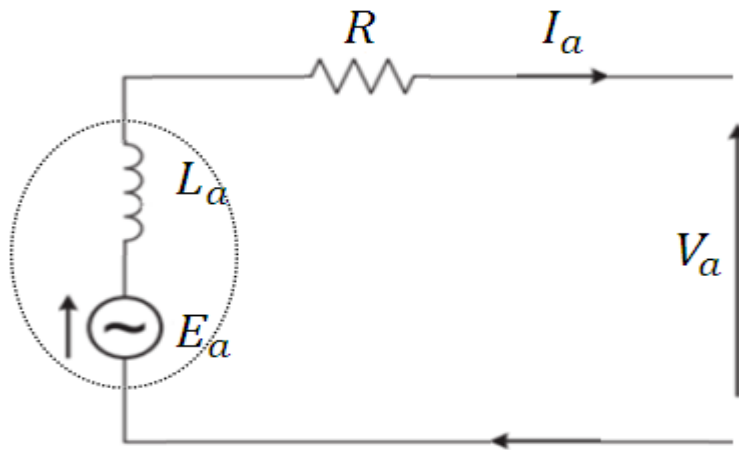


Figure. II.7. Schéma équivalent de la GSAP dans le cas à vide.

• Résultats de simulation

Les résultats de simulation de la GSAP à vide sont montrés dans les figures suivantes :

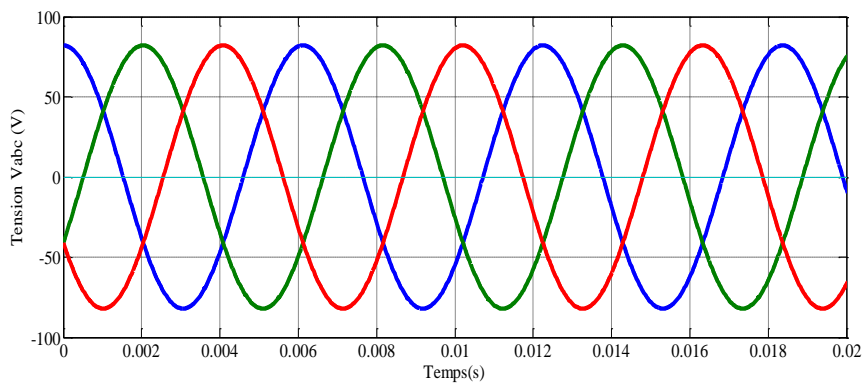


Figure. II.8. Tensions  $V_{abc}$  à vide.

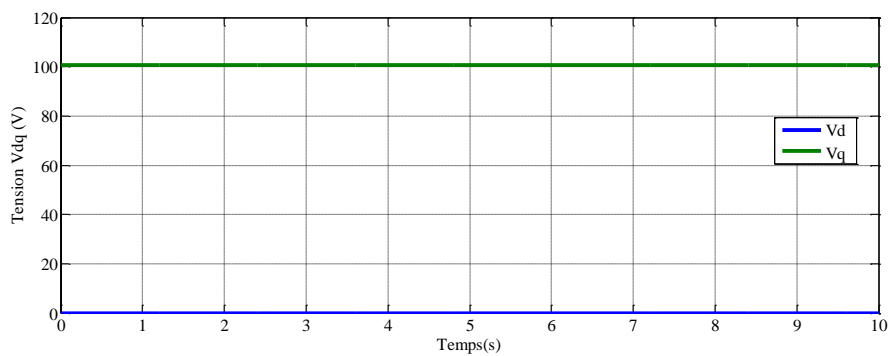


Figure. II.9. Tensions  $V_{dq}$  à vide.

II.5.2. GSAP en court-circuit

Dans ce cas on suppose que :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = 0 \end{cases} \tag{II.20}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 \\ 0 & -L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \left( \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \right) \tag{II.21}$$

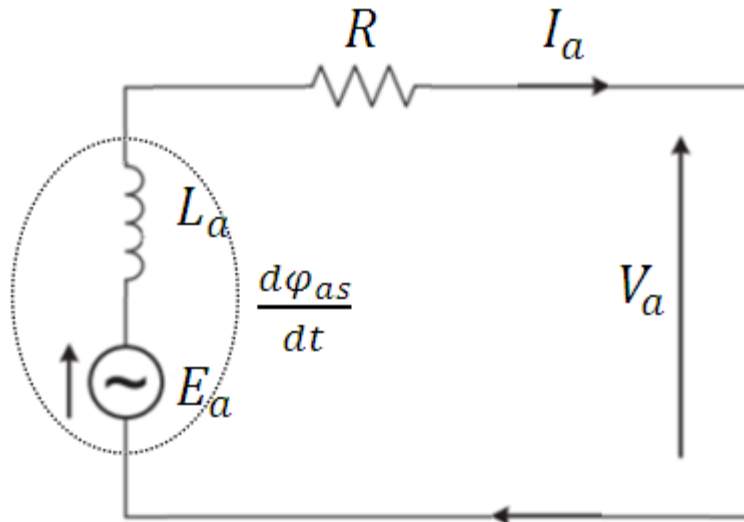


Figure. II.10. Schéma équivalent de la GSAP dans le cas en court-circuit.

Les résultats de simulation de la GSAP en court-circuit sont montrés dans les figures suivantes :

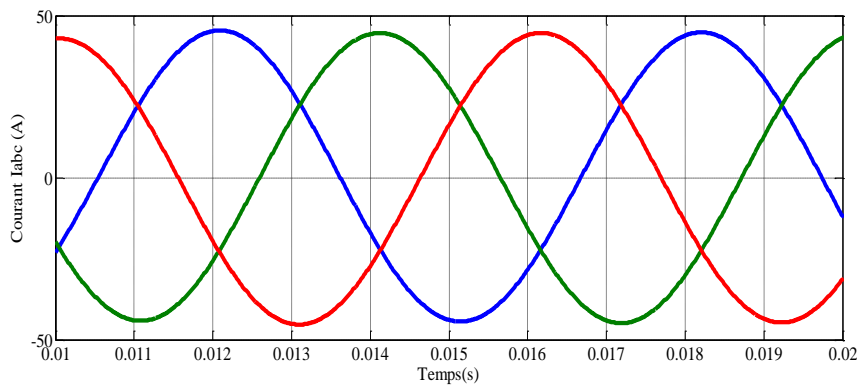


Figure. II.11. Courant I<sub>abc</sub> en court-circuit

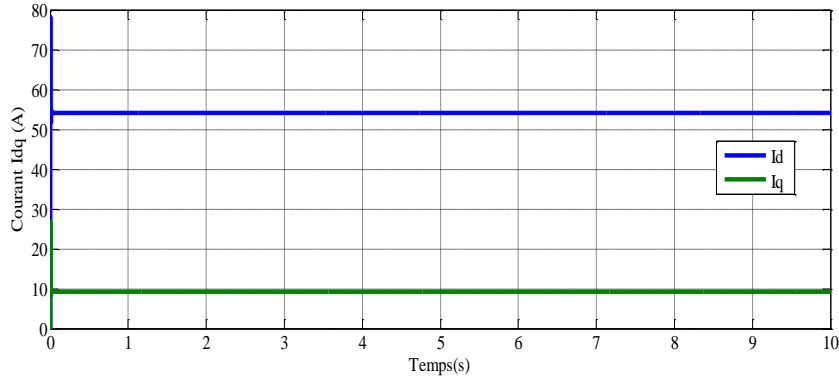


Figure. II.12. Courant  $I_{dq}$  en court-circuit.

### II.5.3. GSAP en charge séparée ( $R_{ch}$ , $L_{ch}$ )

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique ( $R_{ch}$ ,  $L_{ch}$ ) Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les équations données par (II.4) :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega L_d i_d + \omega \varphi_f \end{cases}$$

D'autre part, l'application des tensions  $V_d$  et  $V_q$  sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{d}{dt} i_d - \omega L_{ch} i_q \\ V_q = R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{d}{dt} i_q + \omega L_{ch} i_d \end{cases} \quad (II.22)$$

En remplaçant les expressions de  $V_d$  et  $V_q$  dans (II.22), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_d = -(R_s + R_{ch}) i_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_d + \omega (L_q + L_{ch}) i_q \\ V_q = -(R_s + R_{ch}) i_q - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_q - \omega (L_d + L_{ch}) i_d + \omega \varphi_f \end{cases} \quad (II.23)$$

En introduisant la transformée de LAPLACE dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} S i_d = \frac{1}{(L_d + L_{ch})} [ -(R_s + R_{ch}) i_d + \omega (L_q + L_{ch}) i_q ] \\ S i_q = \frac{1}{(L_d + L_{ch})} [ -(R_s + R_{ch}) i_q - \omega (L_d + L_{ch}) i_d + \omega \varphi_f ] \end{cases} \quad (II.24)$$

Considérons le flux d'excitation  $\varphi_f$  comme grandeur de commande, et les courants  $i_d, i_q$  comme variables d'état.

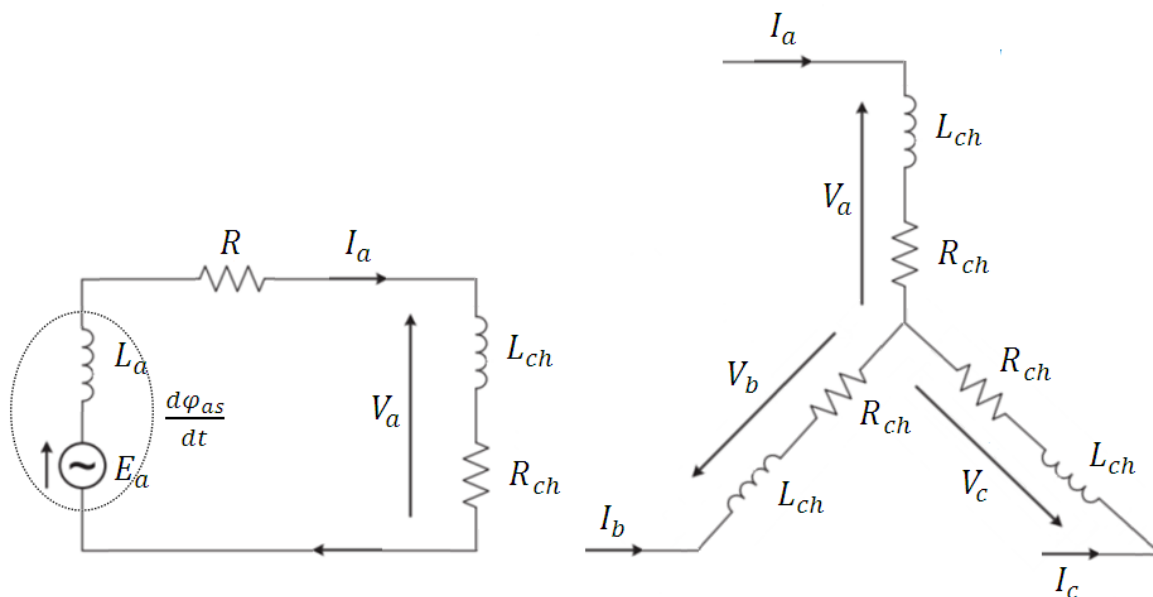


Figure. II.13. Schéma équivalent de la GSAP dans le cas à en charge.

Les résultats de simulation de la GSAP en charge sont montrés dans les figures suivantes :

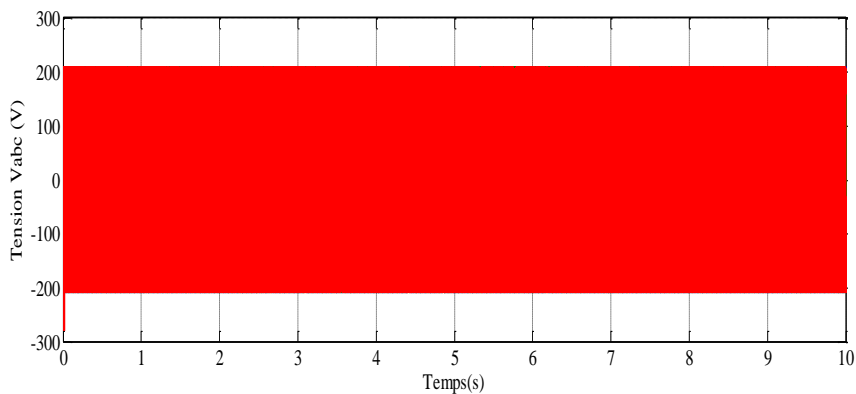


Figure. II.14. Tensions  $V_{abc}$  en charge.

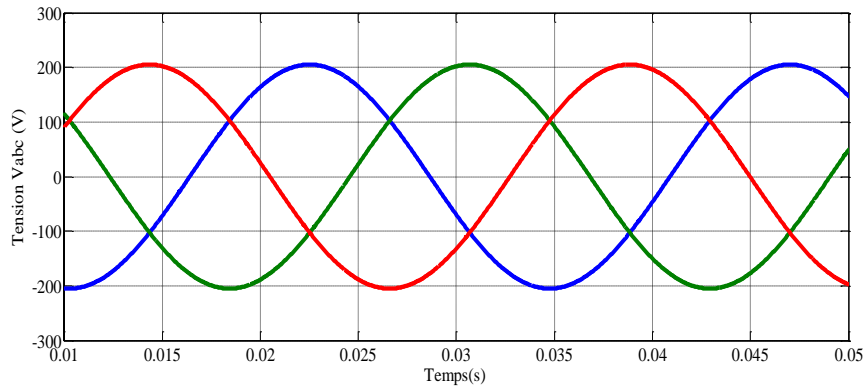


Figure. II.15. Tensions  $V_{abc}$  en charge avec zoom.

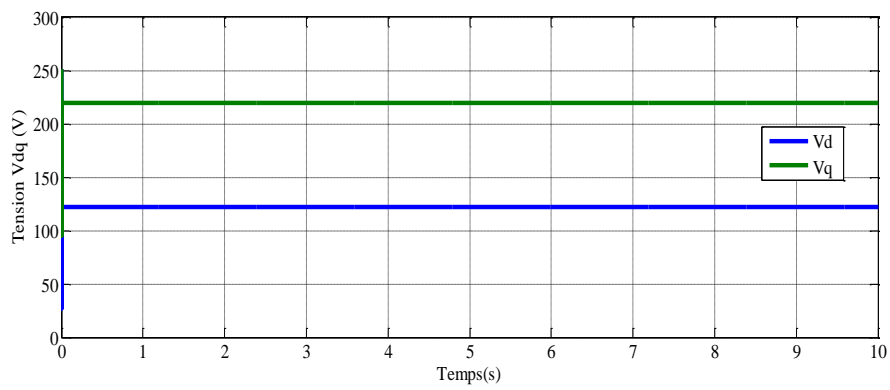


Figure. II.16. Tensions  $V_{dq}$  cas en charge.

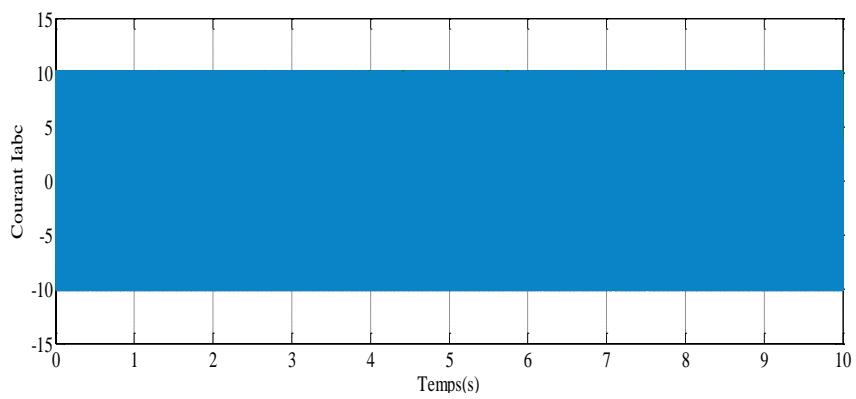


Figure. II.17. Courants  $I_{abc}$  en charge.

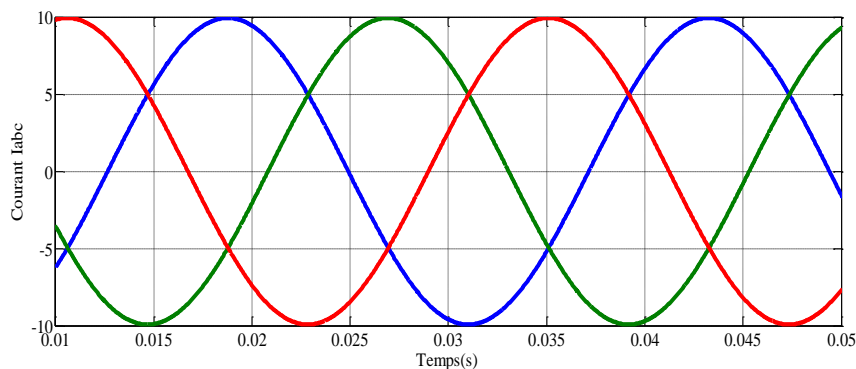


Figure. II. 18. Courants Iabc en charge avec zoom.

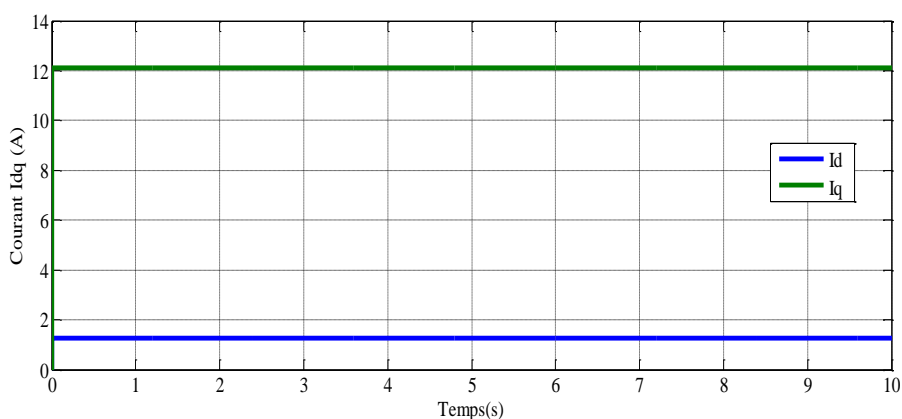


Figure. II. 19. Courants Idq en charge.

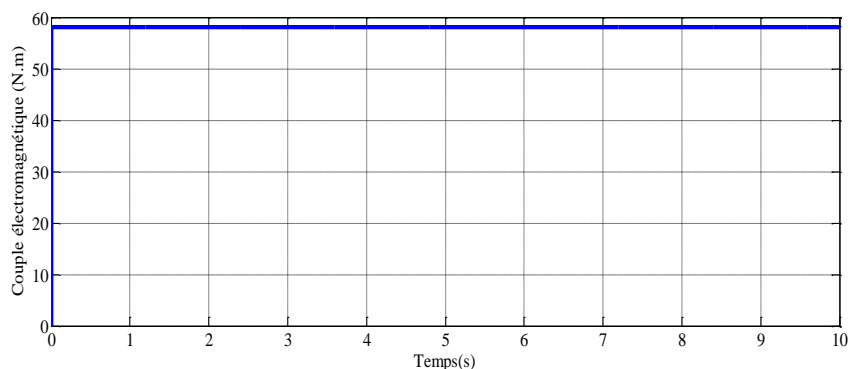


Figure. II. 20. Le couple électromagnétique en charge.

Nous pouvons constater, d’après les courbes des Figures (II.14 et II.15), que des tensions  $V_{abc}$ . Il a atteint la phase de stabilisation rapidement après 0,01s, où la valeur de tension maximale était de 200 V. A travers le courbe de la figure Figure II.16, notons que pour les tensions  $V_{dq}$ , la valeur de la tension s’est élevée directement il a atteint un stade de stabilité, car la valeur de la tension  $V_q$  a atteint 220 V, et la valeur de la tension  $V_d$  120 V. Il

en est de même pour le courant  $I_{abc}$  dans la figure (II.17 et II.18) où la valeur de courants maximale était de 10A. la figure II.19 montre que la valeur du courant  $I_q$  12A et courant  $I_d$  1.25A .

À travers la courbe de la forme. II.20 (couple électromagnétique), On voit que la valeur du couple augmente directement au second 0, puisqu'il passe de 0 à 58  $N.m$  puis se stabilise.

## II.6. Modélisation de la turbine éolienne

Dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal tri-pales Figure II.21. Tous 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 et est bien adapté à la simulation des phénomènes de nature mécanique et électromécanique étudiés ici [CAB 03].

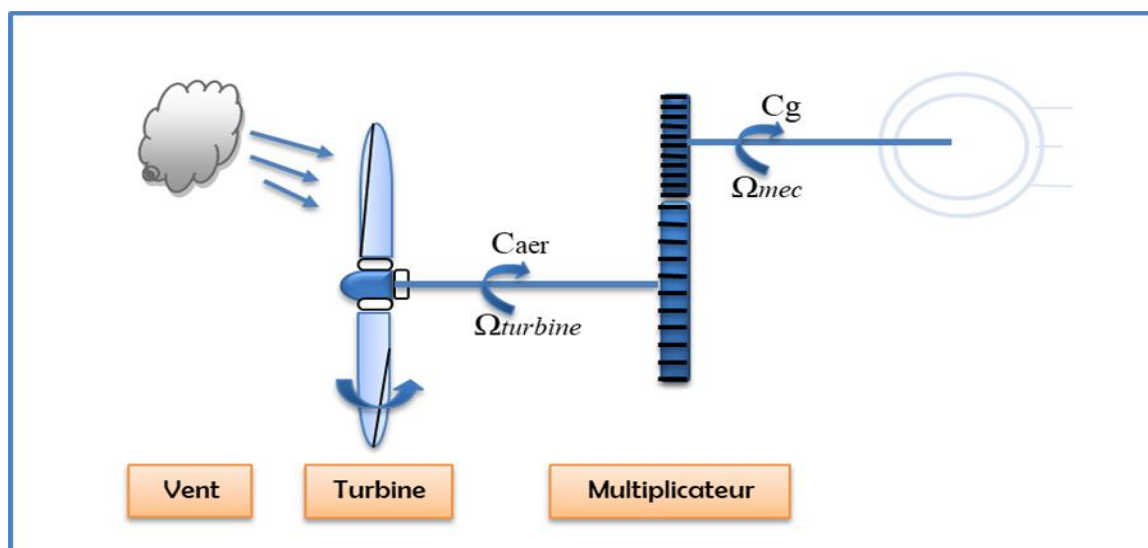


Figure. II. 21. Schéma de la turbine éolienne.

### II.6.1. Modélisation du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de la turbine éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active. Par simplification, le

vecteur de vitesse évolue dans le plan horizontal. Les turbines à axe horizontal sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$v(t) = f(t) \quad (\text{II.25})$$

Elle sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques:

$$v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (\text{II.26})$$

Nous prendrons comme exemple dans notre modélisation l'équation suivante de vent

$$v(t) = 6.5 + 0.02\sin(0.1047t) + 0.2\sin(0.2665t) + 0.1\sin(1.2930t) + 0.02\sin(3.6645t) \quad (\text{II.27})$$

### II.6.2. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal

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 modélisation de la turbine consiste de trois pales de longueur  $R$  entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ , comme le montre la Figure II.20 [ELA 04] [GHE 11].

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

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

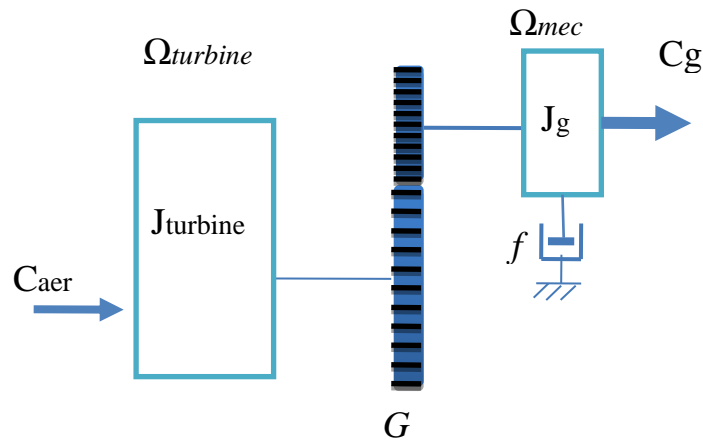


Figure. II. 22. Modèle mécanique simplifié de la turbine.

### II.6.3. 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]:

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

$\rho$ : Est la densité de l'air qui est égale à 1.22 kg/m<sup>3</sup> 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  $P_v$ .

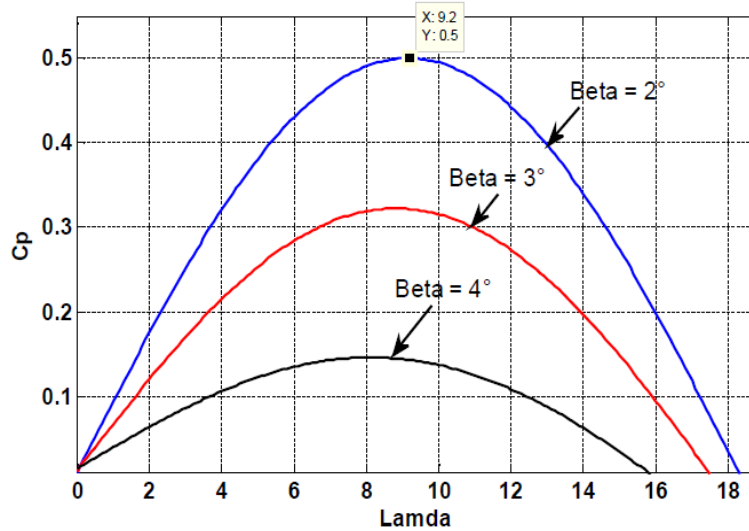
$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (II.29)$$

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  $\lambda$  et l'angle de l'orientation de pale  $\beta$ .

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]:

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (II.30)$$

La courbe réelle du coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine éolienne étudiée dans cette thèse est illustrée dans la Figure II.23  $C_p$  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  $\lambda_{optim}$  et le coefficient de puissance maximal  $C_{p\_max} = 0.5$ .



**Figure. II. 23.** Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation de pale  $\beta$ .

Le couple de la turbine est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$  :

$$C_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} \quad (II.32)$$

$\Omega_t$  : Vitesse de la turbine.

$C_{aer}$  : Couple aérodynamique.

Le ratio de vitesse  $\lambda$  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]:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{II.33})$$

On peut remarquer sur la Figure. II.16 que le coefficient de puissance passe par un maximum pour une valeur particulière du rapport de vitesse que l'on appelle  $\lambda_{opt}$ . Pour laquelle on a coefficient de puissance  $C_p$  maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale. Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur. [DAV 07].

#### II.6.4. Modèle 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:

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

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II.33})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.34})$$

Où :

$C_g$  : Couple du multiplicateur ;

$\Omega_{mec}$  : Est la vitesse de rotation du générateur ;

$G$  : Gain du multiplicateur.

#### II.6.5. Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_t$  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].

$$J_t = J_g + J_t G^2 \quad (\text{II.35})$$

$$C_{mec} = J_t \frac{d\Omega}{dt} \tag{II.36}$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.37}$$

$$C_g - C_{em} = J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} \tag{II.38}$$

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 II.24.

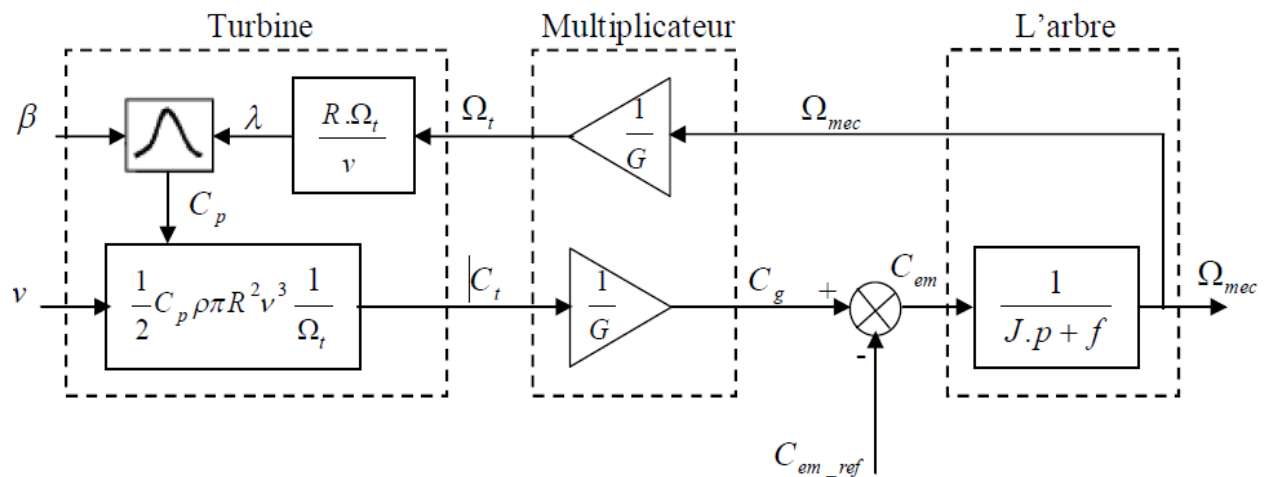
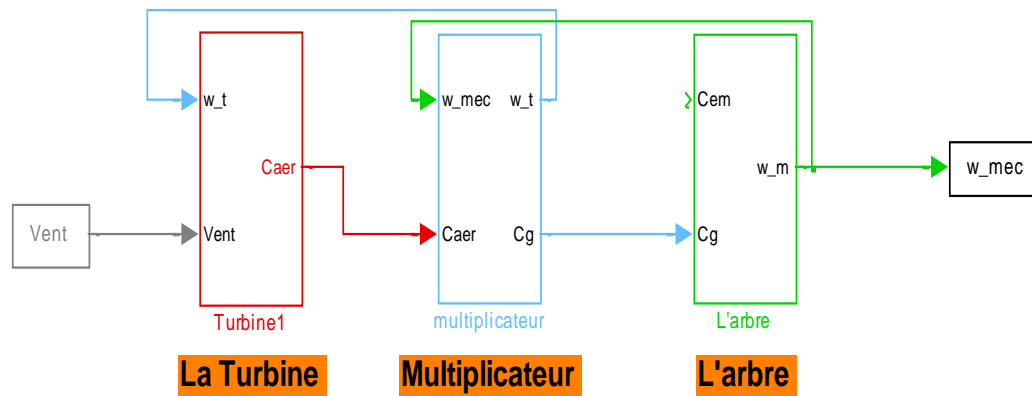


Figure II. 24. Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

### II.6.6. Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK

Le modèle de la turbine se déduit aisément de les équations dessus et est représenté sur la Figure. II.25.



**Figure. II. 25.** Modèle en bloc de la turbine.

Le turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation.

## II.7. Modélisation de redresseur de Tension a MLI

Le redresseur à MLI triphasé est constitué de trois bras. Les interrupteurs bicommandables à deux segments sont des interrupteurs entièrement contrôlables (ouverture et fermeture) remplacent les diodes du montage en pont de Graëtz [NOU 04].

Ces dispositifs offrent les avantages suivants :

- ✓ le courant et la tension peuvent être modulés (modulation de largeur d'impulsions ou MLI), ce qui produit moins de perturbations harmoniques ;
- ✓ le facteur de puissance peut être contrôlé ;
- ✓ le redresseur peut être considéré comme source de tension ou source de courant[KOR 09].

La topologie d'un redresseur MLI triphasé de tension est représentée sur la Figure II.26. Chaque interrupteur est constitué d'un composant semi-conducteur de puissance bicommandable et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur, de part de sa structure, est réversible en courant. Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide

de semi-conducteurs commandés, La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que, les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée [BOU 10]

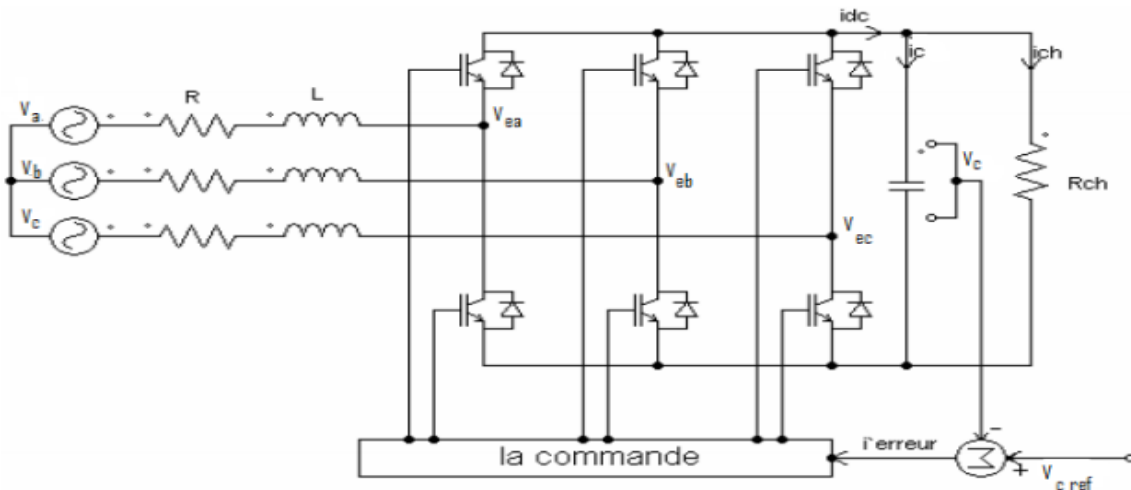


Figure. II. 26. Topologies de base d'un redresseur de tension.

**II.7.1. Principe de fonctionnement d'un redresseur MLI**

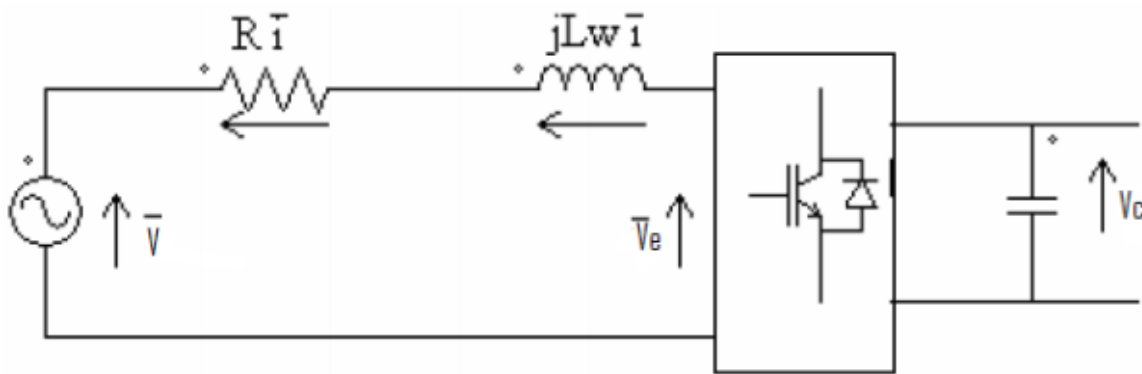
Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la Figure. III.24. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu  $V_{dc}$  est mesurée et comparée avec une référence  $V_{dc-ref}$ , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu  $V_{dc}$  mesurée aux bornes du condensateur C.

Quand le courant  $i_{ch}$  est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande de plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand  $i_{ch}$  devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au block de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative.

La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type de redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenu comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source [HAM 16] [BEN 16] [BOU 09].

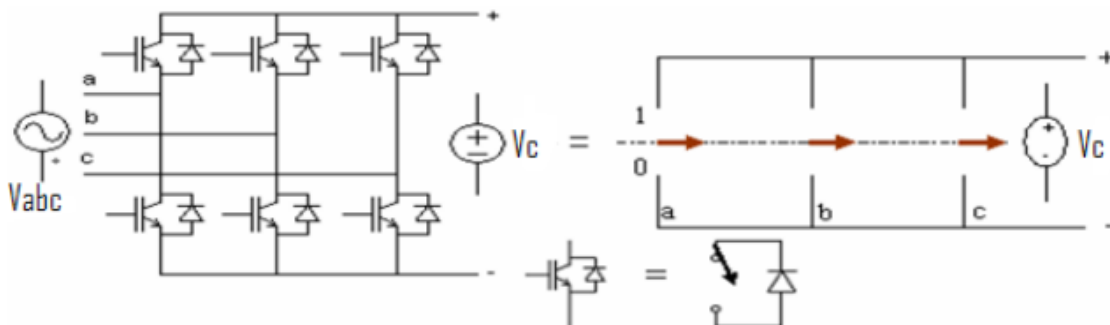
**III.7.2 Modélisation du convertisseur**

La Figure II.27 présente le schéma unifilaire d'un pont redresseur connecté au réseau,  $\bar{e}$  est tension de la source et R, L sont les paramètres de la ligne,  $\bar{v}$  est la tension d'entrée du redresseur MLI [BOU 09] [HAM 16].



**Figure. II. 27.** Schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau.

Le courant de ligne  $\bar{i}$  est commandé par la chute de tension produite par l'inductance L et la résistance R de la ligne et la tension d'entrée du redresseur  $\bar{V}$ . Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (MOS, IGBT, ...) en antiparallèle avec des diodes Figure. III.26 qui sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés à l'ouverture (état 0) et à la fermeture (état 1). Les tensions d'entrée  $V_{eabc}$  sont en fonction des états de ces interrupteurs Figure. III.27 :



**Figure. II. 28.** Pont redresseur MLI.

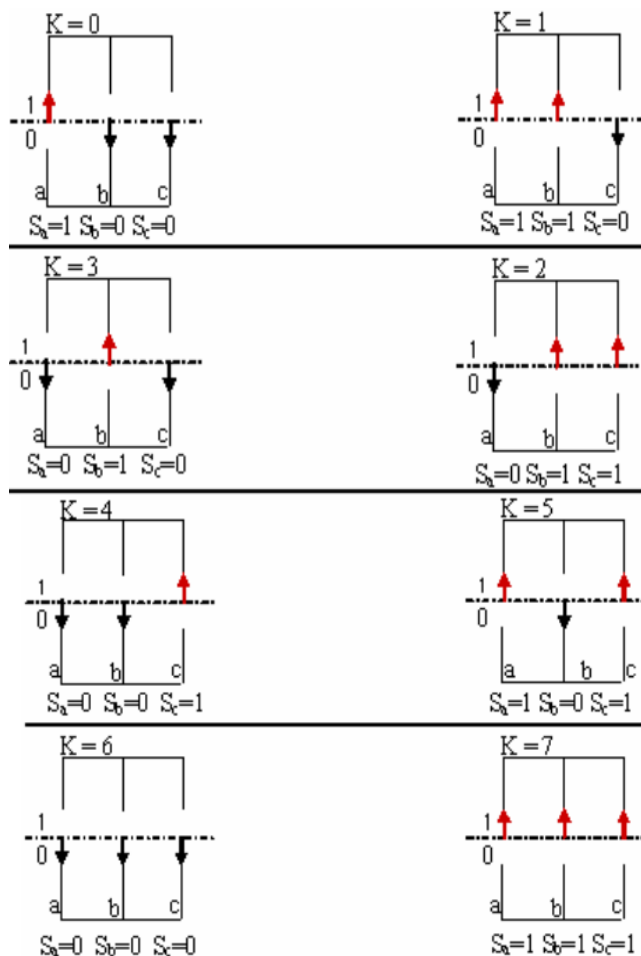


Figure. II. 29. Etats de commutation du pont redresseur MLI.

De cette table, on peut écrire les tensions d'entrée du redresseur d'une manière générale, comme suit [BOU 09]:

$$V_{ab} = (S_a - S_b)V_{dc}$$

$$V_{bc} = (S_b - S_c)V_{dc} \tag{II.39}$$

$$V_{ca} = (S_c - S_a)V_{dc}$$

D'où, on peut déduire les tensions simples :

$$V_{ea} = f_a V_{dc}$$

$$V_{eb} = f_b V_{dc} \tag{II.40}$$

$$V_{ec} = f_c V_{dc}$$

Avec :

$$f_a = \frac{2S_a - (S_a + S_c)}{3}$$

$$f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \tag{II.40}$$

$$f_c = \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3}$$

Leurs valeurs sont résumées dans le tableau suivant :

k	S <sub>a</sub>	S <sub>b</sub>	S <sub>c</sub>	v <sub>ea</sub>	v <sub>eb</sub>	v <sub>ec</sub>
0	1	0	0	2V <sub>c</sub> /3	-V <sub>c</sub> /3	-V <sub>c</sub> /3
1	1	1	0	V <sub>c</sub> /3	V <sub>c</sub> /3	-2V <sub>c</sub> /3
2	0	1	0	-V <sub>c</sub> /3	2V <sub>c</sub> /3	-V <sub>c</sub> /3
3	0	1	1	-2V <sub>c</sub> /3	V <sub>c</sub> /3	V <sub>c</sub> /3
4	0	0	1	-V <sub>c</sub> /3	-V <sub>c</sub> /3	2V <sub>c</sub> /3
5	1	0	1	V <sub>c</sub> /3	-2V <sub>c</sub> /3	V <sub>c</sub> /3
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

**Tableau. II.1** Valeurs des tensions simples selon les états possibles des interrupteurs

- **Représentation dans le référentiel triphasé abc**

Selon la Figure II.27, les équations des tensions simples pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites comme suit :

$$V(t) = V_1(t) + V(t) \tag{II.41}$$

$$V(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} + V(t) \tag{II.42}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} \tag{II.43}$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suit :

$$V_e = V_{dc} \left( S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \tag{II.44}$$

Où S<sub>n</sub> = 0 ou 1, est l'état des interrupteurs, où (n = a, b, c), Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_c \tag{II.45}$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (II.46)$$

Aussi, le courant  $i_c$  est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état de son interrupteur :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (II.47)$$

Donc, du côté alternatif du redresseur, on a :

$$\begin{aligned} L \frac{di_a}{dt} + R i_a &= V_a - V_{dc} \left( S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = V_a - V_{dc} \left( S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + R i_b &= v_b - V_{dc} \left( S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = V_b - V_{dc} \left( S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + R i_c &= V_c - V_{dc} \left( S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = V_c - V_{dc} \left( S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \end{aligned} \quad (II.48)$$

Où les tensions du réseau sont exprimées par :

$$\begin{aligned} V_a &= V_{max} \sin(\omega t) \\ V_b &= V_{max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c &= V_{max} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (II.49)$$

L'équation précédente peut s'écrire comme suit :

$$\left( L \frac{d}{dt} + R \right) i_n = V_n - V_{dc} \left( S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (II.50)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \sum_{k=a}^c i_n S_n - i_{ch} \quad (II.51)$$

La combinaison des équations (II.50) et (II.51) permet de représenter le schéma fonctionnel triphasé suivant Figure. II.30:

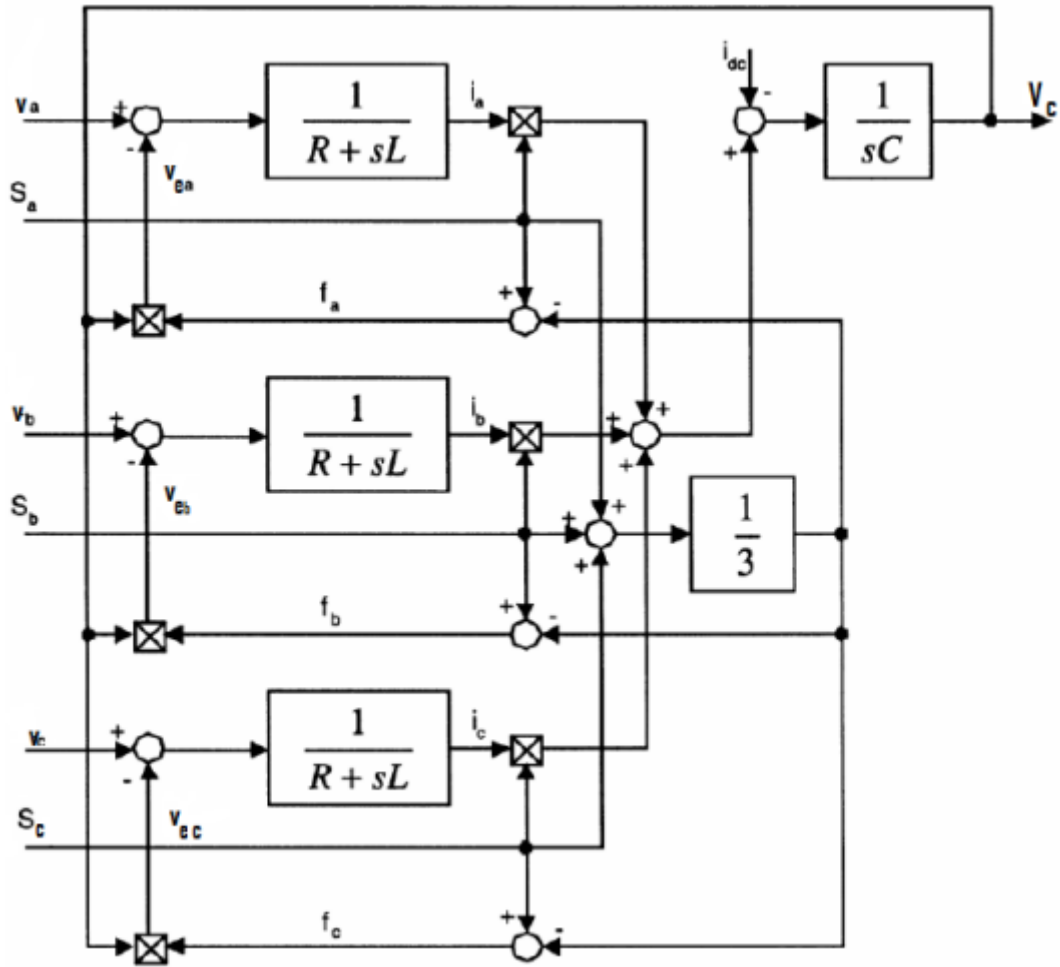
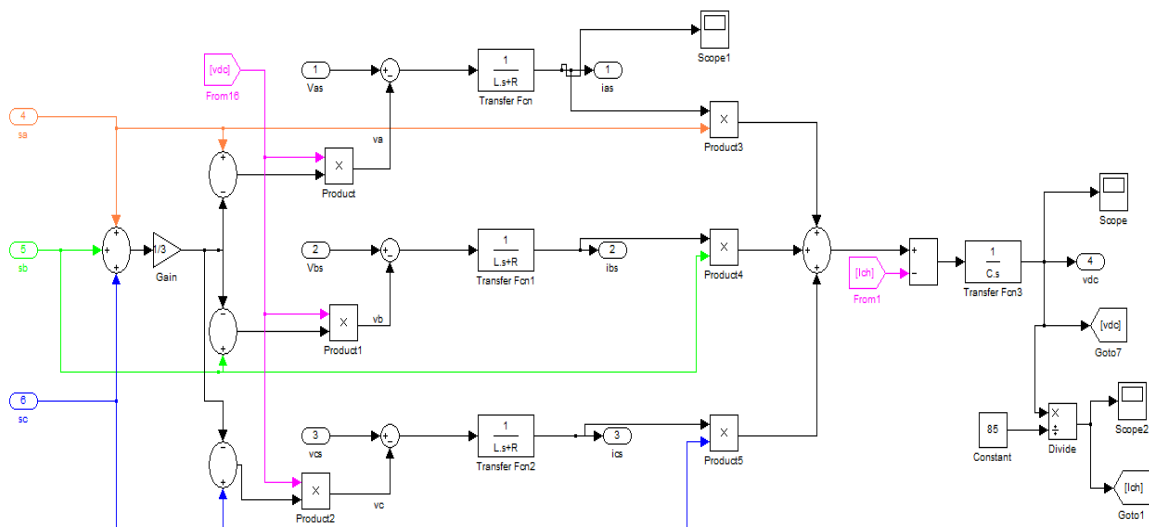


Figure. II. 30. Schéma bloc de redresseur à MLI.



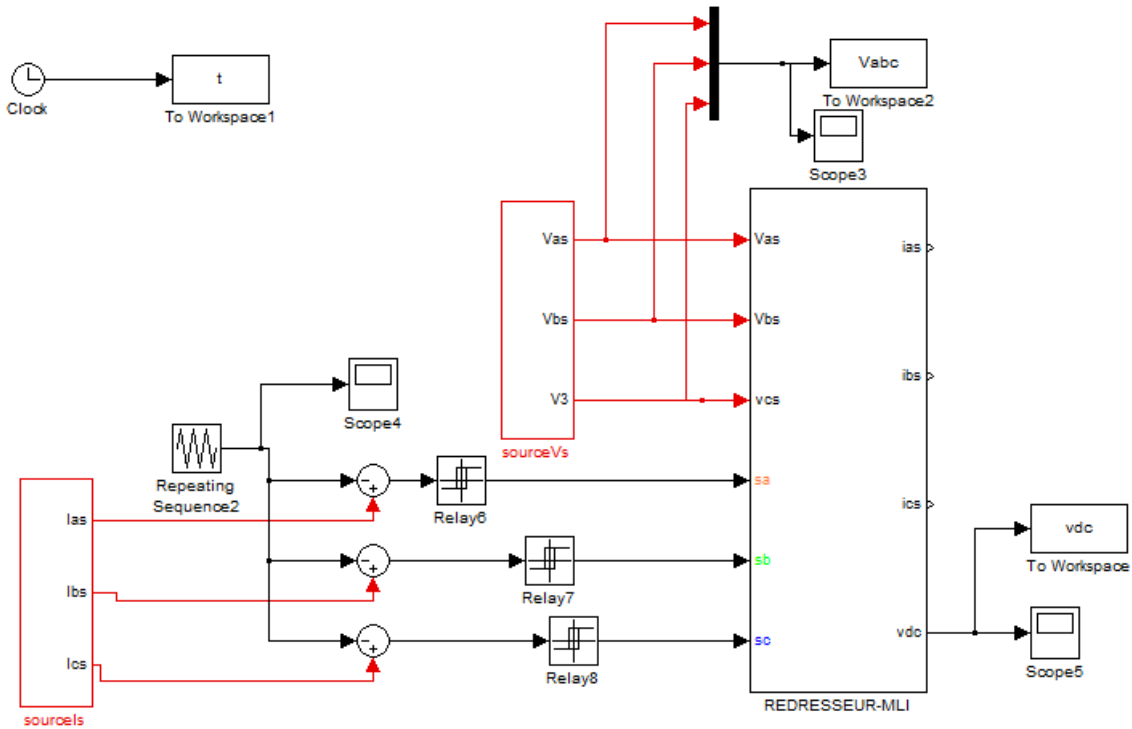


Figure. II. 31. Schéma bloc de redresseur à MLI par MATLAB/Simulink.

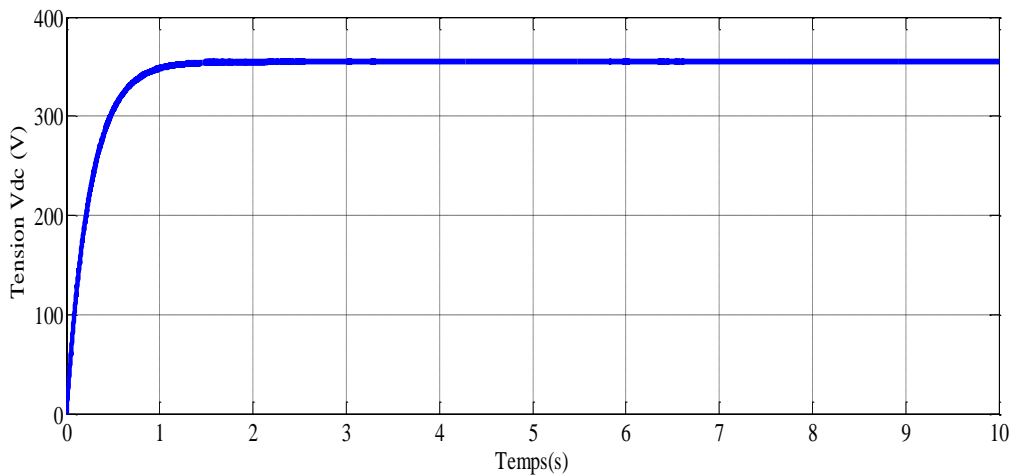


Figure. II.32. La Tension de redresseur MLI  $V_{dc}$ .

## II.8. Conclusion

D'après étude est faite sur l'ensemble des Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP), Turbine éolienne et Redresseur à MLI utilisées dans ce chapitre. Nous avons, présenté les principales théories. Nous avons décrit les différentes structures de GSAP (à vide, en charge et en court-circuit), ensuite nous avons décrit l'interaction entre le vent et la

turbine éolienne (type axe horizontale). Enfin on a présenté la modélisation de redresseur à MLI en tension utilisées pour notre système de conversion.

Dans le chapitre suivant, nous allons examiner la commande prédictive qui est utilisé dans le réglage de la tension de redresseur à MLI.

**Chapitre III**

**Commande Prédicative de  
la GSAP : Application  
dans l'Aérogénérateur**

### III.1. Introduction

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Les systèmes de régulation capable est besoin de performances plus élevées que les contrôleurs classiques, à savoir PI, tout en respectant des contraintes de fonctionnement et de production toujours plus élevées.

Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. La commande prédictive fait partie des techniques de contrôle à modèle interne, Model predictive Control (MPC).

La commande prédictive se différencie des autres techniques de commande par le fait que à optimiser, à partir des entrées/sorties d'un système (état, couples,...), le comportement futur prédit du système considéré. La prédiction est faite à partir d'un modèle interne du système sur un intervalle de temps fini appelé horizon de prédiction. La solution du problème d'optimisation est un vecteur de commande dont la première entrée de la séquence optimale est injectée au système. Le problème est à nouveau résolu sur l'intervalle de temps suivant en utilisant les données du système mises à jour [BEN 09] [MIG 04].

La commande prédictive peut être utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties où le simple régulateur PI est insuffisant. Cette technique est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants, des réponses inverses et de nombreuses perturbations. Les principaux utilisateurs de la commande prédictive sont les raffineries de pétroles, l'industrie chimique et agroalimentaire, la métallurgie, l'aérospatiale...

Dans ce chapitre nous présentons la stratégie et un résumé historique de la commande prédictive, puis nous exposons la description et l'analyse théorique de l'algorithme GPC, en plus la commande prédictive généralisée cascade avec Redresseur a MLI est étudié afin d'améliorer les performances de tension de buse continue  $V_{dc}$  par GPC.

Finalement, une démonstration des résultats de simulation indiquant les performances du régulateur GPC appliquée à la GSAP est présentée dans la dernière partie.

### **III.2. Historique de la commande prédictive**

La commande prédictive est une technique relativement récente, qui n'a connu un réel essor que depuis années 80, grâce aux travaux de D.W. Clarke et de son équipe à Oxford. Toutefois cette technique de commande que l'on peut rattacher à la famille des commandes prédictives par modèle MPC (Model Predictive Control) suscite un intérêt dans le domaine industriel depuis la fin des années 70. En effet en 1978, J. Richalet publie les premiers résultats obtenus dans des applications industrielles et en 1979 des ingénieurs de la Shell, C.R Cutler et D.M. Prett font part de leur expérience sur un craqueur catalytique. En 1985, D.W. Clarke présente la première version de la commande prédictive généralisée GPC. Il faut attendre 1987, pour voir publier les premiers résultats obtenus par J. Richalet sur des systèmes électromécanique rapides, tels que des commandes d'axes d'un robot [MIG 04] [ALB 04].

La commande prédictive a connu engouement dans le secteur de l'industrie chimique et pétrolier, une des raisons tient en partie au fait que cette technique fournit une méthodologie susceptible de prendre en compte d'une façon systématique les contraintes lors de la conception et de l'implantation de la loi de commande.

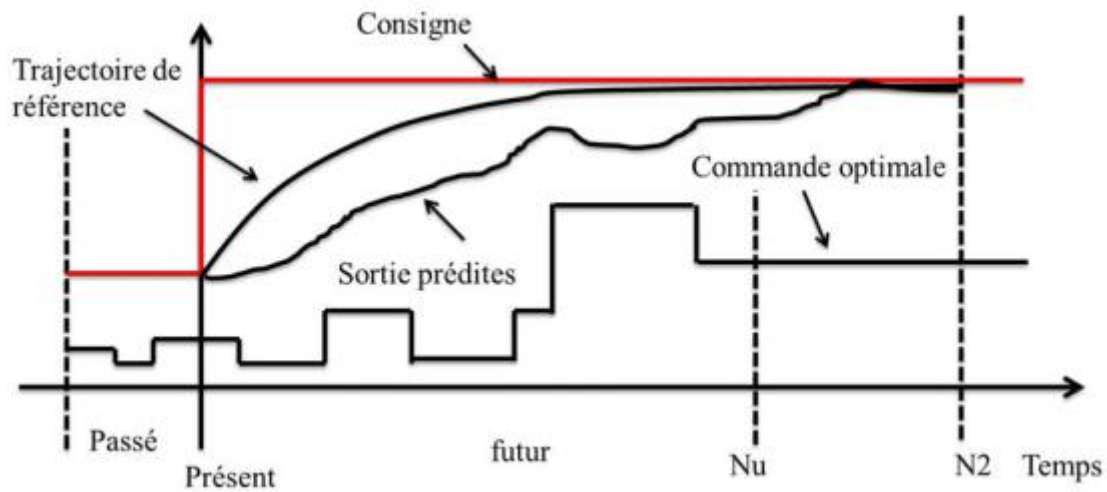
### **III.3. Principe de la commande prédictive**

La commande prédictive, appelée aussi compensation ou correction anticipatrice, est une technique de commande avancée. Elle a pour objectif la commande des systèmes industriels complexe comportant plusieurs entrées et sorties ou le simple régulateur PI est insuffisant. Le principe de cette commande est d'utiliser un modèle dynamique du processus commandé à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. La commande prédictive fait partie des techniques de commande à modèle interne. Elle est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants ou des réponses inverses et subissent de nombreuses perturbations. Cette technique de commande a été inventée par J.RICHALET en 1978 et généralisée par D.W.Clarke en 1987 en collaboration avec de grands groupes industriels [MER 07] [AIS 07].

Dans ses fondements, la commande prédictive définit à chaque instant la meilleure commande à appliquer au processus, en considérant la référence souhaitée, l'état actuel du système et une prédiction du futur proche obtenue à l'aide d'un modèle comportemental. Cette caractéristique de prédiction que l'on peut étendre d'ailleurs aux perturbations connues confère au système commandé un fort potentiel dynamique.

## Chapitre III : Commande Prédictive de la GSAP : Application dans l'Aérogénérateur

D'une manière générale, l'algorithme de la commande prédictive à modèle interne réalise à chaque instant d'échantillonnage les mêmes étapes, comme le montre la Figure III.1.



**Figure. III.1.** principe de commande prédictive.

Calcul des prédictions des variables commandées jusqu'à un horizon de temps  $N2$  grâce au modèle interne du processus.

- Elaboration d'une trajectoire de référence à suivre.
- Calcul d'une séquence d'échantillonnages futurs de commandes optimales minimisant une fonction de cout sur horizon temporel  $Nu$ .
- Seul le premier élément de la séquence de commande calculée est appliqué sur le système au cours du prochain échantillonnage. Toutes ces étapes se répéteront ensuite, c'est le principe d'horizon fuyant [MER 07] [AIS 07].

### **III.4. Commande prédictive généralisée**

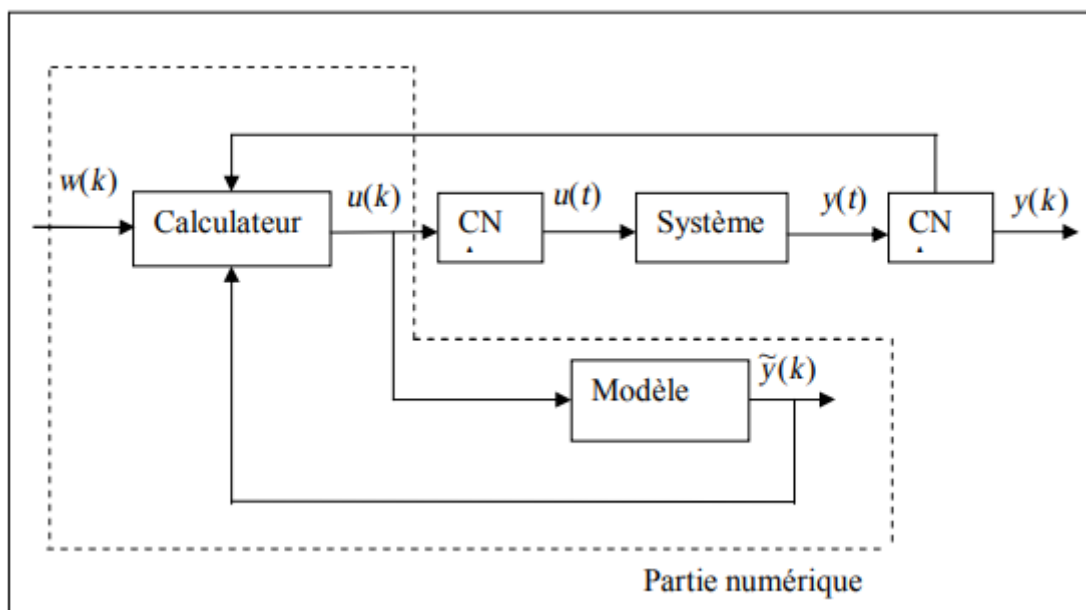
La commande prédictive généralisée GPC (Generalized Predictive Control) de Clarke, Mohtadi et Tuffs [CAM 03] est considéré comme étant la plus populaire des méthodes de prédiction, particulièrement pour les processus industriels. Elle combine la prédiction du comportement futur du procédé avec la commande de rétroaction [CLA 87] [MAL 10].

### III.5. Principe de fonctionnement du Générateur Prédictive Contrôle GPC

La commande prédictive c'est la résolution répétée à chaque pas de temps d'un problème de commande optimale : "comment aller de l'état actuel à un objectif de manière optimale en satisfaisant des contraintes".

Pour cela il faut connaître à chaque itération l'état du système et utiliser un outil de résolution numérique [NIC 06] [KAD 02] .

Le schéma de principe de la commande prédictive généralisée est donné par la figure suivante:



**Figure. III.2.** Principe de fonctionnement de la commande prédictive généralisée [PAT 96].

### III.6. Formulation du modèle

Tous les algorithmes de commande prédictive ne diffèrent entre eux que par le modèle utilisé pour représenter le procédé et par la fonction de coût à minimiser. Le modèle du processus peut prendre différentes représentations (par fonction de transfert, par variables d'état, réponse impulsionnelle ...). Pour notre formulation, la structure adoptée ici est la forme CARMA [CAM 03] [MAL 00]:

$$y(t) + a_1y(t - 1) + \dots + a_nay(t - na) = b_0u(t - d) + b_1u(t - d - 1) + \dots + b_nbu(t - d - nb) + e(t) \quad \text{(III.1)}$$

Avec :

### Chapitre III : Commande Prédictive de la GSAP : Application dans l'Aérogénérateur

$y(t)$  : sortie du processus

$u(t)$  : commande appliquée l'entrée

$d$  : retard du système, (les machines électriques sont considérées comme étant des procédés rapides, on prend le plus souvent  $d = 1$ ).

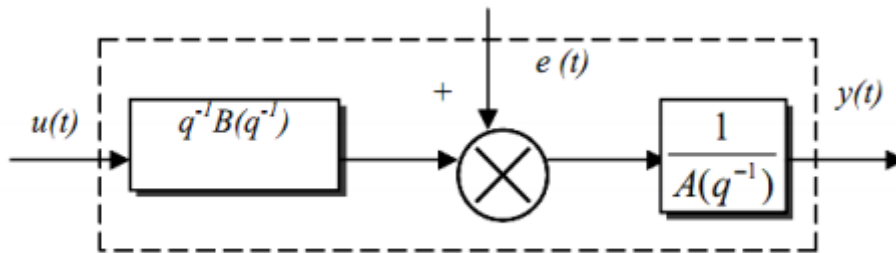
$q^{-d}$  : opérateur du retard ( $z^{-d}y(t) = y(t - d)$ ).

$e(t)$ : terme lié au perturbation.

Les polynômes  $A(z^{-1})$  et  $B(z^{-1})$  sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{na}z^{-na} = 1 + \sum_{i=1}^{i=na} a_i z^{-i} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb} = \sum_{i=0}^{i=nb} b_i z^{-i} \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Le modèle numérique de représentation pour le GPC est illustré par la Figure III.3 suivante :



**Figure. III.3.** Modèle numérique de représentation pour le GPC.

La forme du terme lié à la perturbation définit le système de modélisation (processus + perturbation) :

$$e(t) = C(z^{-1}) \frac{\xi(t)}{D(z^{-1})} \quad (\text{III.3})$$

$\xi(t)$  : est un bruit blanc centré (sa valeur moyenne est nulle).

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_{nc}z^{-nc} \quad (\text{III.4})$$

Dans le modèle CARMA, on raisonne sur un modèle incrémental du système, de ce fait le polynôme  $D(z^{-1})$  est pris comme étant l'opérateur de différence  $\Delta(z^{-1})=1-z^{-1}$  (intégrateur). Le but recherché avec l'introduction d'un intégrateur est l'annulation de toute erreur statique vis-à-vis d'une consigne ou d'une perturbation constante. On prendra par la

suite  $C(z^{-1})=1$ . Finalement, le modèle CARMA partir duquel sera dérivée l'expression de la loi de commande GPC est donnée par la relation suivante [BAR 08][MEZ 09]:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-1}B(z^{-1})u(t) + \frac{\xi(t)}{\Delta(z^{-1})} \quad (\text{III.5})$$

### III.7. Développement de prédicteur

Pour la simplicité au cours de développement  $C(z^{-1})$  est choisie comme étant égale à 1, on obtient le modèle [CAM 03]:

$$\left[ A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})z^{-d}u(t-1) + \frac{e(t)}{\Delta} \right] \times \Delta E(z^{-1})z^j \quad (\text{III.6})$$

Pour dériver le prédicteur j-pas en avant, on considère l'identité

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-j}F(z^{-1}) \quad (\text{III.7})$$

Avec

$$A(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1}) \quad (\text{III.8})$$

$E_j(z^{-1})$ : est un polynôme d'ordre (j - 1)

$F(z^{-1})$ : est un polynôme d'ordre (na )

On multiplie l'équation (III.8) par le terme  $\Delta E(z^{-1})z^j$  on obtient :

$$A(z^{-1})E_j(z^{-1})y(t+j) = E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1})e(t+j) \quad (\text{III.9})$$

En utilisant l'identité de Diophantine (III.7) on obtient :

$$\left( 1 - z^{-j}F_j(z^{-1}) \right) y(t+j) = E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1})e(t+j) \quad (\text{III.10})$$

On déduit donc l'équation de sortie  $y(t+1)$

$$y(t+j) = F_j(z^{-1})y(t) + E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1})e(t+j) \quad (\text{III.11})$$

Comme  $E_j(z^{-1})$  est de degré (j - 1) le produit  $E_j(z^{-1})$  est nul, ce qui prouve la robustesse de l'algorithme dont les composantes du bruit sont toutes nulles dans le futur, ce qui rend ce type de prédicteur optimal et robuste, d'où le modèle prédicteur est comme suit :

$$\check{y}\left(t + \frac{j}{t}\right) = G_j(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + f_j(t+j) \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$$\Delta u(t + j - d - 1) = u(t + j - d - 1) - u(t + j - d - 2) \text{ pour } 1 \leq j \leq N_u$$

$$G_j(z^{-1}) = E_j(z^{-1})B(z^{-1})$$

$$f_j(t + j) = F_j(z^{-1})y(t) \text{ pour } j = 1 \dots N_2$$

$$F_j(z^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1}z^{-1} + \dots + f_{j,na}z^{-na}$$

$$E_j(z^{-1}) = e_{j,0} + e_{j,0}z^{-1} + \dots + e_{j,(j-1)}z^{-(j-1)}$$

Donc la prédiction à long horizon se fait par le calcul récursif du polynôme  $G_j(z^{-1})$  et de la fonction  $f_j(t + j)$

Pour calculer  $G_{j+1}(z^{-1}) = E(z^{-1})_{j+1}B(z^{-1})$  et  $f_{j+1}(t + j) = F_{j+1}(z^{-1})y(t)$  on procède de la récursivité de l'équation de Diophantienne utilisée précédemment.

### **III.8. Critère d'optimisation**

Une fois les prédictions faites, on doit trouver la future séquence de commande à appliquer sur le système pour atteindre la consigne désirée en suivant la trajectoire de référence. Pour cela, on vient minimiser une fonction de coût qui diffère selon les méthodes, mais généralement cette fonction contient les erreurs quadratiques entre la trajectoire de référence et les prédictions sur l'horizon de prédiction ainsi que la variation de la commande. Cette fonction de coût est la suivante [PAT 96]:

$$J_{GPC} = \sum_{j=N_1}^{N_2} [w(t + j) - \hat{y}(t + j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_y} \Delta u(t + j - 1)^2 \quad (\text{III.13})$$

Avec:

$w(t + j)$ : Consigne appliquée à l'instant  $(t + j)$  ;

$\hat{y}(t + j)$ : Sortie prédite à l'instant  $(t + j)$  ;

$\Delta u(t + j - 1)$ : Incrément de commande à l'instant  $(t + j - 1)$  ;

$N_1$  : Horizon de prédiction minimale sur la sortie ;

$N_2$  : Horizon de prédiction maximale sur la sortie avec  $N_2 \geq N_1$  ;

## **Chapitre III : Commande Prédicative de la GSAP : Application dans l'Aérogénérateur**

$N_u$  : Horizon de prédiction sur la commande ;

$\lambda$ : Coefficient de pondération sur la commande.

L'hypothèse suivante est faite sur la commande:  $\Delta u(k + j) = 0$  pour  $j \geq N_u$ .

La minimisation analytique de cette fonction fournit la séquence de commandes futures dont seule la première sera effectivement appliquée sur le système. La procédure étant itérée de nouveau à la période d'échantillonnage suivante selon le principe de l'horizon glissant.

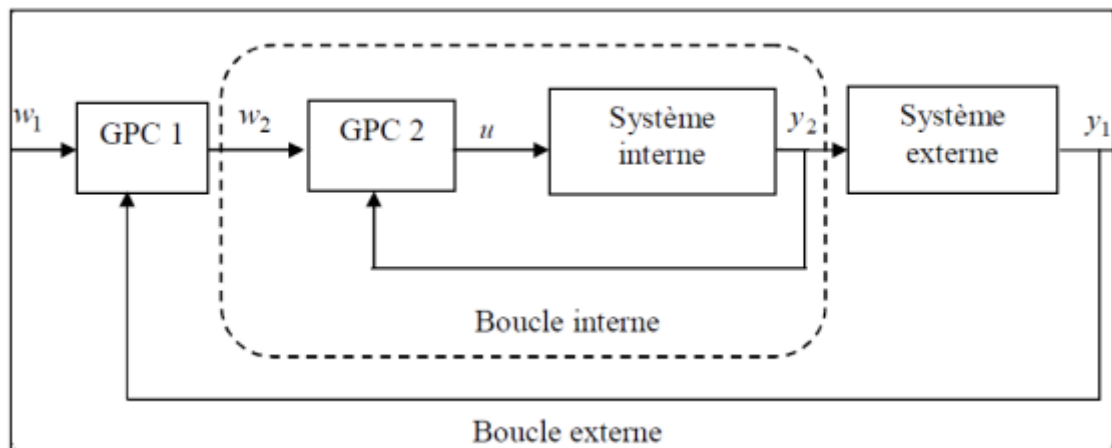
L'expression du critère appelle plusieurs remarques

- ✓ Si l'on dispose effectivement des valeurs de la consigne dans le futur, on utilise toutes ces informations entre les horizons  $N_2$  et  $N_1$  de façon à faire converger la sortie prédite vers cette consigne.
- ✓ On trouve l'aspect incrémental du système en considérant  $\Delta u$  dans le critère
- ✓ Le coefficient  $\lambda$  permet de donner plus ou moins de poids à la commande par rapport à la sortie, de façon à assurer la convergence lorsque le système de départ présente un risque d'instabilité [NIC 06].

### **III.9. Commande prédictive généralisée cascade**

La commande prédictive généralisée cascade à été mise au point pour essayer de combiner les avantages de la commande prédictive, à savoir possibilité de créer un effet d'anticipation, à ceux d'une structure cascade très utilisée pour améliorer notamment la réjection des perturbations dans les boucles internes. Grâce à cette structure, plusieurs variables pourront être commandées en même temps. Pour simplifier la présentation, on envisagera ici qu'une structure à deux boucles, corrigées chacune par un algorithme de commande prédictive [NAI 08] [PAT 96].

En supposant que l'on ait pu au préalable décomposer le système en deux sous systèmes notés respectivement système interne et système externe. Le schéma de principe de la commande prédictive généralisée cascade est donné Figure III.4 .



**Figure. III.4.** Structure d'une commande prédictive généralisée cascade.

Sur la figure, on voit apparaître immédiatement qu'il est impossible de définir un modèle de représentation entre le sortie  $w_2$  du *GPC1* et la sortie  $y$  car ce modèle de représentation s'avère être fonction de *GPC2*. Les seuls modèles disponibles seront donc ceux correspondant aux deux sous-systèmes.

Avec :

$w_1$  : Consigne du système global ;

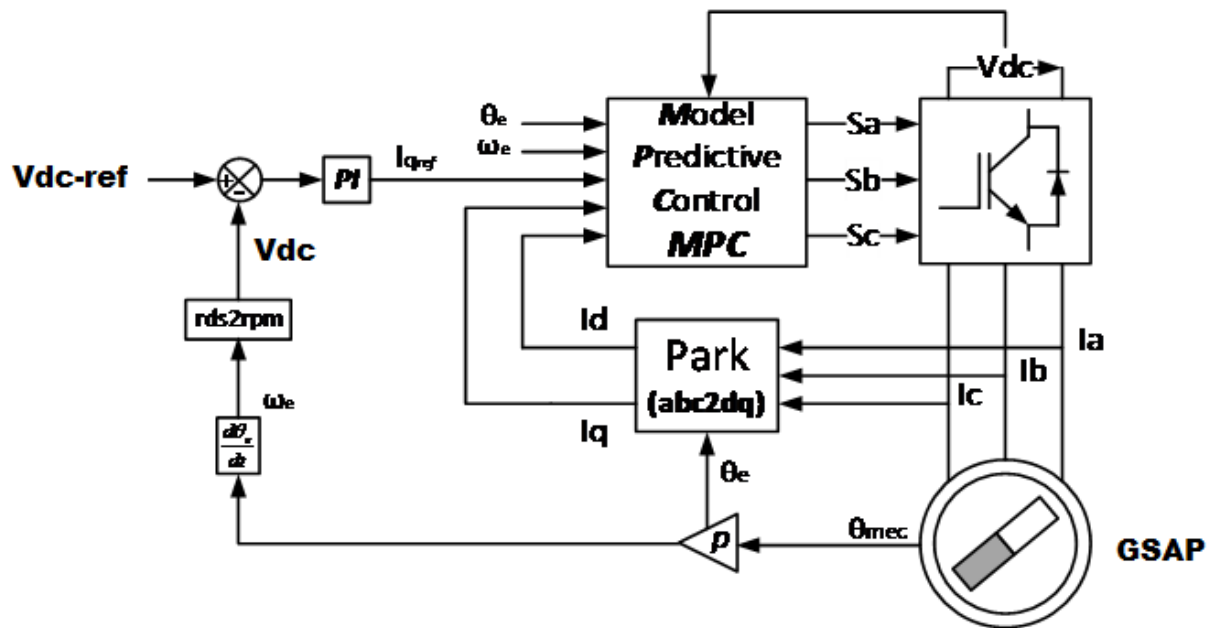
$w_2$  : Consigne du système interne ou consigne interne ;

$u$  : Commande appliquée sur l'ensemble du système ;

$y_1$  : Sortie du système globale.

#### III.10. Application de la Commande prédictive a la GSAP

La stratégie de contrôle prédictif proposée repose sur le fait qu'un seul nombre fini des états de commutation possibles peuvent être générées par un convertisseur de puissance statique et que le système peut être utilisé pour prédire le comportement des variables pour chaque état de commutation. Pour le choix de l'état de commutation approprié à appliquer, un critère de sélection doit être défini. Ce critère consiste à une fonction de coût qui sera évaluée pour les valeurs prédites des variables à contrôler. La prévision de la valeur future de ces variables est calculée pour chaque état de commutation possible, puis l'état qui minimise la fonction de coût est sélectionné.



**Figure. III.5.** Structure de control prédictive de GSAP.

L'objectif du système de contrôle est de minimiser l'erreur entre les courants mesurés et leurs valeurs de référence. Cette exigence peut s'écrire sous la forme d'une fonction coût qu'elle peut être exprimée en coordonnées orthogonales ( $\alpha, \beta$ ) ou en coordonnées tournantes ( $d, q$ ). Et elle mesure l'erreur entre les références et les courants prédits comme suivant :

$$g = (i_d^* - i_d(k+1))^2 + (i_q^* - i_q(k+1))^2$$

Avec :

$i_d(k+1)$  et  $i_q(k+1)$  sont les composants prédits directe et en quadrature du courant de charge.

$i_d^*$  et  $i_q^*$  sont les courants de référence qui peuvent obtenus à partir d'un boucle de régulation externe tel que : la commande FOC.

La dérivée du courant de charge  $di/dt$  est remplacée par une approximation d'Euler en avant. Cette approximation est de la forme :  $\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_e}$  où :  $T_e$  : la période d'échantillonnage.

En partant des équations mathématiques de la MSAP dans le repère tournant de Park ; les expressions des courants prédites à l'instant  $k+1$  peuvent écrites comme suivant :

### **Chapitre III : Commande Prédicative de la GSAP : Application dans l'Aérogénérateur**

$$\begin{cases} i_d(k+1) = (1 - \frac{R}{L} \cdot T_e) i_d(k) + (T_e \cdot \omega_e \cdot i_q(k)) + \frac{v_d(k)}{L} \cdot T_e \\ i_q(k+1) = (1 - \frac{R}{L} \cdot T_e) i_q(k) - (T_e \cdot \omega_e \cdot i_d(k)) - (\psi_r \cdot \omega_e \cdot T_e) + \frac{v_q(k)}{L} \cdot T_e \end{cases}$$

Avec :

$V_{d,q}(k)$  : les composantes des 7 valeurs du vecteur tension généré par l'onduleur selon les états des clés  $S_{a,b,c}$  comme suivant :

$S_a$	$S_b$	$S_c$	Vecteur tension V
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = \frac{2}{3} V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = \frac{1}{3} V_{dc} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
0	1	0	$V_3 = -\frac{1}{3} V_{dc} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
0	1	1	$V_4 = -\frac{2}{3} V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = -\frac{1}{3} V_{dc} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
1	0	1	$V_6 = \frac{1}{3} V_{dc} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
1	1	1	$V_7 = 0$

**Tableau.III.1** Vecteurs tension selon les états des clés dans le plan ( $\alpha, \beta$ ).

L'optimisation de la fonction coût permet de choisir le vecteur tension convenable à appliquer au convertisseur et ceci permet de générer les composantes  $V_d(k)$  et  $V_q(k)$  à partir de la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \sin(\theta_e) \\ -\sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad \text{où : } V_x = V_\alpha + j V_\beta \quad \text{avec } x \in \{0, 1, \dots, 7\}$$

#### **III.11. Résultats de simulation**

Dans cette section Nous présenterons, les résultats de simulation pour valider la commande prédictive et la commande par redresseur à MLI de la GSAP, en considérant une éolienne à 1.5Kw dont les paramètres sont donnés en (annexe A). La stratégie de contrôle

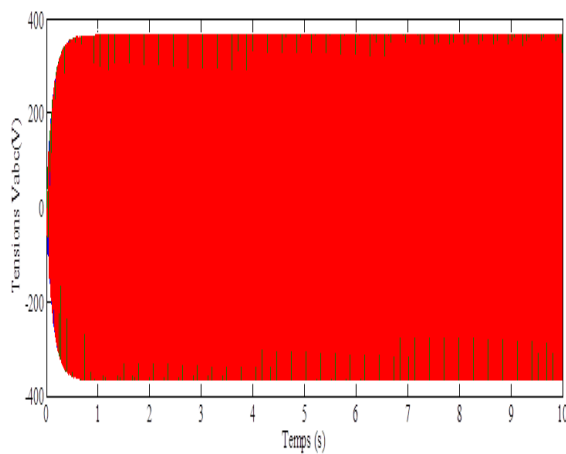
### Chapitre III : Commande Prédicative de la GSAP : Application dans l'Aérogénérateur

prédicative au niveau du redresseur de tension à la GSAP avec l'utilisation en charge, l'amplitude de la tension référence est fixée au début à une valeur constante d'entrée de redresseur est égal à 350V.

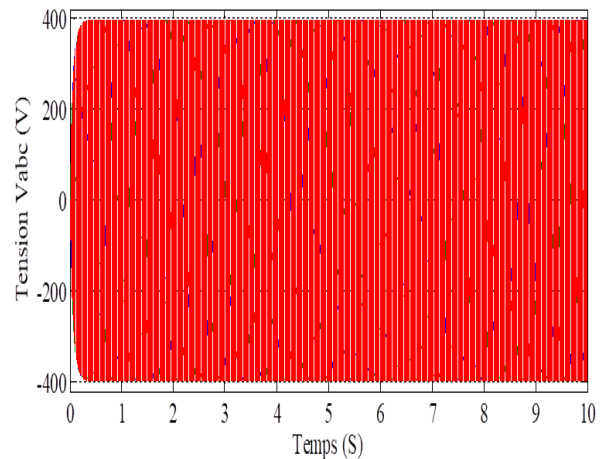
Tout d'abord, on note que le profil de la vitesse mécanique (figure III.13), On remarque que la valeur de Vitesse mécanique augmente rapidement, puisqu'elle atteint le stade de stabilité après 0.5 secondes, et se stabilise à la valeur 155(rad/s).

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures III.6 et III.7 respectivement. Montre que la tension  $V_{abc}$  La figure III.8 et III.9, montre respectivement le courant par phase sans et sa spectres des harmoniques avec ajustement de la technique proposé.

La figure III.12 montre que la tension de redresseur ainsi que sa référence avec une bonne performance dynamique, Il y a une différence entre Tension  $V_{dc}$  redresseur à MLI et Tension  $V_{dc}$  prédictive contro, Comme dans (prédicative control ) la valeur de Tension  $V_{dc}$  a augmenté directement et s'est stabilisée à 350 V , tandis que dans (redresseur à MLI) la valeur de Tension  $V_{dc}$  a augmenté plus lentement et avant la stabilisation, des fluctuations se sont produites puis se sont stabilisées à la valeur de 350 V.

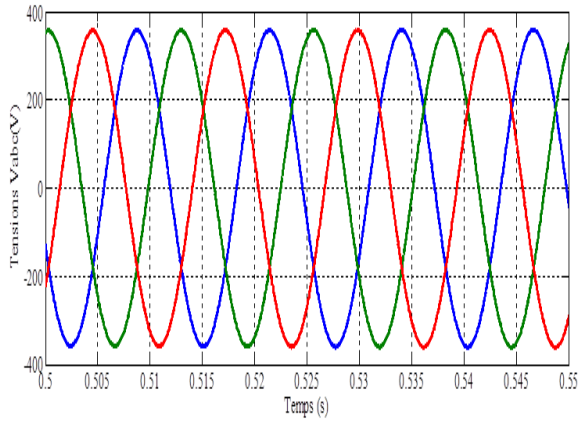


a. Tensions  $V_{abc}$  redresseur à MLI.

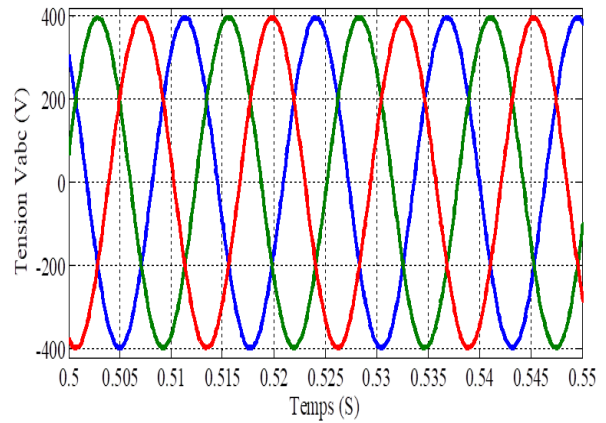


b. Tensions  $V_{abc}$  prédictive control.

**Figure. III.6.** Tensions  $V_{abc}$  dans deux cas de simulation.

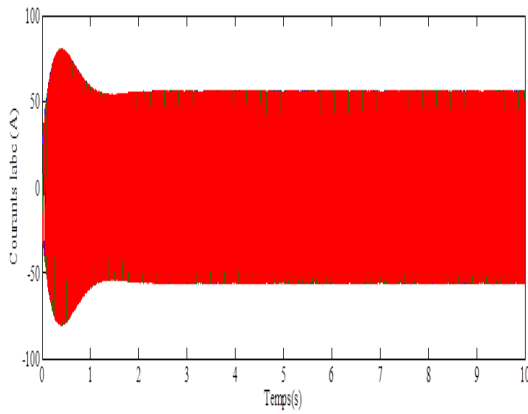


**a.**Tensions  $V_{abc}$  redresseur à MLI.

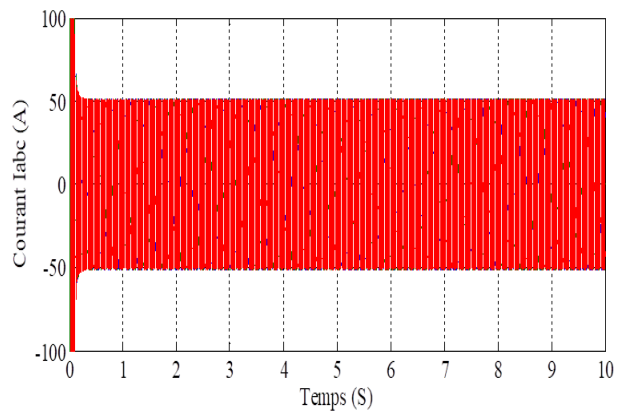


**b.**Tensions  $V_{abc}$  prédictive control.

**Figure. III.7.** Tensions  $V_{abc}$  dans deux cas avec zoom.

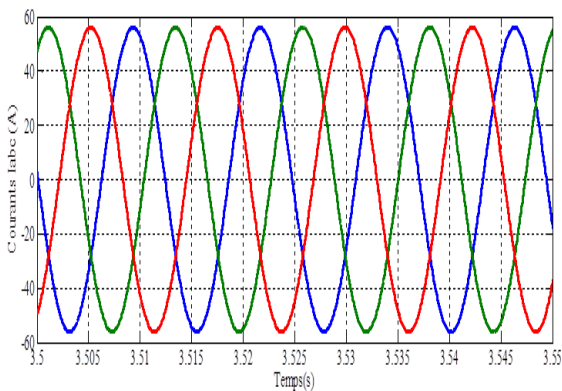


**a.**Courant  $I_{abc}$  redresseur à MLI.

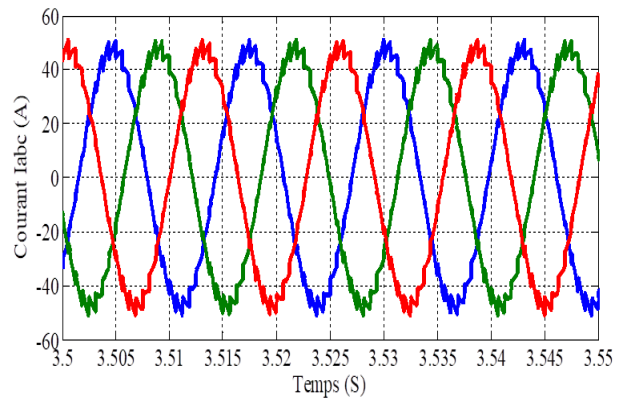


**b.**Courant  $I_{abc}$  prédictive control.

**Figure. III.8.** Courant  $I_{abc}$  dans deux cas de simulation.

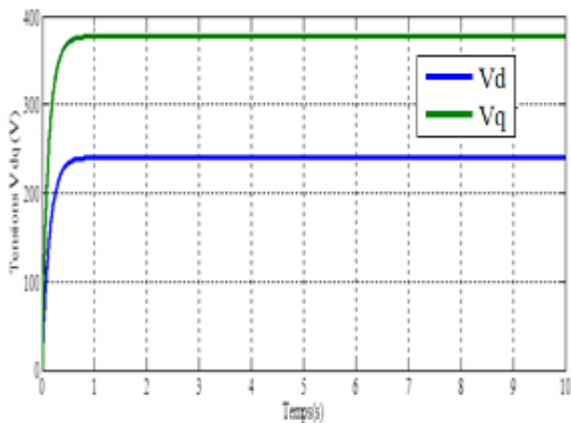


**a.**Courant  $I_{abc}$  redresseur à MLI.

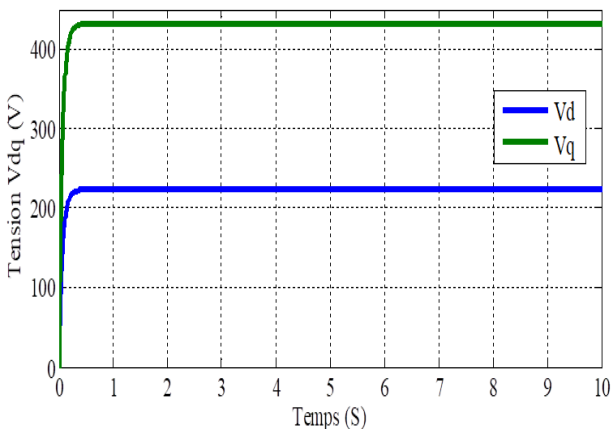


**b.**Courant  $I_{abc}$  prédictive control.

**Figure. III.9.** Courant  $I_{abc}$  dans deux cas avec zoom.

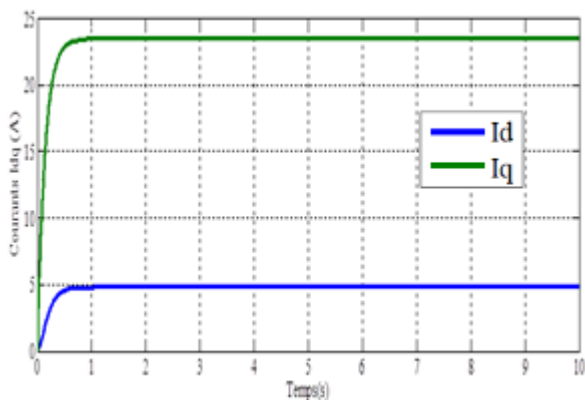


**a.**Tension  $V_{dq}$  redresseur à MLI.

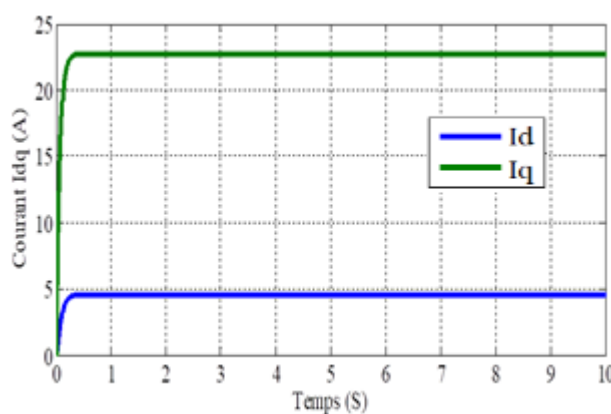


**b.**Tension  $V_{dq}$  prédictive control.

**Figure. III.10.** Tension  $V_{dq}$  dans deux cas de simulation.

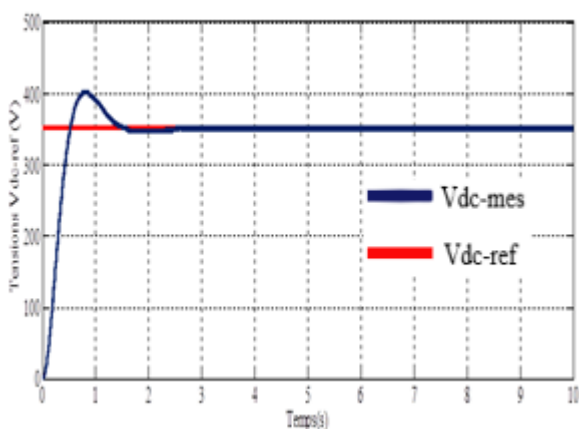


**a.**Courant  $I_{dq}$  redresseur à MLI.

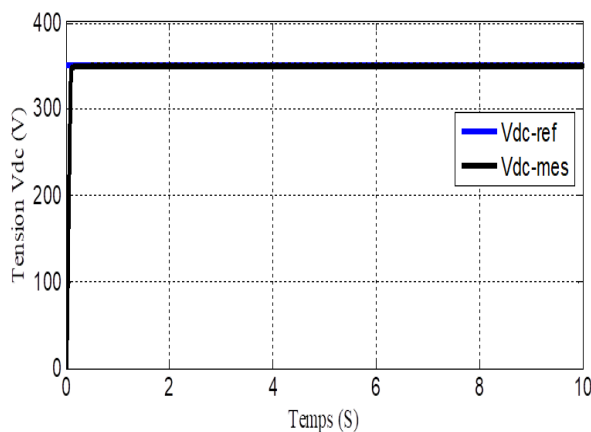


**b.**Courant  $I_{dq}$  prédictive control.

**Figure. III.11.** Courant  $I_{dq}$  dans deux cas de simulation.

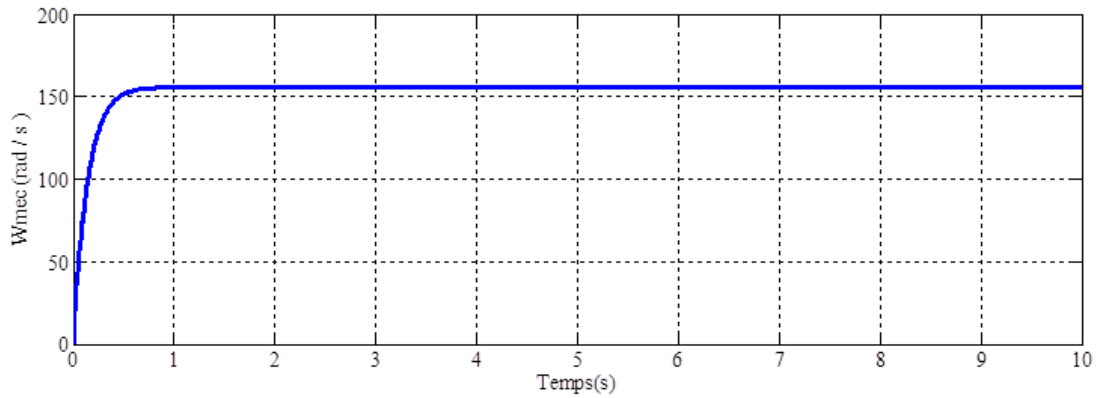


**a.**Tension  $V_{dc}$  redresseur à MLI.



**b.**Tension  $V_{dc}$  prédictive control.

**Figure. III.12.** Tension  $V_{dc}$  dans deux cas de simulation.



**Figure. III.13.** Vitesse mécanique.

### III.12. Conclusion

L'étude théorique de la commande prédictive (Model predictive control MPC) basée sur les états de commutation possibles peuvent être générées par un convertisseur statique (Redresseur) et son application au générateur synchrone à aimant permanent à partir de comparaison entre  $V_{dc-ref}$  et  $V_{dc-mes}$  et pour améliorer les performances dynamique à la GSAP présentées dans ce chapitre. En premier lieu, alimenté la GSAP par redresseur à MLI a été réalisée. Le deuxième lieu, la technique de commande prédictive à été réalisée dans le modèle de GSAP, après que, les résultats de simulation sous MATLAB/Simulink à été comparé.

# **Conclusion générale**

## *Conclusion générale*

**D**ans notre thèse on à été étudié une chaine de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimant permanent. Cette chaine est composée d'une turbine associée à une génératrice synchrone à aimant permanent, avec convertisseur statique à MLI du côté de la génératrice.

Dans le but d'améliorer les performances et la maitrise de l'exploitation de la génératrices synchrone à aiment permanent; le travail présenté dans cette thèse vise les objectifs suivants :

- Le premier porte présenté sur l'utilisation de la machine synchrone à aiment permanent pilotée par son convertisseur coté stator (CCS), la modélisation par le convertisseur à deux niveaux coté stator (CCS) à travers l'exploitation de l'énergie éolienne.
- Le second objectif concernait sur l'amélioration de la qualité de la tension fournie au redresseur par le GSAP, pour améliorer cette tension nous avons appliqué un technique de commande prédictive, afin d'optimiser la valeur de tension  $V_{dc}$  pour but de minimiser l'erreur entre la valeur de référence et la valeur mesurée. Les résultats de simulation et présenté de bonne amélioration au niveau des tensions.

Pour atteindre ces objectifs, dans le premier chapitre, on à présenté l'état de l'art sur les systèmes éoliens, modèle de la chaîne de conversion d'éolienne (turbine + générateur) en précisant leurs composantes, leur principe du fonctionnement et leurs avantages et inconvénients. Le choix de la génératrice et sa structure d'alimentation.

Dans la deuxième chapitre on à été consacré sur, la modélisation mathématique des différents éléments du système globale basée sur une générateur synchrone à aiment permanent GSAP à savoir la turbine, la GSAP et le convertisseur statique. On a présenté le profil du vent qui est la source principale de l'énergie, en suit on modélise la turbine qu'elle possède toujours un point de fonctionnement pour lequel, la turbine est connectée à la génératrice à travers un vitesse. Le schéma bloc sous l'environnement Matlab/Simulink pour visualiser son comportement.

Dans le troisième chapitre, à été appliquée la commande prédictive généralisée, qui est une combinaison entre la prédiction du comportement futur du procédé avec la commande

rétroaction, appliquée à la GSAP. Les résultats de simulation obtenus montrent que la prédictive control à la génératrice (GPC) est robuste aux variations paramétriques.

Face à ces observations et aux résultats obtenus, et pour donner un avis définitif sur ces techniques de réglage, des **perspectives** de recherche pouvant contribuer à mieux exploiter le système de conversion d'énergie éolienne :

- ✓ Il faudrait les résultats obtenus en simulation par des essais expérimentaux sur banc d'essais.
- ✓ Afin de développer et améliorer les performances dynamiques des systèmes d'entraînements et de commande on suggère d'étudier et d'utiliser la technique d'optimisation par des racines des arbres en anglais (RTO) afin d'optimiser la valeur de tension de redresseur à MLI.

# **Annexe**

## Annexe A

## A. Paramètres de la Génératrice

Tableau. A. Paramètres de la Génératrice

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique</i>
<i>La puissance nominal <math>P</math></i>	<i>1.5 KW</i>
<i>La tension nominal <math>V</math></i>	<i>220 V</i>
<i>La résistance de la phase statorique <math>R_s</math></i>	<i>0.6 <math>\Omega</math></i>
<i>Inductance directe <math>L_d</math></i>	<i>0.0014 H</i>
<i>L'inductance quadrature <math>L_q</math></i>	<i>0.0028 H</i>
<i>Moment d'inertie total de la machine <math>J</math></i>	<i>0.02Kg m<sup>2</sup></i>
<i>Coefficient de frottement visqueux <math>f</math></i>	<i>0.0014 N. m/rd/s</i>
<i>Le nombre de paires de pôles <math>P</math></i>	<i>4</i>
<i>La résistance de charge <math>R_{ch}</math></i>	<i>10 <math>\Omega</math></i>
<i>L'inductance de charge <math>L_{ch}</math></i>	<i>0.002 H</i>
<i>Flux d'excitation des aimants <math>\Psi_f</math></i>	<i>0.8 Wb</i>

## B. Paramètres de Turbine

Tableau. B. Paramètres de la turbine éolienne

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique</i>
<i>Gain du multiplicateur de vitesse <math>G</math></i>	<i>6</i>
<i>Rayon de la turbine <math>R</math></i>	<i>3</i>
<i>Masse volumique de l'air <math>\rho</math></i>	<i><math>\rho = 1.22(Kg/m^3)</math></i>
<i>Rayon de la turbine <math>R_t</math></i>	<i>3m</i>
<i>Inertie de l'arbre <math>J</math></i>	<i>0.21Kg. m<sup>3</sup></i>

## *C. Paramètres de redresseur*

**Tableau. C. Paramètres de redresseur**

<b>Nome et symbole des paramètres</b>	<b>Valeur</b>
<i>La résistance</i>	$R=6\Omega$
<i>La capacité</i>	$C=0.0033Var$
<i>l'inductance</i>	$L=0.0014 H$

**Références  
bibliographiques**

## *Références bibliographiques*

### **A**

- [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.
- [ADA 05] Adam MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » », thèse de doctorat, université de Toulouse, 2005.
- [ADD 13] M. Addour, « Etude et maximisation d'un système éolien », mémoire de master électrotechnique l'université de bejaya.2013.
- [AID 13] Aldwaihi. H.A, «commande non linéaire fondée sur la platitude d'un système de production éolien», thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, octobre 2013.
- [AIN 13] H.Aid, W.Aina. Synthèse De Lois de Commande Non-Linéaires Pour Un Entraînement Electrique A Vitesse Variable Basé Sur Un Moteur Synchrone A Aimants Permanents, Mémoire de Master, Université abou bekr belkaid, Tlemcen, 2013.
- [ALB 04] O. A.V. Albán, "Contribution à l'identification et à la commande des robots parallèles", thèse de doctorat, Université MONTPELLIER II, 2004.
- [ART 06] ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.

### **B**

- [BAR 08] Kamel Barra " Commande Prédictive Généralisée (GPC) des Associations Convertisseurs - Machines à Induction " Thèse de doctorat science en électrotechnique, université de Batna 2008.
- [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.
- [BEN 09] A.BENBRAHIM «Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents», mémoire de Magistère, Université de BATNA,2009.
- [BEN 16] W.Bensalah,N.Boutaleb" Etude de la commande des redresseurs MLI " mémoire de master, Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent,2016.
- [BEN 19] C.Bennour" Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation " Mémoire de magister, Université Mohamed Khider

- Biskra,2019.
- [BID11] M.D. Bidart. Commande Coopérative Des Systèmes Monoconvertisseurs Multimachines Synchrones, Thèse de Doctorat, L'Institut national polytechnique de Toulouse (INP Toulouse),2011.
- [BOU 09] A.BOULAHIA" Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique" Mémoire de magister, Université de Constantine,2009.
- [BOU 10] A. Bouafia, " Techniques de Commande Prédictive et Floue pour les Systèmes d'Electronique de Puissance : Application aux Redresseurs à MLI", thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif, Algérie, 2010.
- [BOU 16] T. BOUSMAHA , Z.TAHIR , « Etude et Simulation d'une ferme éolienne en vue d'une application hybride », MÉMOIRE MASTER Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 2016.

### C

- [CAM 03] E.F. Camacho, C.Bordons, "Model Predictive Control", Springer-Verlag London, 2eme edition, 2003.
- [CAB 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, soutenue le 18 décembre 2003.*
- [CLA 87] D.W. Clarke, C. Mohtadi et p.s, Tuffs, 1987; Generalized predictive control; part I and, Automatica; vol, 23, N2, pp-137-160.

### D

- [DAV 07] A. Davigny "Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie" *Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France,2007.*
- [DIO 18] F.DIONE , «étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne a base de machine synchrone a aimants permanents» Mémoire de master Université d'annaba,2018.
- [DJE 11] D.DJEMATI , « étude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne », mémoire de magistère en physique, université de BATNA, 2011.

### E

- [ELA 04] S. El Aimani "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension" *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, Université des Sciences et Technologies de Lille, 06/12/2004.*

### G

- [GHE 11] T. Ghennam, « 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 de Doctorat de Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011

## H

- [HAM 08] N. HAMDI « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Université Mentouri de Constantine. République Algérienne. Mémoire magister, 2008.
- [HAM 13] S.Mme HAMECHA, Ep. BOUREKACHE « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2013.
- [HAM 16] A. Hamou Salah, " Etude d'un redresseur en pont triphasé à MLI ", mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 2016.
- [HAR 03] HARITZA CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.

## 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 de Doctorat de l'Université de Abderrahmane MIRA – Béjaia, 2010.

## K

- [KAD 02] Enso Ikonen, Kaddour Najim, " Advanced Process Identification and Control", Marcel Dekker, New York. Bsel, 1ere edition, 2002.
- [KEN 12] Fairouz Kendouli "Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique" *Thèse de doctorat en Sciences en Electrotechnique de Université Mentouri de Constantine, 2012.*
- [KHA 06] F. Khatounian " Contribution a la Modélisation, L'Identification et à la Commande d'une Interface Haptique à un Degré de Liberté Entraînée par une Machine Synchrone à Aimants Permanents " Thèse de Doctorat, De L'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, 2006.
- [KOR 09] B. KORICH, " Commande D'un Convertisseur AC/DC Triphasé à quatre bras En Régime Déséquilibré ", Mémoire de magister, Ecole Militaire Polytechnique (EMP), Alger, 2009.

## L

- [LAC 07] G. LACOMBE " Définition et Réalisation d'une Nouvelle Génération de Logiciels pour la Conception des Moteurs Futurs " ; Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2007.
- [LAC 89] G. Lacroux., " Les aimants permanents ", Edition technique et documentation, 1989.
- [LAT 12] LATRECHE Mohammed Tahar " Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien ", Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.
- [LOP 06] M. LOPEZ, « contribution à l'optimisation d'un système de conversion

éolien pour une unité de production isolée », Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale STITS, 2006.

**M**

- [MAA 00] M. Maaziz, "Commande adaptative des systèmes non linéaires : Application à la commande d'une machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Paris ,2000.
- [MAH12] M.S.Mahgoun. Application De La Commande  $H_{\infty}$  Aux Systèmes Linéaires Perturbés, Mémoire de Magister, Université ferhat abbas-Setif (UFAS), 2012
- [MAL 00] Malhoud. Maaziz, "Commande prédictive de systèmes non linéaires application à la commande de machines asynchrones", Thèse de Doctorat université Paris Xi Orsay, 2000.
- [MAL 10] J.Mallet, « PID versus PFC », article, 2010.
- [MAY 08] MAYOUF.M«Contribution a la Modélisation de L'aerogenerateur synchrones à aimants permanents » Mémoire de magister Université de Biskra 2008.
- [MEG 09] I. Meghlaoui «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal» Mémoire de magister Université Badji Mokhtar –annaba,2009.
- [MER 07] Adel Merabet, "Commande Non Linéaire à Modèle Prédictif pour une Machine Synchrone", Québec, Mai 2007.
- [MER 19] T.MERZOUGUI ,k. ABDELKEBIR «Commande d'une génératrice synchrone à aimant permanant (GSAP) » Mémoire de master Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ,2019.
- [MEZ 09] Meziane salima " Commande adaptative et prédictive de la machine asynchrone " Thèse de doctorat science en électrotechnique, université de Mantouri Constantine 2009.
- [MIG 04] E. G. MIGLIORE, " Commande Prédictive à Base de Programmation Semi Définie", thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2004.

**N**

- [NAI 08] N.Nafir"Application de la Commande Prédictive Généralisée Cas- d'un Procédé de l'industrie Pétrochimique" Mémoire de magister, université de 20 aout 1955 Skikda,2008.
- [NIC 06] Nicolas Petit,Commande prédictive, Notes de cours, école centrale Paris, Année Scolaire 2005-2006.
- [NOU 04] S. NOUI , " Etude et Réalisation d'un Redresseur à MLI Commandé par

DSP. Application à l'alimentation d'un Onduleur Á Trois Niveaux ",  
Mémoire de magister , Ecole Militaire polytechnique (EMP), Alger,  
2004.

**O**

- [OUB10] M.Oubidar, S.Bendaoud. Machine Synchrone/Asynchrone, Projet de fin d'étude en ingénierie, Université du québec en Abitibi-Témiscamingue, 2010

**P**

- [PAT 96] Patrick Boucher, Didier Dumur, "la commande prédictive", collection méthodes et pratiques de l'ingénieur, école centrale de Lille, 1996.
- [POI 03] F. 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 de Doctorat Université de Nantes, 2003.

**R**

- [RED 09] R.REDJEM, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », mémoire de magistère en Electrotechnique, l'Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [REK 91] T. Rekioua " Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des MSAP " Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Lorraine 1991.
- [ROB 04] ROBYNS.B, BASTARD. P, « Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques », Revue 3EI, n°39, décembre 2004.

**S**

- [Sag 98] C. Saget "La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne" *REE, No. 7, pp. 42-48, Juillet 1998.*
- [SAT 06] SATHYAJITH. M, « Wind énergie : Fundamentals, ressource analysis and economics », Springer Science & Business Media, 2006

**T**

- [TEN 09] A. TENINGE, « participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire », thèse de doctorat de l'INPG, 04 décembre 2009.
- [TLE 00] A. Tlemçani., " La commande Adaptative par les Systemes Flous : application à la machine synchrone à aimants permanents " ,Thèse de magister, ENP, Alger (2000).