REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques

Commande d'une éolienne à base d'une génératrice synchrone à aiment permanent

---

Présenté par :

CHERMAT Amar

LAZAREF Abderrahmane

Proposé et Dirigé par :

Dr. MOUALDIA Abdelhafid

Promotion 2019/2020

Résumé

Résumé :

Dans ce travail nous avons étudie, la modélisation et la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents.Le plan de travail constitué de quatre parties organisées comme suit :dans la première partie nous avons étudie le système de conversion d'énergie éolienne (historique et l'état de l'art),dans la deuxième partie, on a présenté la modélisation de la turbine éolienne , dans la troisième partie, on a fait la modélisation de la GSAP, on termine ce travail par le dernier chapiter ou nous avons analysé et simulé la commande DPC de GSAP. Finalement une conclusion générale.

Mots clés : Système éolien, conversion d'énergie, Turbine, GSAP, DPC.

Abstract :

In this work we have studied, modeled and controlled a wind energy conversion system based on a synchronous machine with permanent magnets. The work plan consists of four parts organized as follows: in the first part we studied the wind energy conversion system (history and state of the art), in the second part, we presented the modeling of the wind turbine, in the third part, we did the modeling of the GSAP , we finish this work with the last chapter where we analyzed and simulated the DPC command of GSAP. Finally a general conclusion.

Keywords: Wind system, energy conversion, Turbine, GSAP, DPC.

ملخص :

في هذا العمل قمنا بدراسة ونمذجة التحكم في نظام تحويل طاقة الرياح على أساس آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم.
تتكون خطة العمل من أربعة أجزاء منظمة على النحو التالي: في الجزء الأول درسنا نظام تحويل طاقة الرياح (التاريخ والحالة الفنية) ، في الجزء الثاني ، قدمنا نمذجة توربينات الرياح ، في الجزء الثالث قمنا بنمذجة الالة المتزامنة ذات المغناطيس الدائم ، واخيرا حيث قمنا بتحليل ومحاكاة التحكم المباشر الطاقوي للالة وانهينا عملنا باستنتاج عام
.

الكلمات المفتاحية: نظام الرياح ، تحويل الطاقة ، التوربينات ، التحكم المباشر الطاقوي

Remerciements

Tout d'abord, Nous tient à remercier DIEU le Miséricordieux de nos avoir donné la possibilité de réaliser
Notre projet, d'arriver à notre souhaits et d'atteindre notre
Objectifs.
Nous aimerons dans ces quelques lignes remercier toutes les
Personnes qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué
Au bon déroulement de notre travail, tout au niveau Humain qu'au niveau scientifique.
Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadreur MONSIEUR, Dr MOUALDIA Abdelhafid, on a pu bénéficier à la
Fois de ses compétences scientifiques, et de sa grande Disponibilité, tant pour résoudre les difficultés rencontrées
Lors de notre réalisation, de répondre à nos questions. Nous
Ajoutons en particulière sa patience et ses encouragements,
Nous a permis de travailler dans bonnes conditions.
Nos remerciements s'adressent également à tous membres
De Jury, qui ont accepté de nous honorer de leur présence et
De juger notre travail Merci.
Et à toute personne ayant contribué de près ou de loin à Notre soutien moral

Dédicace

A mon très cher ***Père Aissa***
Que Dieu te protège et t'accorde santé et longue vie
Je t'aime tellement …
A ma très chère ***mère Fatima***
Que Dieu te protège et t'accorde santé et longue vie tu m'a toujours soutenue
A mes très chères sœur ***Fatima zohra*** *et* ***Asma*** *a mes frères et leurs familles je vous souhait tous lebonheur du monde*
A mon encadreur Monsieur moualdia pour son amabilité et sa disponibilité.
A la personne la plus chére a mon coeur
A mon binôme ***Chermat Amar*** *pour tous les souvenirs pendant les années d'études ensemble surtout les deux dernières années*

LAZAREF Abderrahmane

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :
- Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant ;
- A mes chères sœurs.
- A mes frères.
- A mon encadreur Monsieur moualdia pour son amabilité et sa disponibilité.
- A tous les enseignants qui m'ont aidé de prés ou de loin à obtenir mon master en électrotechnique.
- A tous mes amis.

CHERMAT AMAR

Liste des Abréviations

Liste des Abréviations	
CCM	Convertisseur Coté Machine.
VAWT	Les éoliennes à axe vertical (Vertical Axis Wind Turbines).
HAWT	Les éoliennes à axe horizontal (Horizontal Axis Wind Turbines).
MAS	Machine Asynchrone.
GSAP	Générateur Synchrone à Aimants Permanents.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
DPC	Commande Directe de Puissance (Direct Power Control).
Liste des Symboles	
Ω_s	La vitesse de synchronisme (rad/s).
Cem	Le couple électromagnétique (Nm).
ω	La pulsation du réseau (rad/s).
P	Nombre de paires de pôles.
ρ	La densité de l'air (Kg/m^3).
S	La surface circulaire balayée par la turbine (m^2), $S = \Pi . R^2$.
V	La vitesse du vent (m/s).
C_p	Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.
R	Rayon de la pale (m).
$\Omega_{méc}$	La vitesse mécanique (rad/s).
$\Omega_{turbine}$	Vitesse angulaire de la turbine (rad/s).
λ	Ratio de vitesse.
β	Angle d'orientation des pales (degré).
C_{aer}	Le couple aérodynamique (Nm).
$[P(\Theta)]$	La matrice de Park.
Θ	L'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé (rad).
P_{aer}	La puissance aérodynamique de la turbine (w).
$V_a, V_b, V_c,$	Tension de la génératrice (v).
I_a, I_b, I_c	Courant de la génératrice (A).
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$	Flux aux phases a, b et c (Web).
Rs	Résistance de chaque enroulement du stator (Ω).
φ_f	Flux des aimants permanents (Web).
V_d	Tension selon l'axe d (V).
V_q	Tension selon l'axe q (V).
I_d	Courant selon l'axe d (A).
I_q	Courant selon l'axe q (A).
$\varphi_d,$	Flux selon l'axe d (Web).
φ_q	Flux selon l'axe q (Web).
ω	Vitesse de rotation électrique (rad/s).

Liste des Abréviations

L_d	Inductance statorique selon l'axe d (H).
L_q	Inductance statorique selon l'axe q (H).
We	Energie emmagasinée dans le circuit magnétique (J).
θgeo	Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).
Cm	Le couple moteur appliqué sur la génératrice (Nm).
J	Moment d'inertie total de la machine ($Kg.m^2$).
f	Coefficient de frottement visqueux (Nm/rad.s).
Rch	Résistance de charge (Ω).
S	Opérateur dérive de Laplace.
I_{sd} , I_{sq}	Composant direct du stator dans le repère Park.
V_{an} , V_{bn} , V_{cn}	Les tensions à l'entrée du convertisseur (V).
I_α , I_β	Les composantes du vecteur courant de ligne dans le repère stationnaire (α, β).
V_α , V_β	Les composantes du vecteur courant de ligne dans le repère stationnaire (α, β).
C	Capacité côté continue (F).
R_{ch}	Résistance de la charge (Ω).
S_a , S_b , S_c,	Etats de commutation du redresseur.
V_{dc}	Tension redresse (V).
I_{dc}	Courant du bus continu (A).
P_{ref}	La puissance active de référence (w).
q_{ref}	La puissance réactive de référence (VAR).
$\hat{p}$	Puissance active instantanée (W).
$\hat{q}$	Puissance réactive instantanée (VAR).
Δ_p	Différences da la puissance active (w).
Δ_q	Différences da la puissance réactive (VAR).
H_P	Bande d'hystérésis pour la puissance active.
H_q	Bande d'hystérésis pour la puissance réactive.

La liste des figures

Chapitre I : Généralité sur l'énergie éolienne		6
Figure I.1	Carte du potentiel éolien en Algérie [Cou08]	7
Figure I.2	Exemples d'éoliennes à axe.	7
Figure 1.3	Principe de la traînée différentielle.	8
Figure I.4	Principe de l'incidence variable.	9
Figure I.5	Configurations à axe horizontal.	10
Figure I.6	Architecture d'une éolienne à axe horizontal	10
Figure I.7	Tube de courant à travers une éolienne	12
Figure I.8	Courbe caractéristique du coefficient de	14
Figure I.9	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	14
Figure I.10	Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.	15
Figure 1.11	Orientation de la nacelle en vue de la limitation de la puissance	16
Figure I.12	éolienne à vitesse fixe.	18
Figure I.13	Eoliennes fonctionnant à vitesse variable	19
Figure I.14	Optimisation de l'énergie extraite grâce à la variation de la vitesse de l'éolienne.	20
Chapitre II : Modélisation de la turbine		
Figure II.1	Variation de la vitesse du vent (m/s)	24
Figure II.2	Variation de la vitesse mécanique (rad/s)	24
Figure II.3	Coefficient de puissance $\mathbf{C_P}$	25
Figure II.4	Schéma bloc d'une turbine éolienne.	26
Figure II.5	Schéma bloc du modèle de la turbine.	27
Chapitre III : Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents		
Figure.III.1	Modèle de la machine synchrone à aimant permanent en abc.	30
Figure.III. 2	Modèle de la machine en biphasé.	31
Figure III. 3	Boucle de régulation du courant id	34
Figure III. 4	Boucle de régulation du courant iq	35
Figure. III.5	Générateur synchrone à aimants permanents à vide.	37
Figure. III.6	GSAP en charge (Rch=50Ω ; Lch=0.002H)	41
Chapitre IV : La commande direct de puissance		

La liste des figures

Figure. IV.1 Schéma du circuit de puissance.	43
Figure. IV.2 Représentation d'un convertisseur AC/DC triphasé.	45
Figure. IV.3 Schéma du bloc de la charge.	46
Figure. IV.4 Schéma fonctionnel du redresseur à MLI.	46
Figure. IV.5 Configuration générale de la commande DPC.	47
Figure. IV.6 Représentation vectorielle des vecteurs v_a, v_b, v_c et v'_a, v'_b, v'_c	48
Figure. IV.7 Caractéristique des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.	54
Figure. IV.8 Le plan vectoriel divisé en douze secteurs.	56
Figure.IV.9 Schéma bloc de la commande DPC.	57
Figure. IV.10.a Tensions statoriques Vabc	58
Figure. IV.10.b l'allure de tension Vdc et sa référence.	58
Fig. IV.10.c L'allure de puissance active estimée et sa référence.	59
Figure. IV.10.d L'allure de puissance réactive estimée et sa référence.	59
Fig. IV.9 : Performances du redresseur commandé par DPC (douze secteur) lors d'une variation de la tension de référence	59

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Généralité sur l'énergie éolienne	4
l.1.Introduction	4
I.2.contexte actuel	4
I.3.Différents types d'éoliennes et leurs utilisations	6
I.3.1.Eoliennes à axe vertical	6
I.3.1.1.Traînée différentielle	7
I.3.1.2.Variation cyclique d'incidence	8
I.3.2.Eoliennes à axe horizontal	9
Les pales	10
Le Rotor	10
La Nacelle	11
I.4.Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique	12
I.4.1.Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :	12
I.4.1.1.Loi de Betz	12
I.4.1.2.Production d'énergie mécanique :	15
I.4.2.Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne	17
Les contraintes liées à l'effet temporel	17
Les contraintes liées au caractère dynamique de la conversion	17
I.5.Modes d'exploitation de l'énergie éolienne	18
I.5.1.Les systèmes à vitesse fixe	18
I.5.2.Les systèmes à vitesse variable	18
I.6.Optimisation de l'énergie extraite	19
I.6.Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne	21
I.6.1.Systèmes utilisant la machine asynchrone	21
I.6.2.Systèmes utilisant la machine synchrone	21
Conclusion	22
Chapitre II : Modélisation de la turbine	
II.1.Introduction	23
II.2.Modélisation du vent	23
II.3.Conversions de l'énergie éolienne	25
II.4.Equation dynamique de l'arbre	26
II.5.Conclusion	27
Chapitre III: Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	
III.1.Introduction	28
III.2.Description	28
III.3.Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone	29
III.4.Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :[Ham13]	29
III.4.1.Les hypothèses simplificatrices	29
III.4.2.Modèle en ABC :	30
III.4.2.1.Les équations électriques	30
MODELE BIPHASETransformation de PARK	30

III.4.2.2 Equations électriques	31
III.4.2.3 EXPRESSION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE :	32
III.4.2.4 L'EQUATION MECANIQUE	33
III.4 Commande vectorielle de la MSAP :	33
III.4.1 Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation	33
III.4.2 Calcul du régulateur PI	34
III.5 Simulation de la Génératrice Synchrone à Aimants Permanents	36
III.5.1 Fonctionnement a vide	36
Résultats de simulation	36
III.5.1.1 Interprétation des résultats	37
III.5.2.Fonctionnement en charge	37
Equations d'état	38
Résultats de simulation	39
III.5.2.1.Interprétation des résultats	41
III.6 Conclusion	42
Chapitre IV : La commande direct de puissance	
IV.1 Introduction	43
IV.2 Modélisation de la parte puissance	43
IV.2.1 Source d'alimentation	44
IV.2.2 Le redressement à MLI	44
IV.2.3 La charge	45
IV.3 Commande direct de puissance (DPC)	47
IV.3.1 Calcul des puissances instantanées	48
IV.3.2 Estimation de la tension	53
IV.3.3 Régulateurs à hystérésis	54
IV.3.4 Table de commutation	54
IV.3.5 Détermination du secteur	56
IV.4 Résultats de simulation DPC douze secteurs :	58
IV.4.1 Interprétations des résultats	60
IV.5 Conclusions	60
CONCLUSION GENERALE	61
BIBLIOGRAPHIER	62
ANNEXE	66

Introduction générale

Introduction Générale :

La consommation énergétique mondiale ne cesse d'augmenter, la grande partie de cette énergie consommable provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon,…..etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre. En effet, la grande préoccupation du monde actuel est de faire atténuer cette pollution en essayant d'adapter les sources d'énergie classiques à des critères très sévère.

La pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respecte de l'environnement, dans le quel nous vivons, est nécessaire. Les centrales nucléaires procurent l'avantage de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques (à vapeur ou à gaz), mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets ont rendu cette énergie peu attractive pour les générations futures. **[KHA-15]**

L'homme a très vite compris la manière de capter cette énergie et comment l'exploiter dans des systèmes simples pour moudre les grains où pomper l'eau. On trouve d'ailleurs des ancêtres d'éoliennes jusque dans la perce ancienne **.[BOU-07]**

Si l'on admet qu'il n'existe aucune chance de survie sans énergie, la sagesse commande de rechercher et de développer d'autres sources et notamment les énergies renouvelables. Bien que, le développement et l'exploitation de nouvelles énergies ne se posent pas en termes de concurrence, mais bien de complémentarité avec les énergies usuelles. On peut considérer que le développement de ces énergies renouvelables est par conséquent, une composante fondamentale de l'aménagement du territoire.

Les énergies renouvelables ont l'avantage d'être présentes et propres, contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'éloignement du réseau électrique et les contraintes du transport de combustible, ainsi que les entretiens périodiques des installations.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies renouvelables, notamment pour les applications solaires et éoliennes. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu au sol, ainsi que la durée d'insolation qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, ainsi qu'un gisement éolien considérable.

Notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergies renouvelables, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées dans plusieurs applications, notamment pour l'électrification et le pompage.

Introduction générale

L'éolien et le solaire sont des énergies intermittentes et relativement aléatoires, peuvent avoir une valeur en termes de puissance électrique conventionnelle, évitée pour les réseaux si les pointes de consommation sont simultanées à l'occurrence de ces énergies et que le foisonnement des sources dispersées est suffisant. Ce qui peut être le cas du solaire et de la consommation engendrée par la climatisation ou de l'éolien et de la pointe de consommation en hiver

L'énergie éolienne est la filière qui se développe la plus rapidement aujourd'hui dans le monde pour la production d'électricité en utilisant des fermes d'éoliennes implantées sur des surfaces considérables.

Les systèmes éoliens modernes ont diverses topologies commerciales disponibles dans le marché utilisant des génératrices asynchrones (à vitesse fixe) et des Génératrices Asynchrones à Double Alimentation (GADA) ou encore des Génératrices Synchrones à Aiment Permanent (GSAP) (à vitesse variable). **[ABD-15]**

La conversion éolienne passe par l'utilisation d'une machine éolienne transformant l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'éolienne), l'énergie disponible subit une suite de pertes en cascades jusqu'à la sortie de la machine. Cette dernière sera couplée à une génératrice de courant électrique. L'implantation d'un système énergétique solaire ou éolien pour satisfaire un besoin précis en un lieu donné ne doit se faire qu'après avoir estimé la productivité du système en fonction du gisement local, c'est-à-dire de l'énergie réellement disponible en considérant les différents types de temps durant la journée, le mois, la saison, et l'année.

Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type synchrone a aimant permanent dans un système éolien raccordé avec une charge par l'intermédiaire d'un redresseur. Le premier chapitre nous allons étudier les systèmes éoliens à travers les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par une définition de l'énergie éolienne de manière générale et les défirent types d'aérogénérateurs et la comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et variable.

Dans le deuxième chapitre, nous La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales.

Le troisième chapitre consiste à la modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent, et on terminera cette partie par une simulation (GSAP et turbine).

Dans le dernier chapitre, nous analyserons à la technique d**e** contrôle DPC (Direct Power Control).

Elle est basée sur le concept du contrôle direct du couple DTC. Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive de la GSAP à travers le convertisseur CCM. Les états de commutation de ce convertisseur sont sélectionnés à partir d'une table de commutation. Cette dernière est alimentée par deux comparateurs à hystérésis dont les entrées sont les erreurs instantanées obtenues de la différence entre la valeur de référence et estimée de la puissance active et réactive ce qui représente la DPC classique (DPC-C).

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus

Chapitre I

Généralité sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. On peut ainsi trouver la trace d'ancêtres des éoliennes modernes jusque dans la Perse ancienne. Plus près de nous, certains pays ont, depuis le Moyen Âge, largement fait usage de ce type d'énergie par le biais des moulins à vent (moulins hollandais) ou des éoliennes dites américaines. Au cours des siècles, la technologie des moulins a évolué grâce à l'apparition de toits orientables permettant une utilisation plus intensive, puis de moulins complets montés sur pivot. Enfin, la dernière évolution marquante a été l'adoption de profils semblables à des ailes d'avion, en lieu et place de la toile tendue sur une structure en bois, du fait de la compréhension des phénomènes aérodynamiques, acoustiques et aéroélastiques impliqués. Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement **[ERN-85]**.

Mais la motivation principale derrière l'intérêt croissant envers cette source d'énergie renouvelable est son caractère écologique, surtout dans le contexte actuel où la terre entière su- bit les conséquences du réchauffement climatique qui épuise les réserves mondiales en eau, principale source de l'énergie électrique. S'ajoute à cela l'impacte de la crise économique mondiale actuelle sur la capacité des pays industrialisés à faire face à la demande croissante en énergie électrique, vu le coût de sa production pour les pays producteurs, et le prix de l'importation pour les pays non producteurs **[SNJ-08]**.

I.2. Contexte actuel

Bien que ne pouvant envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'éolien peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Son développement s'est fortement accéléré depuis 1995 avec une progression moyenne de 20 % par an dans le monde. Cette progression s'accompagne par une évolution de la fiabi- lité, de la taille des éoliennes et de leur rendement. Le coût de production du kilowattheure a progressivement baissé pour atteindre un niveau compétitif par rapport aux autres sources d'énergie **[LEC]**.

Au début de l'année 2009, on estimait à près de 121 GW la puissance totale installée de l'ensemble des éoliennes à travers le monde. Le pays possédant la plus grande puissanc

éolienne installée était les États-Unis (25 388 MW) suivi de l'Allemagne (23 903 MW) et de l'Espagne (16 740 MW).

En puissance éolienne installée par habitant, le Danemark arrive en tête (600 W par habitant). Les États-Unis arrivaient en 12^{e} position (89 W/hab) malgré leur classement en première position pour la production totale.

A la fin de l'année 2010, 193 GW d'éolien sont installés dans le monde. La Chine y a investi 63 milliards de dollars et les USA 18 milliards de dollars. La croissance des investissements dans l'éolien a été de 34%. Quand à la puissance, elle a augmenté de 22% (soit 35,8 GW) **[MIR-05]**.

L'Algérie à l'instar des autres pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier, et ce en donnant beaucoup d'importance aux études réalisées dans ce domaine notamment celles qui sont dédiées au cas Algérien malgré la prédominance de l'énergie solaire. Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays **[COU-08]**.

La carte représentée en figure I.1 montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de micro-climats sur les sites côtiers d'Oran, Béjaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventées que le reste des saisons et que le printemps en est la plus ventée. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté, des régions telles que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année **[COU-08]**.

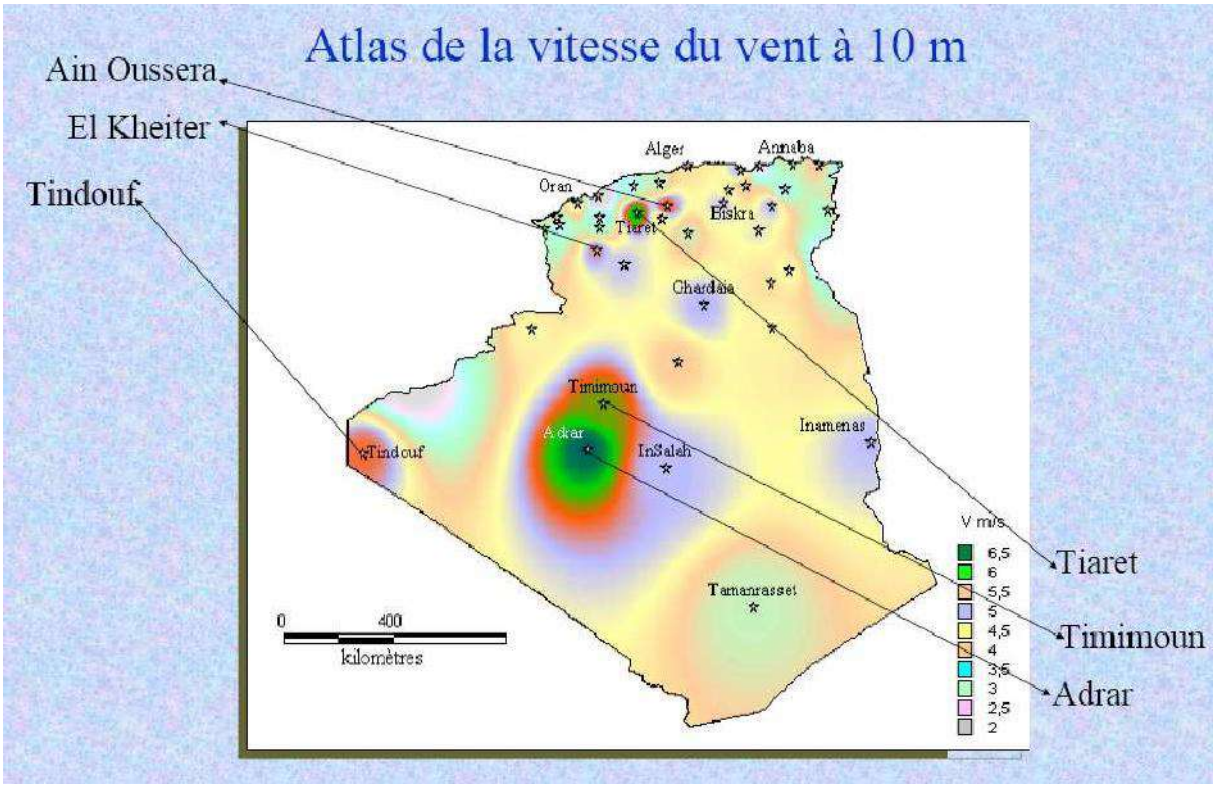


Figure I.1 : Carte du potentiel éolien en Algérie [COU-08]

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées ou de permettre aux régions qui baignent dans le vent d'avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé. Des projets de ce genre sont en phase de l'étude et d'autres commencent à voire le jour tel que la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10MW par le groupe Français Vergnet.

I.3. Différents types d'éoliennes et leurs utilisations

On classe les éoliennes en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal **[YIM-07]**.

I.3.1. Eoliennes à axe vertical

Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines (Figure I.2), à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.



Eolienne de Savonius | Eolienne de Darrieus | Eolienne de Musarov

Figure I.2: Exemples d'éoliennes à axe vertical [YIM-07]

I.3.1.1 Traînée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machines tel qu'il est schématisé dans la figure I.3 est identique à celui d'un anémomètre : l'éolienne est munie de deux pâles de forme creuse, sur lesquelles des efforts d'intensités différentes et de sens opposés sont exercés par le vent. Il en résulte donc un couple moteur qui fait tourner le rotor de l'éolienne. **[Sab06]**

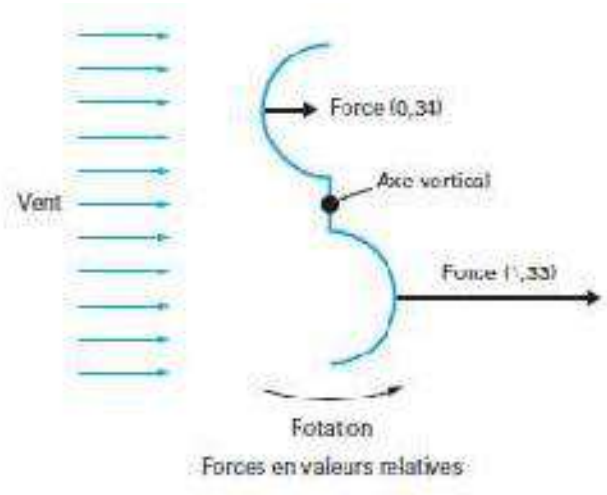


Figure 1.3 : Principe de la traînée différentielle [Sab06]

I.3.1.2 Variation cyclique d'incidence

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables (Figure 1.4).

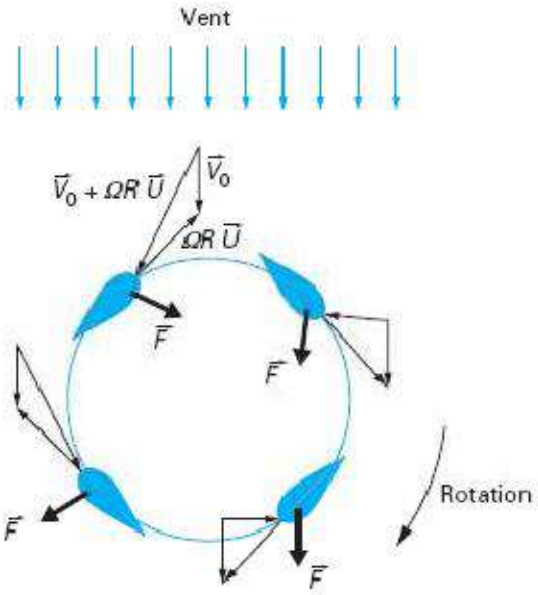


Figure I.4 : Principe de l'incidence variable [SAB-06]

Avec $\overline{V}_O$: Vitesse axial du vent en amont de l'eolienne, G : Vitesse angulaire de rotation des pales , R : rayon de la pale , $\overline{U}$: Vecteur unitaire tangent de la pale

La combinaison de ces forces génère un couple moteur. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. Cependant, le fonctionnement Intrinsèque faisant appel à la rotation des pales, implique que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement s'avère donc nécessaire **[SAB-06]**.

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, elle fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine), ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine.

I.3.2 Eoliennes à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent. Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes « **amont** », sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent, et inversement, les éoliennes « **aval** ».

Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients : la formule « amont » requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration « aval» autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une ma- chine « amont», l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine « aval ». Enfin, une machine

« Aval » est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont » **[Sab06]**.

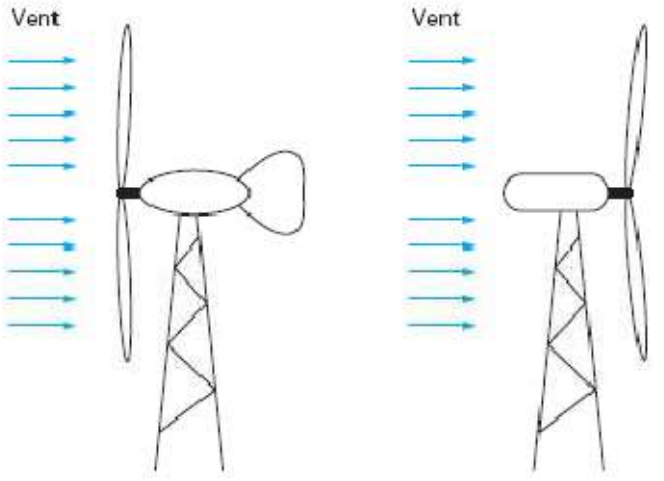


Figure I.5 : Configurations à axe horizontal.

On peut considérer trois composantes essentielles dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour.

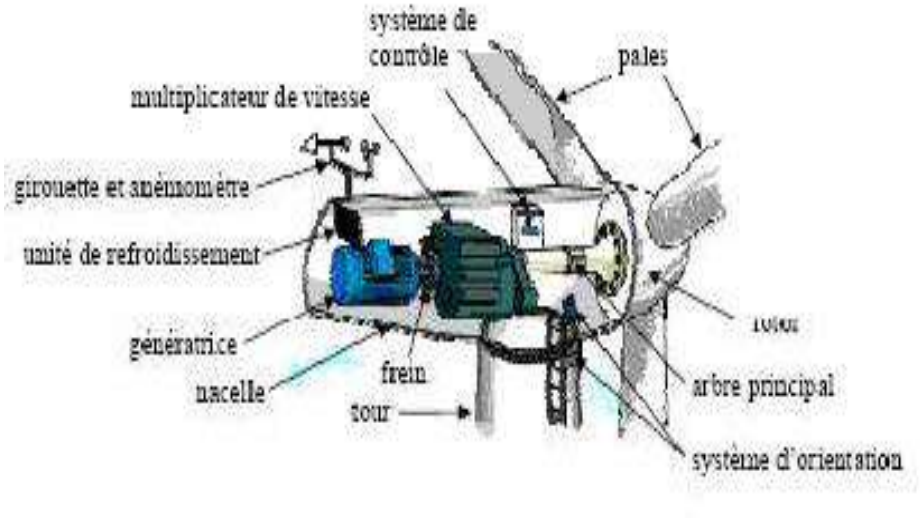


Figure I.6 : Architecture d'une éolienne à axe horizontal [CRA-03]

Les pales

Elles sont directement exposées aux variations du vent ce qui provoque leur rotation.

Le contrôle de la puissance éolienne captée se fait de deux façons **[ABD-07]** :

- ✓ Le contrôle de la surface exposée au vent par la méthode du PITCH, qui consiste en le réglage de l'angle d'exposition des pales à l'onde incidente du vent.
- ✓ Le contrôle de cette surface par la méthode du STALL, qui consiste en la variation de l'angle de calage de la pale ce qui mène à un décrochage aérodynamique et un freinage des pales.

Le Rotor

C'est la partie tournante dans une éolienne. Il capte et transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Il est constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle et le moyeu. Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor)

La Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. Elle est constituée des composantes suivantes:

- **Le multiplicateur de vitesse :** Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire mu par le vent, et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques ;
- **L'arbre secondaire :** Comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine ;
- **La génératrice** : C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Un contrôleur électronique :** Chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble (rotor + nacelle) face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir ;

-Divers dispositifs de refroidissement : Le refroidissement des composantes situées à l'intérieur de la nacelle est assurée par des ventilateurs ou bien par des radiateurs d'eau ou d'huile ;

-Le dispositif d'orientation de la nacelle: Il permet la rotation de la nacelle autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée. Cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours de la nacelle, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour.

I.4. Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

La nacelle telle qu'elle est présentée dans la figure I.6 a pour rôle de capter l'énergie ciné- tique du vent et la transformer en énergie électrique. Cette opération est basée sur un certain nombre de lois physiques qui sont présentées dans ce qui suit.

I.4.1. Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

I.4.1.1. Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure I.7, sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En sup- posant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2, soit V_{12} **[ERN-85,ABD-07]**.

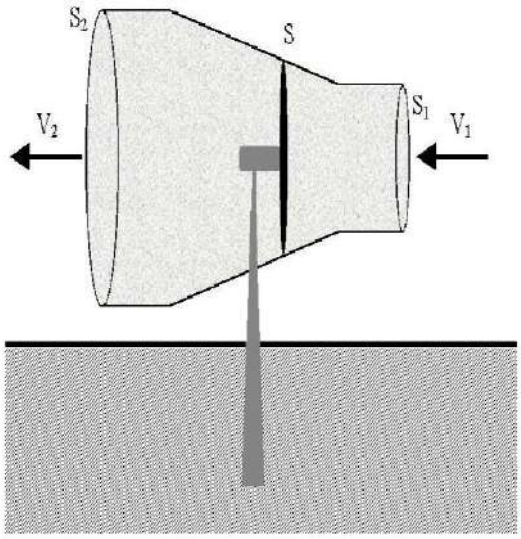


Figure I.7 : Tube de courant à travers une éolienne .

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m=\frac{\rho.S.(V_1+V_2)}{2} \quad (I.1)$$

La puissance P_M alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$p_m=\frac{m.(V_1{}^2+V_2{}^2)}{2} \quad (I.2)$$

Soit en remplaçant *m* par son expression (équation I.1):

$$p_m = \frac{\rho.S.(V_1+V_2)(V_1^2-V_2^2)}{4} \quad (I.3)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1, la puissance théorique P_{Nt} correspondante serait alors :

$$p_{mt} = \frac{\rho.S.V_1^3}{2} \quad (I.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors donné par :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(\left(1+\frac{V_1}{V_2}\right).\left(1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)\right)}{2} = C_p \quad (I.5)$$

La figure I.8 représente l'évolution du rativm/vmt en fonction de On s'aperçoit que ce ratio appelé aussi coefficient de puissance Cp présente un maxima de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [ABD-07].

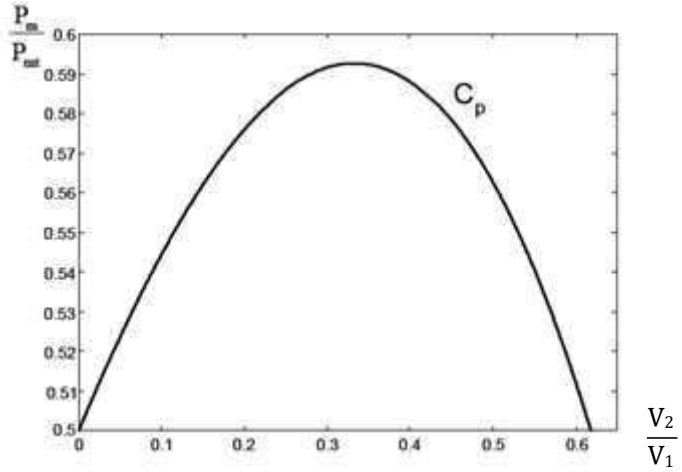


Figure I.8 : Courbe caractéristique du coefficient de puissance [ERN-85]

La courbe de la figure I.8 représente la forme la plus répondue du coefficient de puissance et qui caractérise une éolienne tripale à axe horizontal. Cette forme peut, par contre changer selon le type de l'éolienne (à axe horizontal ou vertical), ou bien selon le nombre de pales comme le montre la figure I.9. Cette figure montre que pour des éoliennes dont la vitesse relative est comprise entre 0 et 10 appelées aussi éoliennes lentes, la courbe $C_p = f(h)$ a une forme en cloche plutôt étroite et pointue. Alors que pour des éoliennes rapides et dont la vitesse relative est comprise entre 10 et 20, la forme de cette courbe est plutôt large et aplatie au sommet **[ABD-07]**.

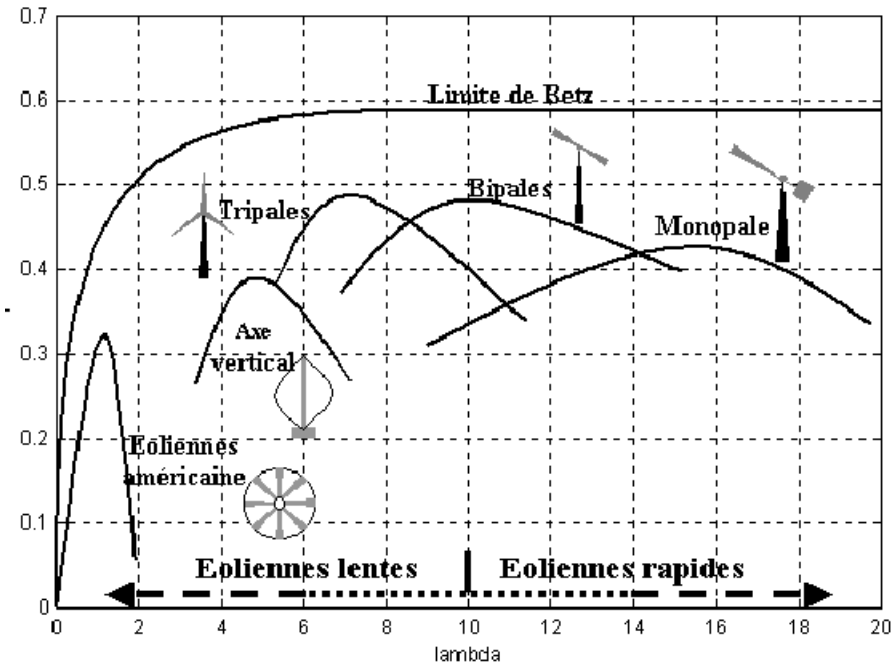


Figure I.9 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

I.4.1.2. Production d'énergie mécanique :

En combinant les équations I.1, I.4 et I.5, la puissance mécanique Pm disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime par :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_P(\lambda) \pi \rho R^2 V_1^3$$

$$\lambda = \frac{R\Omega_1}{V_1} \qquad \text{(I.6)}$$

G_1 est la vitesse de rotation avant multiplicateur et R le rayon de l'aérogénérateur.

La relation I.7 permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent. La figure I.10 représente la caractéristique obtenue pour une valeur donnée de la vitesse de rotation.

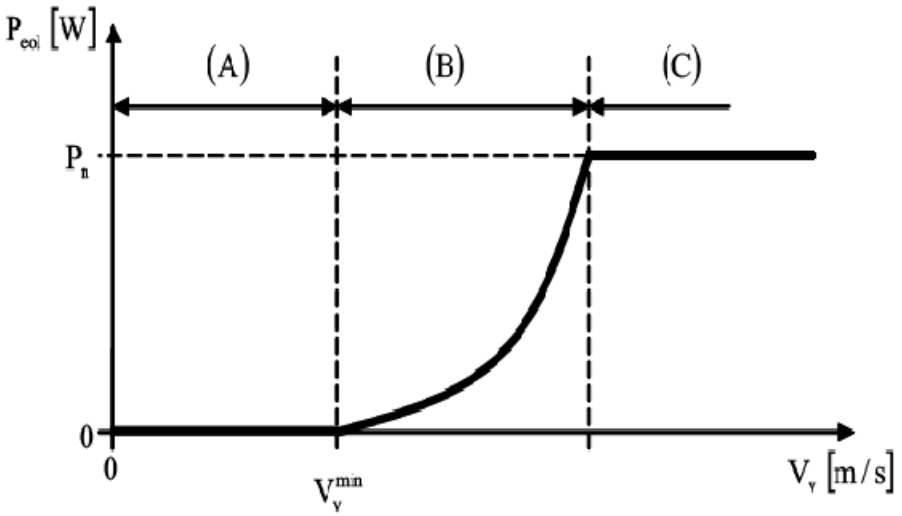


Figure I.10 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

A

Après une partie (A) où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse du démarrage V^{Nin} , une section de fonctionnement normal existe. Si on extrait alors la puissance maximale de la turbine (MPPT) celle ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent (B). Quand la puissance nominale P_n est atteinte, elle doit être limitée (C).

Au-delà d'une certaine limite de vitesse du vent, la turbine doit être arrêtée **[ABD-07]**.

Il existe quatre méthodes principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent **[ROB-06]**.

La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure.

La seconde technique est passive « stall ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons de ces deux technologies.

La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (une rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.

La dernière méthode qui permet la régulation de la puissance éolienne consiste à faire

varier la vitesse de rotation GNec par une action électrique. Par le biais de la génératrice accouplée à une chaîne de conversion statique pilotée pour gérer le transfert d'énergie, la vitesse de rotation peut être pilotée selon le point de fonctionnement souhaité. Le plus souvent, dans les turbines classiques à axe horizontal, le dispositif de réglage à fréquence variable est associé à un réglage mécanique (pitch ou stall).

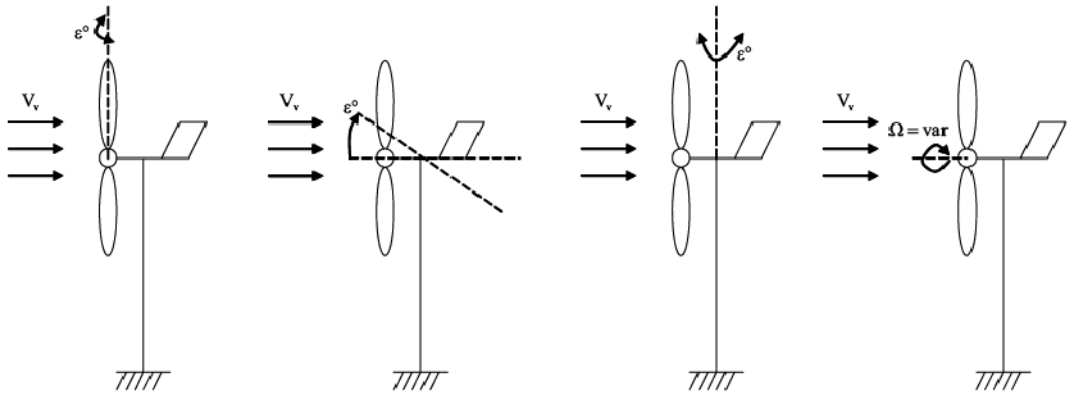


Figure 1.11 : Orientation de la nacelle en vue de la limitation de la puissance .

Ces différentes méthodes de limitation de la puissance éolienne laissent croire que

la conversion de l'énergie éolienne telle que décrite par les équations précédentes est simplifiée du moment qu'on ne prend pas en considération un certain nombre de contraintes physiques liées aux turbulences du vent, les matériaux dont l'aérogénérateur est construit et les obstacles pouvant perturber l'écoulement du vent…etc.

I.4.2. Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne

L'expression du couple éolien donne le couple moyen présent sur l'arbre de la turbine correspondant au vent équivalent moyen. Il faut, pour mieux décrire le comportement, prendre en compte l'existence des couples pulsatoires, qui entraineront des fluctuations de puissance, et qui sont générés par les irrégularités déterministes du champ de vitesses **[ROB-07]**.

Ces phénomènes sont dus en particulier à l'effet de cisaillement, l'effet du passage d'une pale devant la tour (effet d'ombre), sans oublier d'ajouter également les effets des imperfections de construction (asymétrie).

Ces différentes contraintes peuvent être classées selon leur effet temporel sur le rotor et selon le caractère dynamique de la conversion.

- ✓ **Les contraintes liées à l'effet temporel :**

a) Les charges stationnaires, indépendantes du temps, lorsque le rotor tourne à une vitesse fixe : vitesse du vent constante, forces centrifuges.

b) Les charges stationnaires dans le temps, mais pas dans l'espace, qui provoquent des contraintes cycliques sur le rotor telles que l'augmentation du vent avec la hauteur et l'interférence entre la tour et l'écoulement du vent.

c) Les forces de gravité dues au poids des pales qui entrainent aussi des fluctuations périodiques.

d) Les contraintes non périodiques et stochastiques dues aux turbulences du vent.

- ✓ **Les contraintes liées au caractère dynamique de la conversion :**

a) Effet d'ombre ou effet de tour : L'effet de tour est produit du fait de la résistance de la turbine à l'écoulement du vent, perturbe en amont et en aval. Loin de l'influence de la tour, la vitesse de vent est supposée constante alors qu'elle augmente à l'approche de la tour et diminue ensuite.

b) Phénomène de cisaillement : Le phénomène de cisaillement du vent produit également des oscillations de couple provoquées par le gradient de vitesse du vent le long du secteur balayé par les pales **[Aim05]**.

I.5. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne

En vue de l'exploitation de l'énergie fournie par le vent, plusieurs systèmes peuvent être utilisés. Nous pouvons les classer en deux catégories :

a) les systèmes à vitesse fixe

b) les systèmes à vitesse variable

I.5.1. Les systèmes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de centaines de kW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir pour cette

gamme de puissance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la figure I.12. La chaine de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, le multiplicateur de vitesse et de la génératrice **[MEL-09]**.

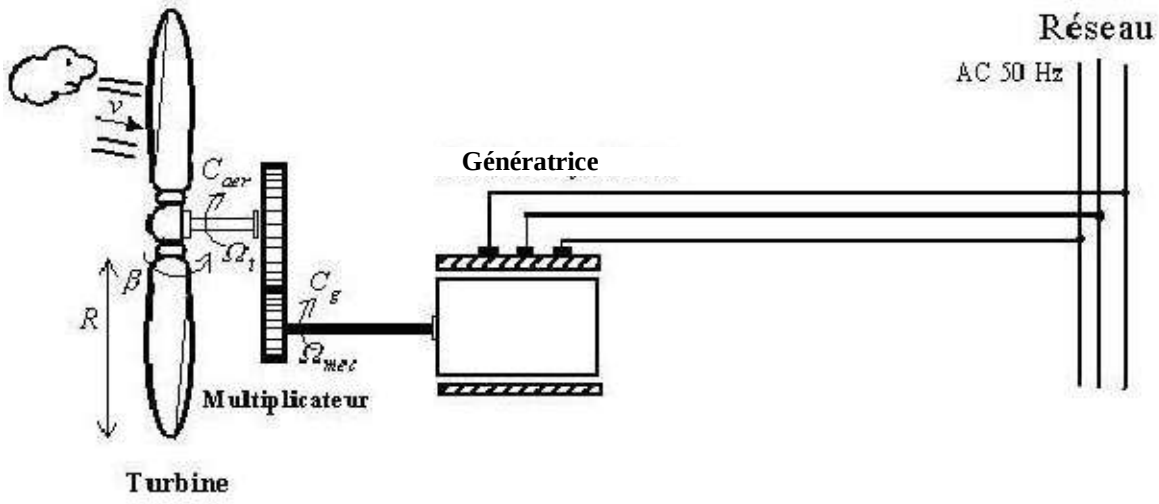


Figure I.12 : éolienne à vitesse fixe.

I.5.2. Les systèmes à vitesse variable

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure

I.13. La configuration de la figure I.13.a est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure I.13.b, est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique **[Mel06]**.

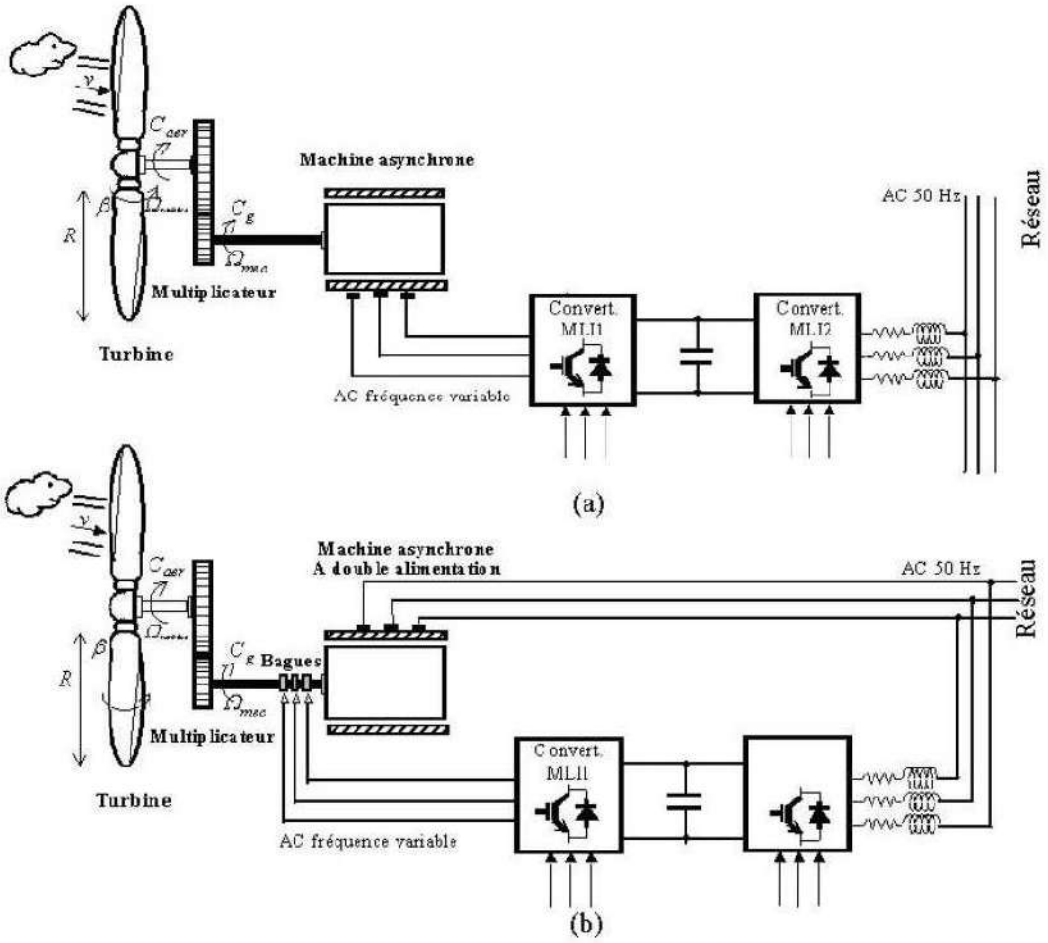


Figure I.13 : Eoliennes fonctionnant à vitesse variable [MEL-06]

I.6. Optimisation de l'énergie extraite

Nous avons vu qu'il est indispensable de réguler la puissance éolienne et que les courbes caractéristiques des voilures éoliennes ne sont pas linéaires, surtout dans le cas des voilures de type Savonius dont la forme de cloche est très « pointue ». En ce qui concerne la puissance éolienne, elle résulte de la vitesse de rotation de l'arbre mécanique de l'éolienne et de la vitesse du vent (donc de la vitesse réduite) et de la caractéristique $C_p(h)$. Elle peut être optimisée dans le but de maximiser l'énergie captée par l'éolien

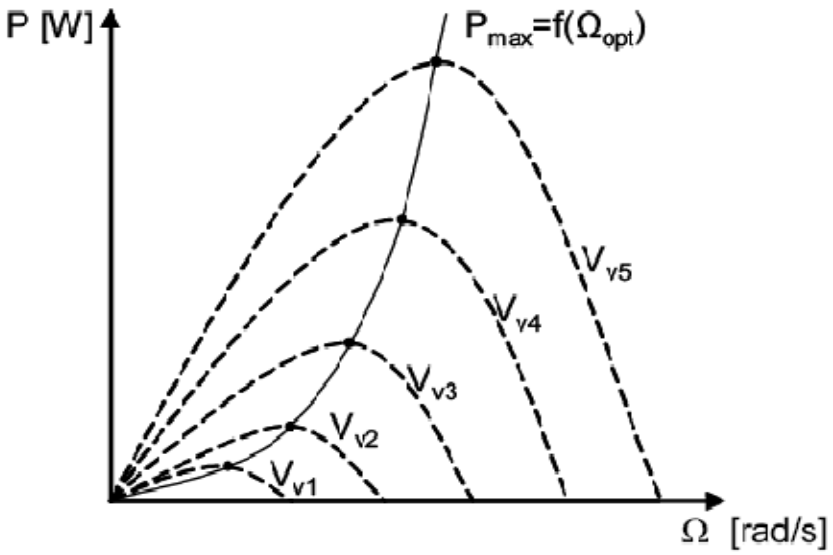


Figure I.14 : Optimisation de l'énergie extraite grâce à la variation de la vitesse de l'éolienne [BOY-06]

La Figure I.14 donne l'image de la famille des courbes de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent (pour une turbine Savonius) ainsi que la courbe optimale qui relie leurs sommets selon une fonction cubique de la vitesse de rotation. En suivant cette courbe continuellement, la puissance éolienne recueillie sera toujours maximale.

De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable en éolien sur le plan énergétique, y compris dans le petit éolien où le surcoût entraîné par la vitesse variable (du fait de l'électronique de puissance et de réglage supplémentaire) est compensé par le surplus de production.

Mais c'est aussi et surtout sur le plan de la durée de vie des systèmes que se situe l'avantage de la vitesse variable. En effet, les chaînes à vitesse variable sont moins « raides » que les chaînes à vitesse fixe ou presque fixe rigidement couplées au réseau : cette liaison rigide se solde par de fortes oscillations de puissance engendrées par les turbulences. Ces variations sont à la longue nuisibles pour les éléments mécaniques : la vitesse variable, elle, permet de mieux lisser la production à travers l'énorme moment d'inertie que constitue la voilur

I.6.Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne

I.6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

La robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Il existe plusieurs types de configurations utilisant la machine asynchrone dans toutes ses formes (Machine asynchrone à rotor bobiné, Machine asynchrone à cage, Machine asynchrone à double stator, MADA…etc) **[BOY-06].**

I.6.2. Systèmes utilisant la machine synchrone

Malgré toutes les caractéristiques et avantages des machines asynchrones, ces dernières présentent le défaut d'imposer la présence du multiplicateur de vitesse car elles possèdent un couple mécanique insuffisant pour un couplage mécanique directe aux pales. Par contre les machines synchrones sont connues pour fournir un couple important, à dimensions géométriques convenables. C'est pourquoi elles offrent l'avantage de se passer du multiplicateur de vitesse, notamment si le nombre de pôles est important **[BOY-06]**.

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champs statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques.

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion.

Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I.16) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct (direct-drive) qui ne nécessitent pas de boite de vitesses (gearless). Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (MSAP) est plus simple est moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille

équivalente.

Ces avantages sont la motivation principale du choix sur le quel se base ce travail, à savoir l'étude d'un système de génération d'énergie éolienne utilisant une MSAP, d'une puissance de 600Watts.

Après la modélisation du système de production, l'étude portera sur l'optimisation de la puissance que peut fournir la turbine éolienne via une commande du coefficient de puissance qui caractérise cette dernière. Puis nous allons contrôler la puissance électrique produite de sorte à ce qu'elle soit optimale et constante d'une part puis variable tout en essayant de maintenir la puissance réactive égale à zéro mais capable de prendre une autre valeur en cas de besoin. Ces opérations de contrôle se feront grâce à des régulateurs de type PI puis IP afin de comparer les résultats obtenus. L'alimentation de la charge se fera via un onduleur à six bras commandables alimentés par la génératrice à travers un redresseur à MLI.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'exploitation de l'énergie éolienne et son importance en tant qu'énergie verte. Nous avons également présenté une évaluation du potentiel éolien Algérien afin d'avoir une idée sur l'importance de l'investissement dans ce créneau. Nous avons également consacré ce chapitre à la description d'une éolienne, le calcul de la puissance extraite de la rotation de celle-ci, et les objectifs derrière le contrôle de son fonctionnement. Enfin, Nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique et les différents types de machines utilisées. La comparaison entre ces machines a dégagé l'idée de consacrer notre étude à un système utilisant

une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Chapitre II
Modélisation de la turbine

II.1 Introduction :

Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé le concept de chaîne éolienne complète. Dans ce chapitre. Nous établissons un modèle de simulation de l'ensemble de la chaîne éolienne en insistant notamment sur le caractère multi physique (prise en compte des phénomènes mécaniques, magnétiques, électriques) [LAV-05].

l'avantage le plus important de ces machines dans le domaine éolien est l'absence de multiplicateur de vitesse pour des machines de grand nombre de paires de pôles, réduisant ainsi le volume de l'éolienne et la maintenance du système [BD-07].

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique ,du convertisseur de puissance lie du système de commande [MUL]. Ce chapitre est composé de trois parties :

Une première 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, [WIL-05] [CAM-03].

La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent, et on terminera cette partie par une simulation de ces configurations (MSAP et turbine) en fonctionnement générateur [12] [21][27] [28].

Dans la troisième et dernière partie nous présenterons la modélisation du convertisseur associé, [ANN-10] [YIN-07].

II.2. Modélisation du vent :

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente **[COU-08].**

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

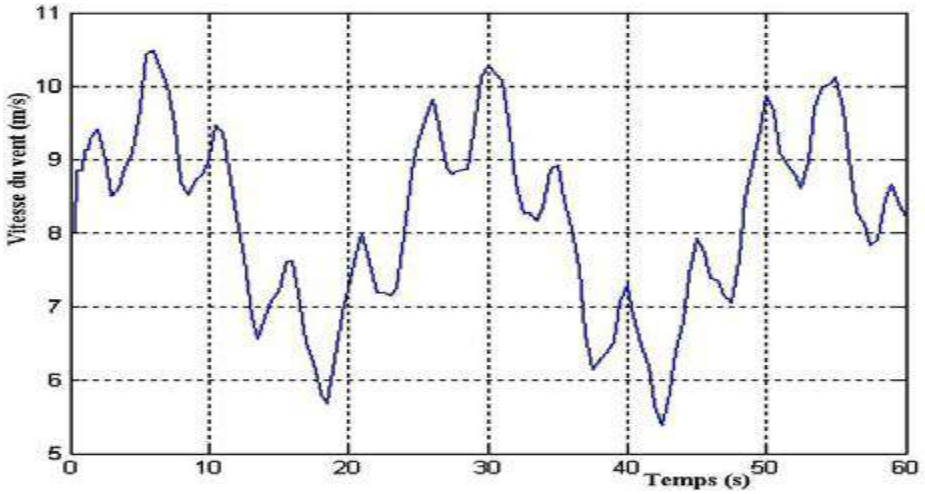
- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- développer et affiner la modélisation du rotor ;
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable ;

- fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourrier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques.

La vitesse moyenne du vent est donnée par l'expression suivant : [33hicham]

$$V(t) = 8 + \sin(0.1047.t) + 2\sin(0.2665.t) + 0.2\sin(3.6645.t)$$



Fiure II.1: Variation de la vitesse du vent (m/s)

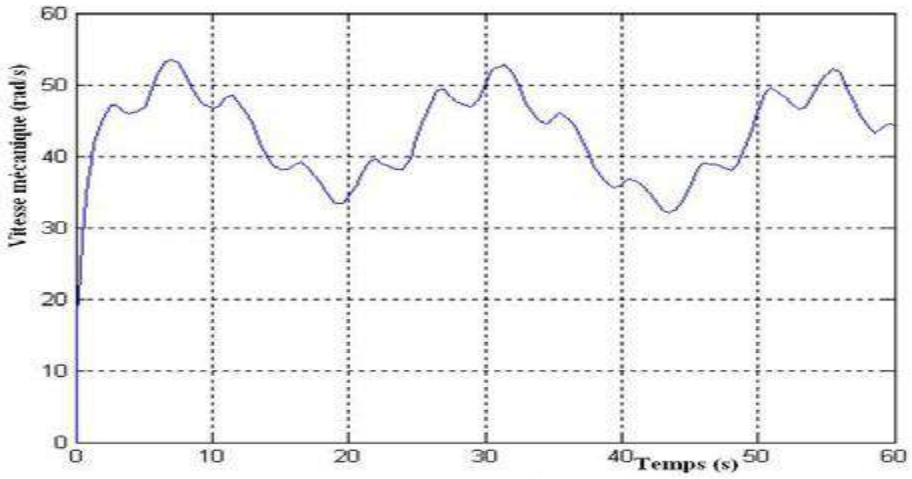


Figure II.2 : Variation de la vitesse mécanique (rad/s)

II.3 Conversion de l'énergie éolienne :

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [Gri06].

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme :

$$P_{aer} = C_P(\lambda, \beta).\frac{\rho.S.v^3}{2} \qquad \text{(II.2)}$$

Où:

C_P : Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

ρ : La densité de l'air (approx. 1.22 kg/m^2 à la pression atmosphérique à 15°C).

S : La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

v : La vitesse du vent.

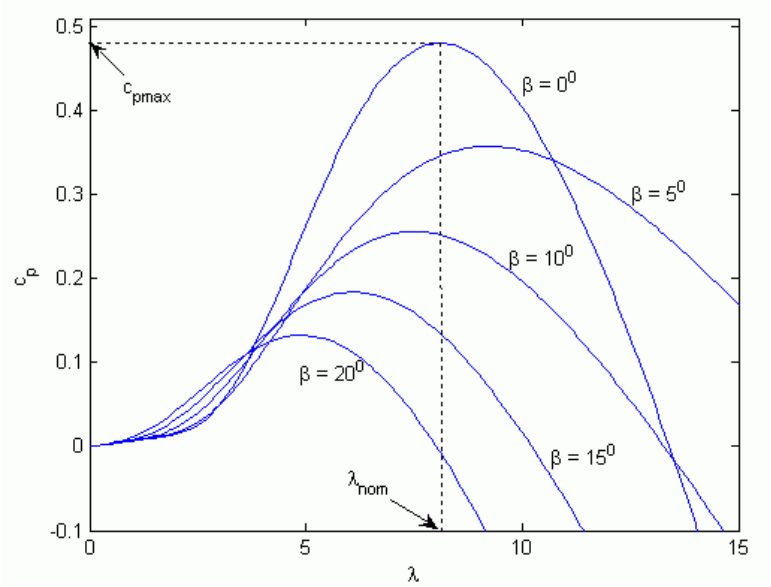


Fig. II.3 : Coefficient de puissance C_P

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent:

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \qquad \text{(II.3)}$$

Avec :

Ω : est la vitesse de rotation de la turbine avant multiplicateur.

R : est le rayon de l'aéroturbine.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique (couple de la turbine éolienne) est donc directement déterminé par : [Fai12]

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_P(\lambda,\beta).\frac{\rho.S.v^3}{2}.\frac{1}{\Omega_{turbine}} \qquad \text{(II.4)}$$

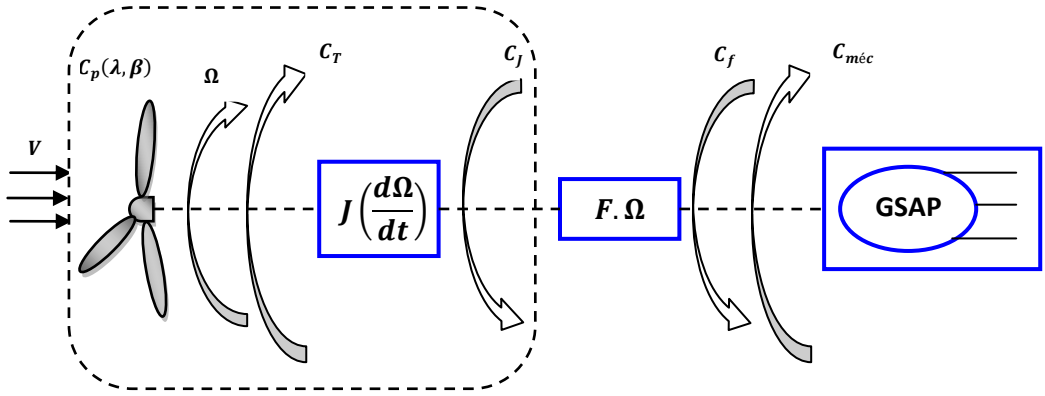


Fig. II.4 : Schéma bloc d'une turbine éolienne.

II.4.1. Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \qquad \text{(II.5)}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partie du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor : [ELA-05]

$$J\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \qquad \text{(II.6)}$$

Où :

J : est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \qquad \text{(II.7)}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f : $C_{vis} = f\Omega_{mec}$ (II.8)

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la (Fig.II.9).

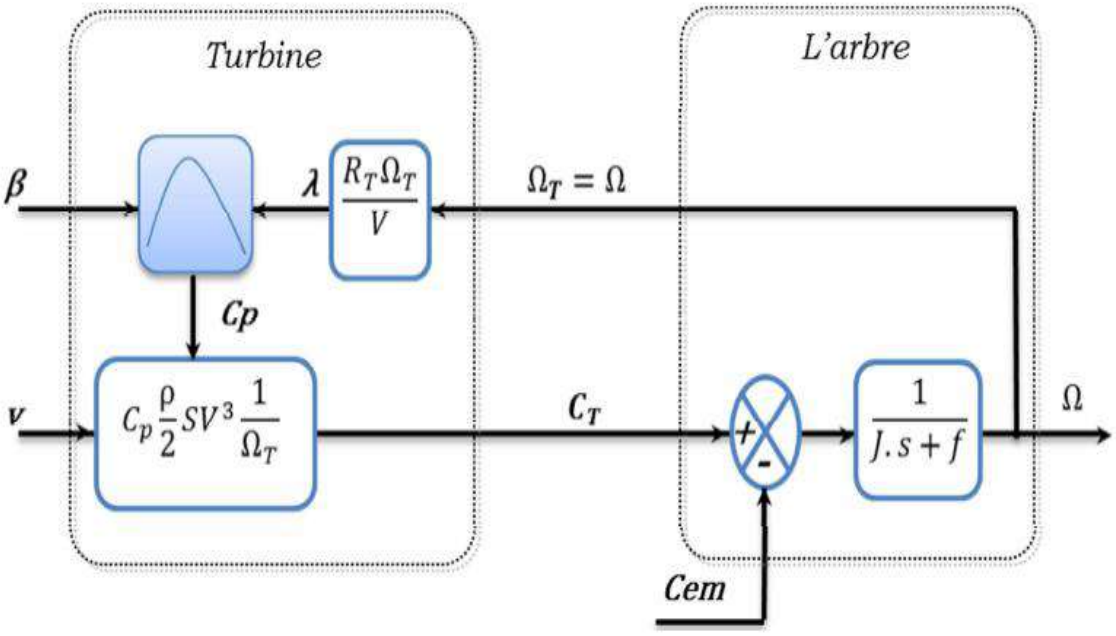


Fig. II.5 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.5 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil du vent et des pales. . Nous avons pu valider le model du vent de la turbine etde larbre mécanique, ce qui nous permettra de l'utiliser par la suite.

Chapitre III

Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

III.1. Introduction :

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique. Entrainées
par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros Convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW **[NIC-05]**.
Dans notre étude nous allons nous intéresser à une éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents. Ce choix n'est pas fortuit puisqu'il est basé sur les avantages technologiques et économiques qu'offre la MSAP comparée aux autres machines.

L'utilisation des aimants permanents a été une vrai révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machine, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine. Cet avantage a couvert le cout élevé des aimants **[BOY-06,NIC-05]**.

Le progrès technologique dans le domaine de l'électronique de puissance a également Conduit vers un progrès important dans les performances globales des entrainements à vitesse Variable, ce qui facilite l'autopilotage de la machine synchrone la rendant ainsi très Performante comparée la machine asynchrone et celle à courant continu **[LOU-16]**.
Mais l'avantage le plus important de ces machines dans le domaine éolien est l'absence de multiplicateur de vitesse pour des machines de grand nombre de paires de pôles, réduisant Ainsi le volume de l'éolienne et la maintenance du système **[ABD-07]**.

III.2 Description :

L'alternateur est formé d'un stator fixe, et d'un rotor tournant. Le stator ou induit se compose 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 2Π2 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. Ces pôles sont créés par des bobines alimentées en courant continu ou par des aimants permanents. Le rotor est soit à pôles saillants ou à pôles lisses.

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Ainsi, considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplacent les pôles nord et les pôles sud du rotor. Si la tension induite dans ce conducteur

rend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle sud. Chaque fois qu'une paire de pôles se déplace devant un conducteur, la tension induite

décrit donc un cycle complet. On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation : $f = pn120$

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue Construction mécanique :

- Les Machines synchrones à aimants permanents montés en surface
- Les machines synchrones à aimants permanents insérés
- Les machines synchrones à aimants permanents chapeautés
- Les machines synchrones à aimants permanents enterrés [STU-00]

III.3 Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone :

L'inducteur de la génératrice synchrone, entrainé mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.e.m induites dans ces bobinages provoquent la circulation de courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle du champ inducteur[DIO-18]

III.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :[HAM-13]

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle 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). Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasée – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations).

III.4.1 Les hypothèses simplificatrices :

Pour une représentation plus simple nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes

• Caractéristique magnétique de la machine linéaire.

• Symétrie de la machine.

• Alimentation par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales.

• Répartition sinusoïdale dans l'entre fer.

• L'influence des pièces polaires

III.4.2 Modèle en ABC :

III.4.2.1 Les équations électriques :

Equations des tensions des enroulements statoriques et rotoriques :

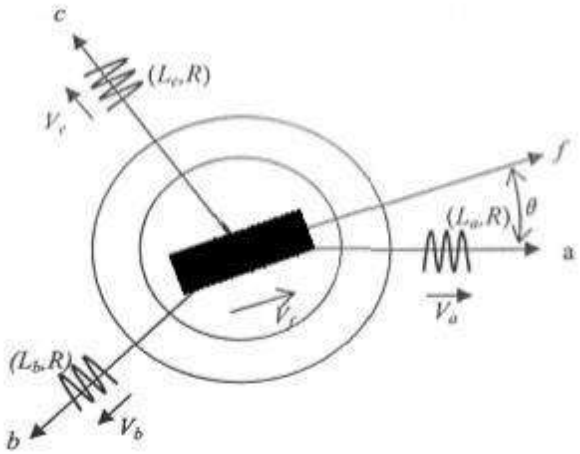


Figure.III.1 : Modèle de la machine synchrone à aimant permanent en abc.

$$v_a = Ri_a + \frac{d\psi_a}{dx}$$
$$v_b = Ri_b + \frac{d\psi_b}{dx} \qquad \text{(III.1)}$$
$$v_c = Ri_c + \frac{d\psi_c}{dx}$$

On désigne par , ψb, ψc les flux totaux qui traversent les enroulements (a, b, c), et par ia, ib,ic les courants qui circulent dans ces enroulements.

MODELE BIPHASETransformation de PARK :

Afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système on utilise des transformations orthogonales. On obtient donc des équations simples par des changements de variables appropriés. Parmi les transformations les plus utilisées, on a celle de Park.

Le modèle de Park est basé sur la transformation d'un système triphasé d'axes *(a, b, c)* à un système équivalent biphasé d'axes *(d, q)* créant la même force magnétomotrice.

Une seconde transformation de Park est appelée la transformation de Park modifiée Cette modification permet de conserver la puissance lors de passage du système triphasé à celui du biphasé ou inversement .

La composante homopolaire ne participe pas à cette création de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan *(od, oq).*

La figure (III.1) représente les enroulements de la MASDE dans le repère *(d, q) :*

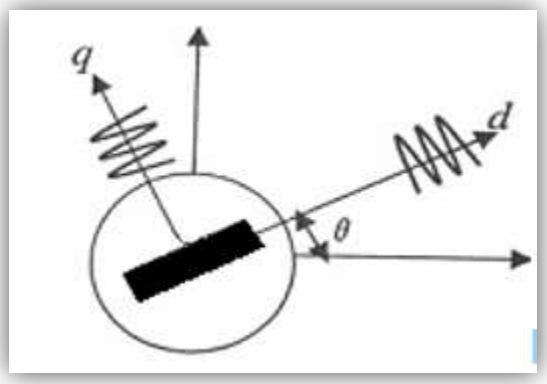


Figure.III.2 : Modèle de la machine en biphasé.

A l'aide de transformation de PARK on passe de grandeurs réelle (Va,,Vc) et (ia,ib ic) à leurs composantes ($V0$,Vd,Vq) et ($i0$,id,iq).

La matrice de PARK s'exprime par :

$$[\mathrm{p}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta+\frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta+\frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III.2)}$$

Si le neutre de la machine synchrone est isolé (non relié à la terre) alors :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad \text{(III.3)}$$

Dans ce cas la composante homopolaire est nulle. La matrice de transition de PARK devient alors :

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

Et sa matrice inverse sera exprimée par :

$$[P_2(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{(III.5)}$$

III.4.2.2 Equations électriques :

La figure III.1 représente les trois enroulements statoriques fixes, et le rotor à aimants permanents.

On a :

$$[i_{dq}] = [P_2(\theta)]^{-1}.[i_s] \quad \text{(III.6)}$$

$$[V_{dq}]=[P_2(\theta)][V_s] \quad \text{(III.7)}$$

Tel que :

$$[V_{dq}] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}, \ [i_{dq}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \text{ et } [V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{(III.8)}$$

Après simplification on aura :

$$V_d = R_s.i_d + L_d\frac{di_d}{dx} + \psi_q\omega_r \quad \text{(III.9)}$$

$$V_q = R_s.i_q + L_q\frac{di_q}{dx} + \psi_d\omega_r \quad \text{(III.10)}$$

Avec :

$$\psi_d = L_d.i_d + \psi_f \quad \text{(III.11)}$$

$$\psi_q = L_q.i_q \quad \text{(III.12)}$$

ψf: Flux des aimants permanents.

Les relations (II-9) et (II-10) deviennent alors :

$$V_d = R_s.i_d + L_d\frac{di_d}{dx} - L_q.i_q.\omega_r \quad \text{(III.13)}$$

$$V_q = R_s.i_q + L_q\frac{di_q}{dx} + (L_d.i_d + \Phi_f).\omega_r \quad \text{(III.14)}$$

III.4.2.3 EXPRESSION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE :

L'expression générale du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = \frac{1}{2}[i_s]\left\{\frac{d[L]}{d\theta_m}\right\}[i_s] \quad \text{(III.15)}$$

Avec $\theta e=p.\theta m$

θe: L'angle électrique

θm: L'angle mécanique

P ; nombre de pair de pôles

Après développement et simplification on trouve :

$$C_{em}e = p.(\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad \text{(III.16)}$$

En remplaçant ϕdet ϕq par leurs valeurs on trouve :

$$C_{em} = p.\left((L_d - L_q)i_d + \Phi_f\right) i_q \quad \text{(III.17)}$$

III.4.2.4 L'EQUATION MECANIQUE :

L'équation mécanique s'écrit :

$$J\frac{d\Omega}{dt} + f = C_{em} - C_r \quad \text{(III.18)}$$

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \quad \text{(III.19)}$$

ωr: Vitesse angulaire (pulsation électrique)

Ω : Vitesse mécanique.

Cr: Couple de charge.

J: Moment d'inertie de la partie tournante.

f: Coefficient de frottement visqueux.

III.4 Commande vectorielle de la MSAP :

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct à zéro est la plus répandue. Cela permet de simplifier l'expression du couple électromagnétique de l'équation Cem en une expression linéaire donnée par :

(III.20)

Ce dernier est alors réglé en agissant sur le courant en quadrature iq

Pour pouvoir appliquer la commande vectorielle nous devons :

- poser une référence $idref$=0
- poser $Cemref$=Cte.Ω2
- poser une référence $iqref$=$Cemrefkt$

III.4.1 Commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation :

Afin de justifier le recourt à la commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation, examinons d'abord le modèle de la machine synchrone dans le plan de Park qui est donné par les équations (III.21-III.22).

$$V_d = R_s.i_d + L_d\frac{di_d}{dx} - \psi_q\omega_r \quad \text{(III.20)}$$

eq=$\omega r.\phi q$: f.e.m de la machine sur l'axe q.

$$V_q = R_s.i_q + L_q\frac{di_d}{dx} + \psi_d\omega_r \quad \text{(III.21)}$$

$ed{=}\omega r.\phi d$: f.e.m de la machine sur l'axe d

La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation permet de découpler les courants id et iq et de permettre de faire la régulation adéquate à chacun des deux séparément. Cette commande nous mène à un modèle de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Les termes de couplage en $Ed,{=}{+}\omega r.\phi d,$ sont considérés comme des perturbations mesurables. Ainsi la machine peut être représentée par la fonction de transfert suivante :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + pL_s} = \frac{1}{R_s}.\frac{1}{1+T_sp} \quad \text{(III.22)}$$

Avec

$Te{=}LsRs$: La constante de temps électrique

Si on tient compte de la perturbation, (p) sera sous la forme donnée en III.24, en vertu du théorème de superposition

$$G_s(p) = \frac{i_{d,q}(p)}{V_{d,q}(p) + E_{d,q}(p)} \quad \text{(III.23)}$$

Afin d'imposer la référence du courant sur l'axe d égale à zéro on utilise un régulateur PI. La boucle de régulation du courant id est donnée par le schéma bloc suivant :

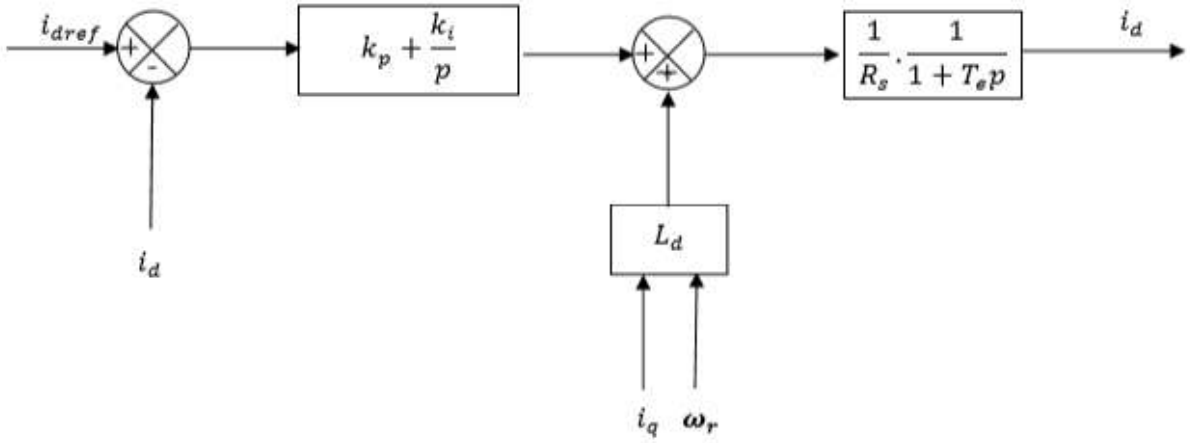


Figure III. 3 : Boucle de régulation du courant id

III.4.2 Calcul du régulateur PI :

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée comme suit :

$$G_0(p) = \frac{K_{pd}p+K_{id}}{p}.\frac{1}{R_s p+L_d} = \frac{K_{pd}p+K_{id}}{p}.\frac{1}{R_s}.\frac{1}{1+pT_e} \quad \text{(III.24)}$$

Enfin :

$$G_0(p) = \frac{K_{pd}p+K_{id}}{p}.\frac{G_0.}{1+T_e p} \quad \text{(III.25)}$$

$Te=kpki$: La constante de temps électrique

$G0$: Le gain statique

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par $(p)=G01+G0(p)$

Les paramètres du régulateur sont calculés par la méthode de placement de pôle

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_{b0}(p)=\frac{K_{pd}p+K_i}{p}.\frac{1}{R_s}.\frac{1}{1+pT_e}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_{bf}(p) = \frac{G_{bo}}{1+pG_{bo}} = \frac{K_P p + K_i}{Rp^2 + (L_q + K_p)p + K_i} \quad \text{(III.26)}$$

$$k_p = \frac{2\zeta_n K_i}{\omega_n} - J \quad \text{(III.27)}$$

$$K_i = \omega_n^2 \mathrm{J} \quad \text{(III.28)}$$

La boucle de régulation du courant iq est donnée par le schéma bloc suivant :.

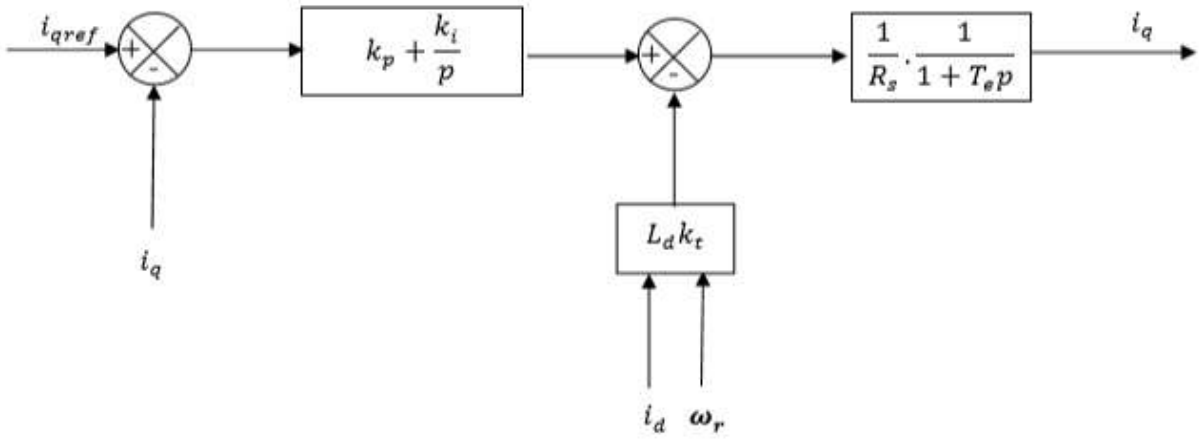


Figure III. 4 : Boucle de régulation du courant iq

$$i_{qref} = \frac{C_{emref}}{K_t} C_{te}.\frac{\Omega_t^2}{K_t} \quad \text{(III.29)}$$

$$C_{emref} = \frac{p_{éolmx}}{\Omega_t} \quad \text{(III.30)}$$

$$P_{éol} = \frac{1}{2}.C_{pmax}(\pi).\rho.S.v_v^2 \quad \text{(III.31)}$$

Si on remplace la puissance éolienne $Péol$ et la surface active S, par leurs formules respectives, données en (III.33), on obtient :

$$C_{te} = \frac{\rho.\pi.R_t^5.C_{pmax}}{2.\lambda_{opt}^3} \quad \text{(III.32)}$$

III.5 Simulation de la Génératrice Synchrone à Aimants Permanents :

III.5.1 Fonctionnement a vide :

Fonctionnement à vide les courant statoriques sont nulle :

$$i_{ds}=0 \text{ et } i_{qs}=0 \quad \text{(III.33)}$$

Les expressions du tension et du couples deviennent :

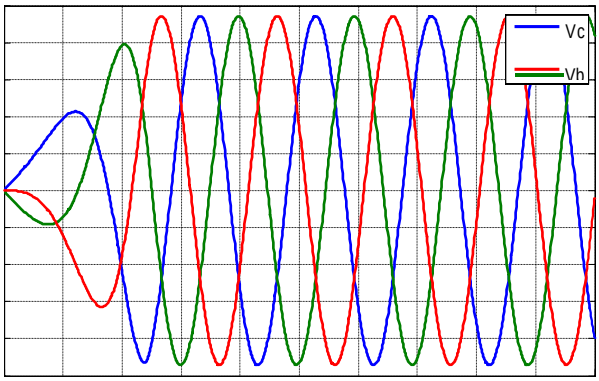
$$V_{ds} = 0 \;\; et \; C_{em} = 0 \quad et \; V_{as} = 0 \quad \text{(III.34)}$$

Dans ce fonctionnement, on veut montrer la proportionnalité entre la vitesse de rotation de la machine (mode générateur) et l'amplitude et la fréquence de la tension fournie. Pour cela, on fait lancer le générateur par un couple moteur égale à 6.28 N.m pour une durée de 24 (ms), puis, on le laisse tourner librement. Le frottement dans ce cas est nul. [Ich17]

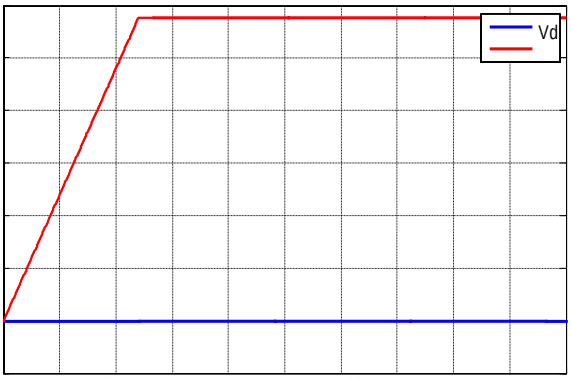
Résultats de simulation :

Dans toutes les simulations on a utilisé le logiciel (Matlab/simulink). Les paramètres sont: R_S = 0.895 Ω; L_d = 0.012 H; L_q = 0.0211 H; J = 0.00141 . m^2 ; P = 3; fif = 0.9 Wb

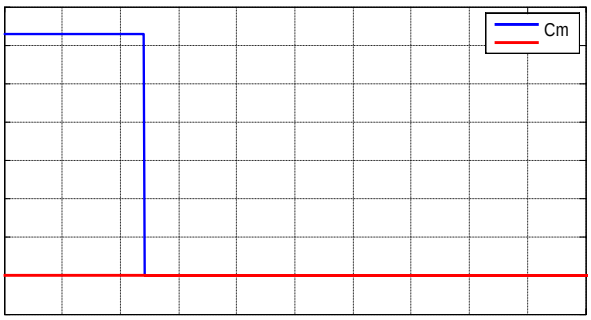
Notons que dans ce cas : f= 0 Nm/rd/s [Ich17].



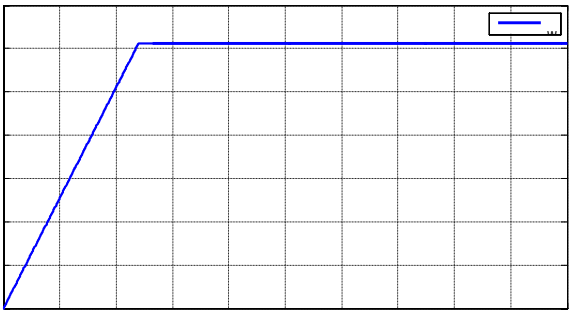
a) Tensions statoriques.



b) Composantes Vd et Vq.



c) Couples moteur et électromagnétique.



d) vitesse de rotation.

Figure. III.5 : Générateur synchrone à aimants permanents à vide.

III.5.1.1 Interprétation des résultats :

On remarque dans la figure (Fig.III.4.a) que l'amplitude des tensions des phases augmente simultanément avec l'augmentation de la vitesse, puis les tensions deviennent parfaitement sinusoïdales en régime stable à (0.024 sec), avec une valeur crête de 280(V) et une fréquence de 50(Hz), alors que les tensions V_d , V_q prennent à (0.024 sec) respectivement les valeurs 0 (V) et 280(V) qui correspond à la valeur crête (Fig.III.4.b).

Le couple moteur appliqué sur le GSAP est égal à 6.28Nm puis il s'annule à (0.024 sec), mais le couple électromagnétique est toujours nul (fonctionnement à vide), (Fig.III.4.c).

La vitesse de rotation de la machine augmente jusqu'elle se stabilise à la valeur de celle du champ tournant ou de synchronisme (3000 tr/min) à partir de (0.024 sec), car les couples moteur et électromagnétique et le frottement sont nuls à partir de cet instant (équation II.26), (Fig. III.4.d).

On constate que l'amplitude des tensions statorique et la fréquence sont proportionnels à la vitesse de rotation.

III.5.2 Fonctionnement en charge:

Dans ce cas le générateur alimente une charge (R_{ch} , l_{ch}). Pour voir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur le générateur, on applique d'une part, les équations données par (III.17) : [40]

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_S I_{ds} - L_d \frac{dI_d}{dt} + \omega . L_q I_q \\ V_{qs} = -R_S I_{qs} - L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega . (L_d I_d - \varphi_f) \end{cases} \quad \text{(III.35)}$$

D'autre part, l'application des tensions V_{ds} et V_{qs} sur la charge:

$$\begin{cases} U_{ds} = R_{ch} . I_{ds} + L_{ch} \frac{dI_d}{dt} - \omega\, L_{ch}\, I_q \\ V_{qs} = R_{ch} . I_{qs} + L_{ch} \frac{dI_q}{dt} + \omega\, L_{ch}\, I_d \end{cases} \quad \text{(III.36)}$$

En remplaçant les expressions de V_{ds} et V_{qs} dans (III.30), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_S + R_{ch}) I_{ds} - (L_d + L_{ch}) \frac{dI_d}{dt} + \omega \left(L_q + L_{ch}\right) I_q \\ 0 = -(R_S + R_{ch}) I_{qs} - \left(L_q + L_{ch}\right) \frac{dI_q}{dt} - \omega (L_d + L_{ch}) I_d + \omega \varphi_f \end{cases} \quad \text{(III.37)}$$

En introduisant la transformée de **LAPLACE** dans les équations ci-dessus, on aura :

$$\begin{cases} SI_d = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[-(R_S + R_{ch}) I_{ds} + \omega \left(L_q + L_{ch}\right) I_q \right] \\ SI_q = \frac{1}{L_q + L_{ch}} \left[-(R_S + R_{ch}) I_{qs} - \omega (L_d + L_{ch}) I_d \right] + \frac{\omega \varphi_f}{L_q + L_{ch}} \end{cases} \quad \text{(III.38)}$$

Equations d'état :

Considérons le flux d'excitation φ_f comme grandeur de commande, et les courants I_{ds}, I_{qs} comme variables d'état. [41]

On cherche à obtenir un système d'équations sous la forme générale d'équations d'état:

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad \text{(III.39)}$$

$$[Y] = [C][X] + [D][U] \quad \text{(III.40)}$$

Avec :

$$\begin{cases} [X] = \begin{bmatrix} I_{ds} & I_{qs} \end{bmatrix}^t \\ [U] = \begin{bmatrix} 0 & \varphi_f \end{bmatrix}^t \end{cases} \quad \text{(III.41)}$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [X] + [0][U] \quad \text{(III.42)}$$

Les équations (III.33), peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} I'_{sd} \\ I'_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_S+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & \omega\frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\omega\frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & -\frac{R_S+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega}{L_q+L_{ch}}\varphi_f \end{bmatrix} \quad \text{(III.43)}$$

On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_S+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_S+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(III.45)}$$

$$[B][U] = \omega \frac{1}{L_q+L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad \text{(III.46)}$$

Résultats de simulation:

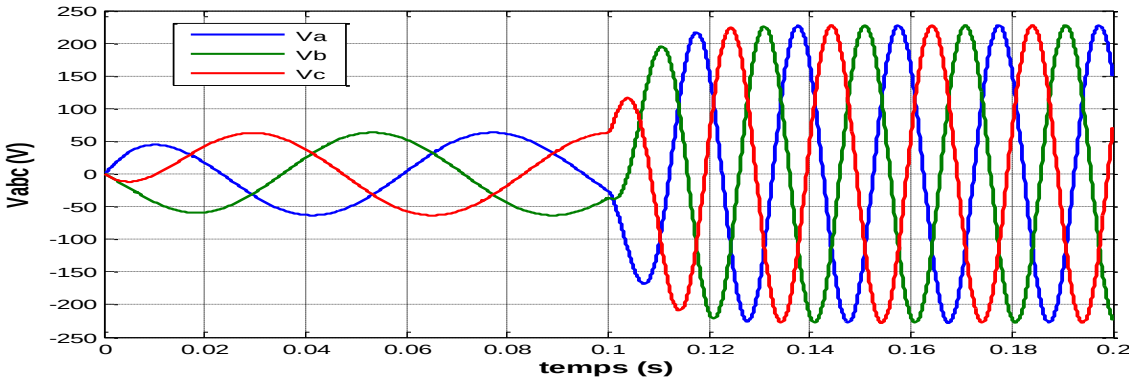


Figure. III.6.a : Tensions statoriques U_{abc}

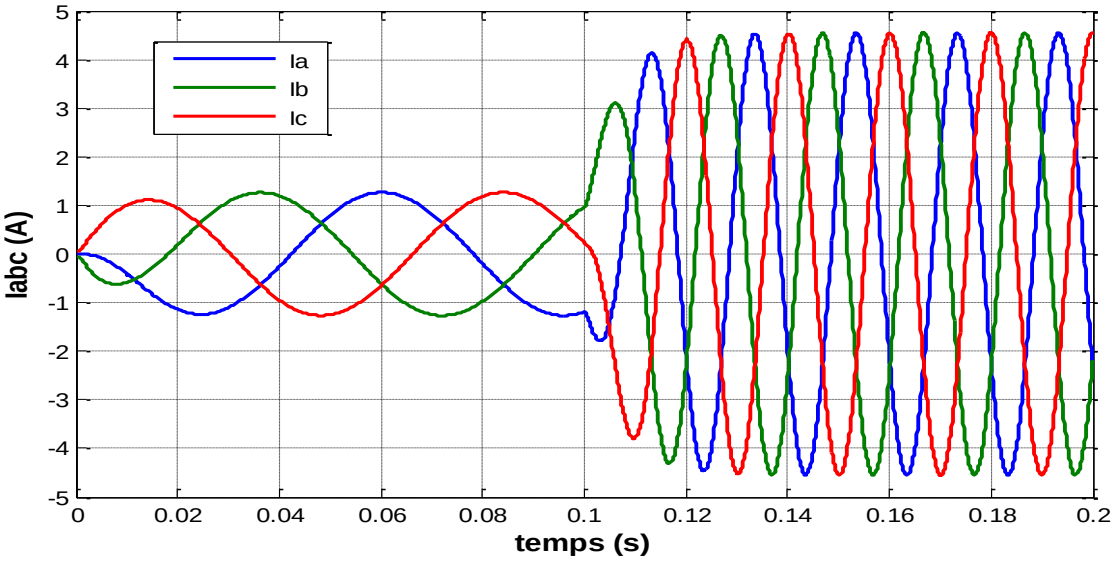


Figure. III.6.b : Courants statoriques I_{abc}

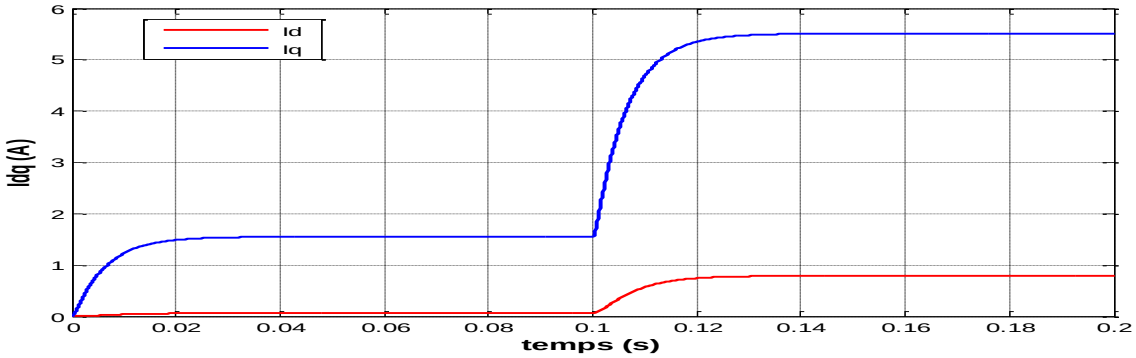


Figure. III.6.c : Tensions Vd et Vq.

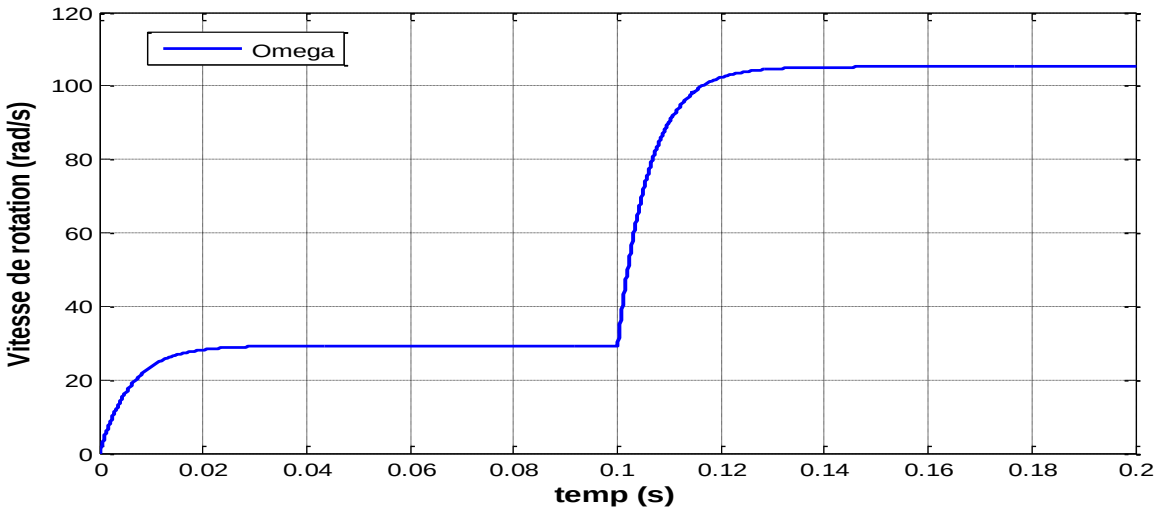


Figure. III.6.d : Courants Id et Iq.

Figure. III.6.e : Vitesse de rotation.

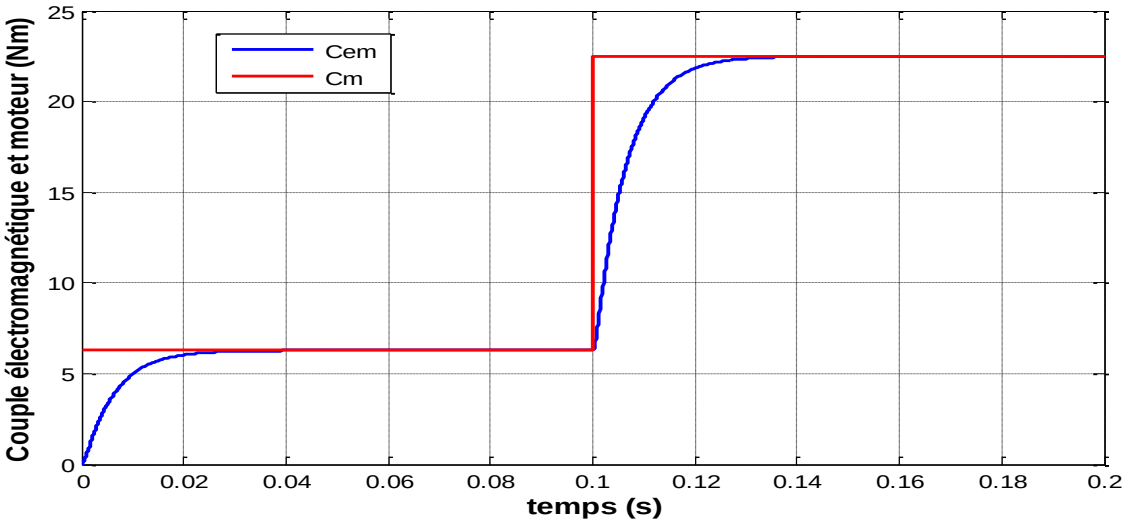


Figure. III.6.f : Couple électromagnétique et moteur (Nm).

Figure. III.6 : GSAP en charge (*Rch*=50Ω ; *Lch*=0.002H) .

III.5.2.1Interprétation des résultats :

De (t = 0 à 0.1sec), on constate que la vitesse du générateur est faible (29 rad/s) et loin de celle de synchronisme (105 rad/s), figure (Fig.III.5.e), ce qui se traduit par des faibles fréquences des tensions et des courants (14.2 Hz) représentés respectivement sur les figures (Fig.III.5.a) et (Fig.III.13.b). On remarque qu'il y a une chute de tension considérable lorsqu'on a chargé le *GSAP* à cause de la diminution de la vitesse, ceci est expliqué par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant.

En augmentant le couple moteur de 6.28 (Nm) à 22.5 (Nm), la vitesse mécanique varie de (29 rad/s) jusqu'à ce qu'elle se stabilise à la valeur de synchronisme à partir de (0.1 sec) avec un court temps de réponse, donc la fréquence devient 50 (Hz). La tension augmente à 226 (V). Le courant augmente de 1.26 (A), à 4.5 (A), ce qui implique l'augmentation du couple résistant (électromagnétique), (équation III.25) et le figure (Fig.III.5.f).

III.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Nous avons présenté différentes structures concernant la construction de celle-ci du point de vue emplacement des aimants permanents. Nous avons ensuite présenté les équations régissant son fonctionnement, avec la commande direct de puissance qui permet la modélisation d'une GSAP

Chapitre IV

La commande directe de puissance

IV.1 Introduction :

Le principe du contrôle direct de la puissance et il a été développé plus tard pour plusieurs applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures.

Ensuite, une technique similaire appelée Contrôle Direct de Puissance (en anglais Direct Power Control, *DPC*) était proposée par pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau (génératrice dans notre cas). Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées, en utilise cette grandeur comme variables de contrôle et qui n'a pas besoin d'utiliser des blocs de modulation car les états de commutation sont choisis directement par un tableau de commutation. [ABD-97] [FAI-12]

Dans la première partie, on décrira la modélisation de la parte puissance le redresseur *à MLI*. En dernier, Finalement, on exposera les résultats de simulation et leurs interprétations du redresseur à *MLI* contrôlé par la commande directe de puissance.

IV.2 Modélisation de la parte puissance :

Le figure (Figure .IV.1) donne les trois étages du circuit de puissance, le réseau (GSAP), la charge et le convertisseur à MLI, chaque étage sera présenté par la suite : [Bou05]

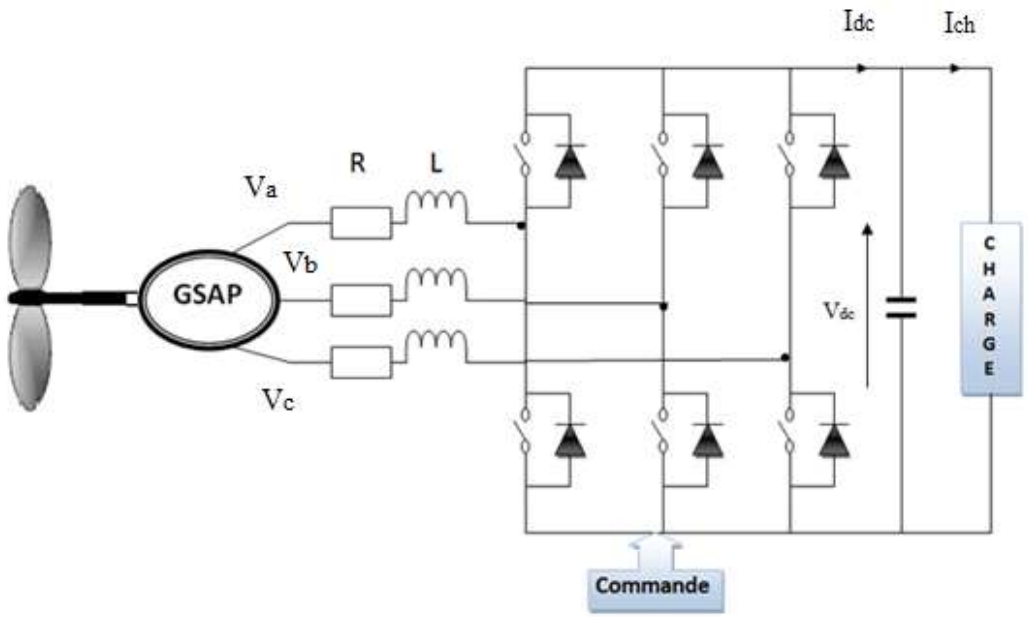


***Figure. IV.1 :* Schéma du circuit de puissance.**

IV.2.1 Source d'alimentation :

La source est modélisée par *GSAP* triphasée sinusoïdale en série avec une inductance L et une résistance R qui représentent l'impédance totale de la ligne

On suppose que le réseau équilibré, avec les mêmes impédances dans les trois phases, les tensions de ligne sont exprimées comme suit : [BOU-05]

$$\begin{cases} V_a = RI_a + L\dfrac{dI_a}{dt} + V_{an} \\ V_b = RI_b + L\dfrac{dI_b}{dt} + V_{bn} \\ V_c = RI_c + L\dfrac{dI_c}{dt} + V_{cn} \end{cases} \quad \text{(IV.1)}$$

Et les courants de chaque phase sont alors donnés par le système d'équation d'état suivant :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{-R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{-R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{-R}{L} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L}\begin{bmatrix} V_a - V_{an} \\ V_b - V_{bn} \\ V_c - V_{cn} \end{bmatrix} \quad \text{(IV .2)}$$

Avec ; V_a, V_b, V_c: La tension de la génératrice .

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Les tensions à l'entrée du convertisseur.

IV.2.2 Le redresseur à *MLI* :

Le redresseur à *MLI* donné par la figure (Figure .IV.1) est constitué de six *IGBT* avec six diodes antiparallèles pour assurer la continuité du courant .Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. Il est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique S_j selon la figure (Figure .IV.2). [KED-14]

On définit la fonction logiques de connexion par :

$$S_j = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ est fermé} \end{cases}$$

Avec ; j=a ,b ,c et i=1 ,2 , 3

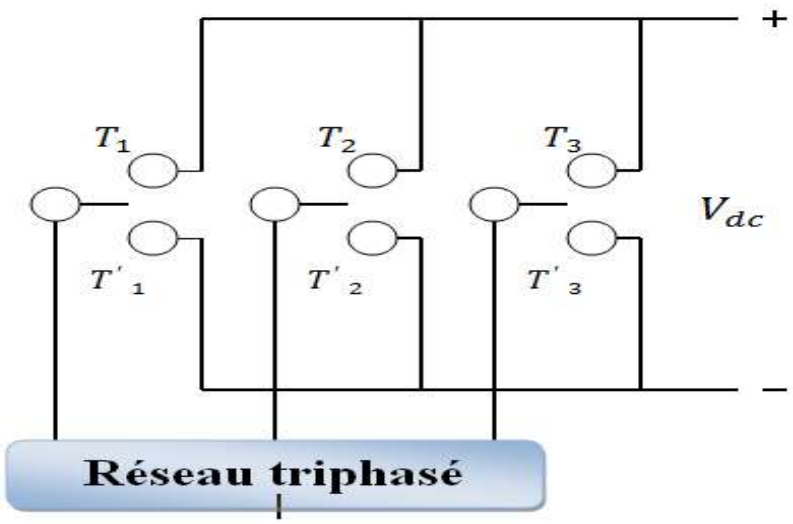


Figure. IV.2 : Représentation d'un convertisseur *AC/DC* triphasé.

Ainsi les tensions entre lignes sont données par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{dc}.(S_a - S_b) \\ V_{bc} = V_{dc}.(S_b - S_c) \\ V_{ac} = V_{dc}.(S_a - S_c) \end{cases} \quad \text{(IV .3)}$$

Connaissant l'état de chaque interrupteur, on peut définir la matrice de conversion du convertisseur. Les tensions simples V_{an}, V_{bn}, V_{cn} s'expriment par la relation (IV .4).

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{(IV .4)}$$

Le courant redressé est donné par :

$$I_{dc} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{(IV .5)}$$

IV.2.3 La charge :

Ce bloc est constitué d'une capacité *C* (pour diminuer les ondulations de la tension redressée) placée en parallèle avec une résistance *R*, modélisant la charge continue (Figure .IV.3). [BOU-05]

La tension V_{dc} aux bornes de la charge est donnée par l'équation suivante:

$$\begin{cases} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}(I_{dc} - I_{ch}) \\ V_{dc} = R_{ch} I_{ch} \end{cases} \quad \text{(IV .6)}$$

I_{ch} : Courant de la charge.

I_{dc} : Courant redressé.

L'équation de dépend de la charge :

- A vide : $I_{ch} = 0$

- Pour un charge résistive R :

$$I_{ch} = \frac{V_{ch}}{R} \quad \text{(IV .7)}$$

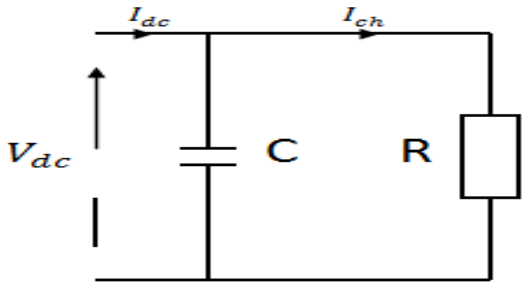


Figure. IV.3 : Schéma du bloc de la charge.

A partir des relations (IV.1), (IV.2), (IV.4), (IV.5) on peut établir le schéma fonctionnel global du redresseur à MLI ayant comme entrée la commande des gâchettes des interrupteurs du haut (S_a, S_b, S_c) et comme sortie la tension redressée V_{dc}.

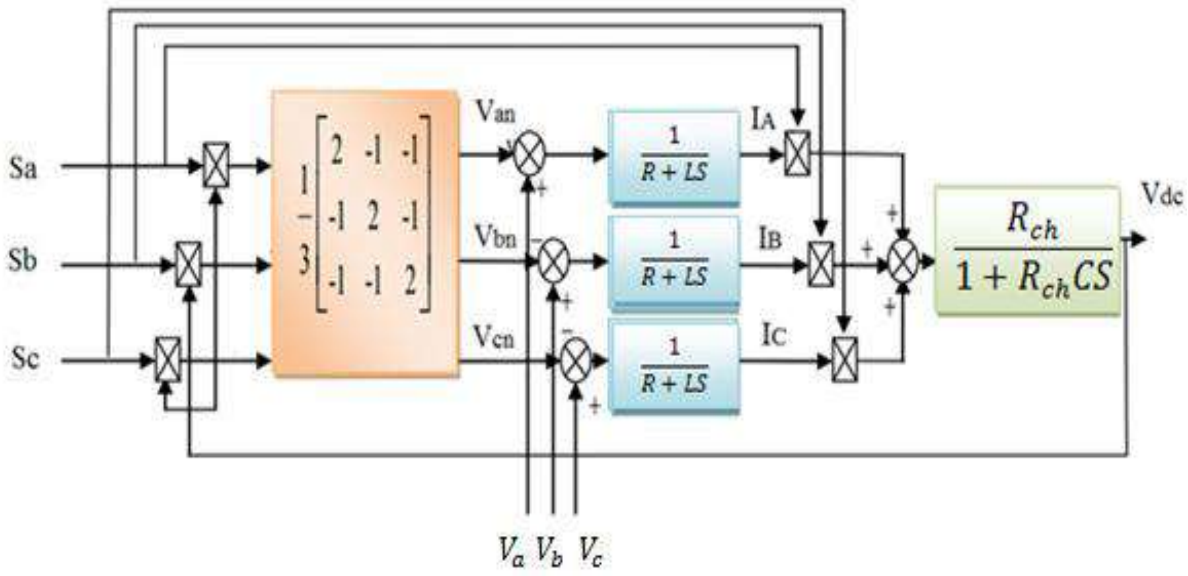


Figure. IV.4 Schéma fonctionnel du redresseur à MLI.

IV.3 Commande Directe de Puissance (DPC) :

La commande directe de puissance *(DPC)* est basée sur le concept du contrôle direct du couple *(DTC)* appliqué aux machines électriques. Pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau (génératrice dans notre cas). Le but est de contrôler directement la puissance active et réactive dans un redresseur *MLI*, le même principe a été appliqué pour contrôler le couple et le flux dans les machines électriques alternatives.

Les régulateurs utilisés sont des comparateurs à hystérésis à deux niveaux pour les erreurs de puissance active et réactive instantanées S_p et S_q. La sortie des régulateurs avec le secteur où se trouve la position du vecteur de tension du réseau, constituent les entrées d'un tableau de commutation qui à son tour détermine l'état de commutation des interrupteurs. Aussi bien que sur la position angulaire du vecteur de tension estimée. En fonction de la valeur de cette position, le plan $(\alpha - \beta)$ est divisé en douze secteurs ou on doit associer à chaque secteur un état logique de redresseur, la référence de puissance active est obtenue à partir du régulateur de tension du bus continu, en utilisant un contrôleur proportionnel intégrateur *(PI)*. Tandis que pour assurer un facteur de puissance unitaire un contrôle de la puissance réactive à zéro est effectué.

La figure (Figure .IV.5) montre la configuration globale de la commande directe de puissance pour un redresseur à *MLI*. [Mou14]

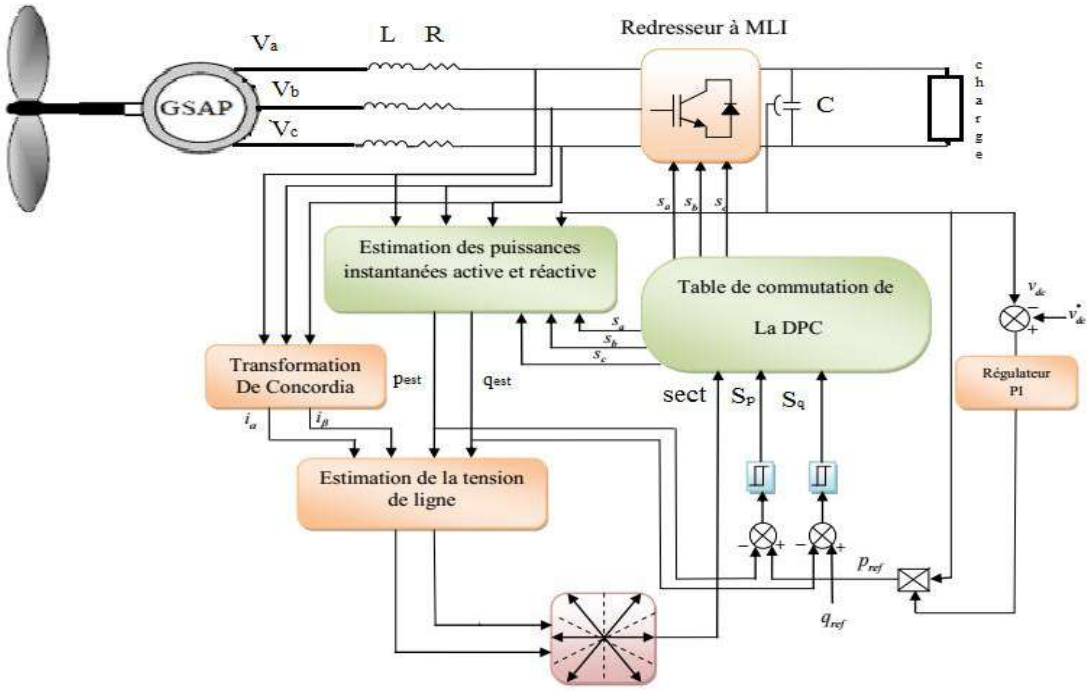


Figure. IV.5: Configuration générale de la commande *DPC*.

IV.3.1 Calcul des puissances instantanées :

Il y a trois méthodes pour calculer la puissance active et réactive :

- ✓ Par la mesure des courants et des tensions
- ✓ Par estimation des tensions du réseau et mesure des courants
- ✓ Par estimation du flux virtuel et mesure des courants. [GEN-05]

1er méthode : calculer la puissance active et réactive par la mesure des courants et des tensions :

Takahashi définit la puissance active instantanée par le produit scalaire entre les courants et les tensions de ligne et la puissance réactive par le produit vectoriel entre eux. [BEN]

$$p = \underline{v}_{(abc)} \cdot \underline{i}_{(abc)} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \qquad \text{(IV.8)}$$

$$q = v_{(abc)} \wedge i_{(abc)} = v_a' i_a + v_b' i_b + v_c' i_c \qquad \text{(IV.9)}$$

D'où v_a', v_b', v_c' sont en arrière de 90° sur v_a, v_b, v_c respectivement (Figure.IV.6)

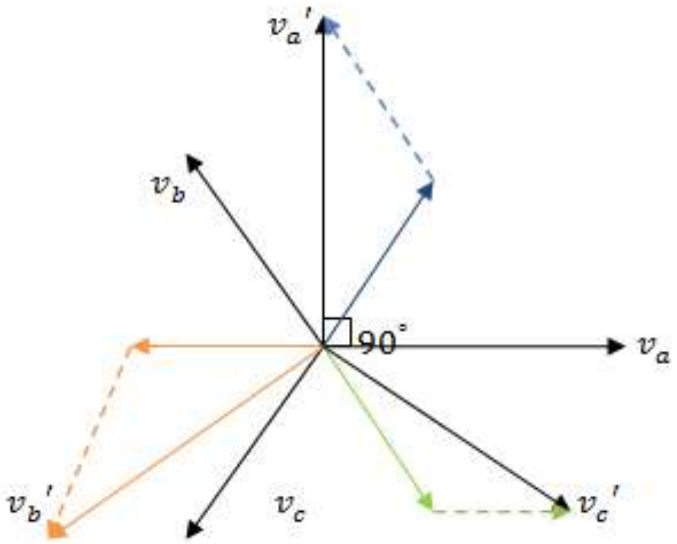


Fig. IV.6 Représentation vectorielle des vecteurs v_a, v_b, v_c et v_a', v_b', v_c'

La même équation peut être décrite sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \\ v_a' & v_b' & v_c' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \qquad \text{(IV.10)}$$

$$\begin{bmatrix} v_a' \\ v_b' \\ v_c' \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_b - v_c \\ v_c - v_a \\ v_a - v_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_{bc} \\ v_{ca} \\ v_{ab} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.11)}$$

Avec

La puissance apparente complexe **S** peut être exprimée par l'expression suivante : [BOU-05]

$$\overline{S} = \overline{V}.\overline{I} = p + jq$$

$$\overline{S} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c + j\frac{1}{\sqrt{3}}[(v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b + (v_a - v_b)i_c \quad \text{(IV.12)}$$

Sachant que :

V : Tension instantanée de la source.

I : Courant instantané de ligne.

2eme méthode : calculer la puissance active et réactive par estimation des tensions du réseau et mesure des courants :

- Démonstration de l'équation de la puissance réactive instantanée:

$$\hat{q} = q_s + q_L \quad \text{(IV.13)}$$

Tel que $\hat{q}$: La puissance réactive totale.

q_L : La puissance réactive dans les inductances.

q_s : La puissance réactive à l'entrée de convertisseur.

On sait que la puissance réactive est égale au produit vectoriel entre la tension et le courant.

Donc :

$$q_L = v_L \wedge \mathrm{I_s} \quad \text{(IV.14)}$$

Tel que v_L tension aux bornes de l'inductance, $\mathrm{I_s}$ courant de ligne.

$$[v_L] = \begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} \quad et \quad i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{(IV.15)}$$

Avec :

$$q_L = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_{La} & v_{Lb} & v_{Lc} \\ i_a & i_b & i_c \end{bmatrix} \quad \text{(IV.16)}$$

Ce qui donne

Alors :

$$q_L = \vec{i}(v_{Lb}i_c - v_{Lc}i_b) - \vec{j}(v_{La}i_c - v_{Lc}i_a) - \vec{k}(v_{La}i_b - v_{Lb}i_a) \quad \text{(IV.17)}$$

Le système en équilibre, alors :

$$\begin{cases} v_{Lc} = -v_{La} - v_{Lb} \\ i_c = -i_a - i_b \end{cases} \quad \text{(IV.18)}$$

On aura :

$$q_L = \vec{i}[(v_{Lb} - v_{Lc})i_c - v_{Lc}(i_a - i_c)] - \vec{j}(v_{La}i_c - v_{Lc}i_a) + \vec{k}[v_{La}(-i_a - i_c) - (-v_{La} - v_{Lc})i_a] \quad \text{(IV.19)}$$

$$q_L = (v_{La}i_c - v_{Lc}i_a)(-\vec{i} + \vec{j} - \vec{k}) \quad \text{(IV.20)}$$

Le module de q_L est :

$$q_L = \sqrt{3}(v_{La}i_c - v_{Lc}i_a) \quad \text{(IV.21)}$$

$$\begin{cases} v_{La} = L\dfrac{di_a}{dt} \\ v_{Lc} = L\dfrac{dic}{dt} \end{cases} \Rightarrow q_L = \sqrt{3}\,L\left(\frac{di_a}{dt}ic - \frac{dic}{dt}i_a\right) \quad \text{(IV.22)}$$

Puisque :

$$q_s = v_s \wedge I_s \quad \text{(IV.23)}$$

Tel que v_s tension d'entrée du redresseur :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad et \quad i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{(IV.24)}$$

Avec ;

$$q_s = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_{sa} & v_{sb} & v_{sc} \\ i_a & i_b & i_c \end{bmatrix} \quad \text{(IV.25)}$$

Ce qui donne

Alors :

$$q_s = \vec{i}(v_{sb}i_c - v_{sc}i_b) - \vec{j}(v_{sa}i_c - v_{sc}i_a) - \vec{k}(v_{sa}i_b - v_{sb}i_a) \quad \text{(IV.26)}$$

Le système en équilibre, alors

$$\begin{cases} v_{Sc} = -v_{Sa} - v_{Sb} \\ i_c = -i_a - i_b \end{cases} \quad \text{(IV.27)}$$

Cela nous donne :

$$q_s = \vec{i}[(-v_{sb} - v_{sc})i_c - v_{sc}(i_a - i_c)] - \vec{j}(v_{sa}i_c - v_{sc}i_a) + \vec{k}[v_{sa}(-i_a - i_c) - (-v_{sa} - v_{sc})i_a \quad \text{(IV.28)}$$

D'où

$$q_s = (v_{sa}i_c - v_{sc}i_a)(-\vec{i} + \vec{j} - \vec{k}) \quad \text{(IV.29)}$$

$$q_s = \sqrt{3}(v_{sa}i_c - v_{sc}i_a) \quad \text{(IV.30)}$$

Le module de q_s sera :

Puisque, d'après la matrice de conversion on a :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{(IV.31)}$$

$$q_s = \sqrt{3}\frac{V_{dc}}{3}[(2S_a - S_b - S_c)i_c - (-S_a - S_b + 2S_c)i_a] \quad \text{(IV.32)}$$

On aura :

Donc :

$$q_s = \sqrt{3}\frac{V_{dc}}{3}[S_a(2i_c + i_a) + S_b(i_a - i_c) + S_c(-2i_a - i_c)] \quad \text{(IV.33)}$$

L'équilibre en courant nous permet d'écrire :

$$q_s = \sqrt{3}\frac{V_{dc}}{3}[S_a(i_b - i_c) + S_b(i_c - i_a) + S_c(i_a - i_b)] \quad \text{(IV.34)}$$

Puisque :

$$\hat{q} = q_s + q_L \quad \text{(IV.35)}$$

L'équation finale sera :

$$\hat{q} = \frac{1}{\sqrt{3}}\left[3L\left(\frac{di_a}{dt}i_c + \frac{di_c}{dt}i_a\right) - v_{dc}\left(S_a(i_b - i_c) + S_b(i_c - i_a) + S_c(i_a - i_b)\right)\right] \quad \text{(IV.36)}$$

➢ Démonstration de l'équation de la puissance active instantanée:

Tel que q : la puissance active totale.

p_L : La puissance active dans les inductances

p_s : La puissance active à l'entrée de convertisseur.

On sait que la puissance active est égale au produit scalaire entre la tension et le courant. Donc :

$$p_L = v_L \, \mathrm{I_s} \quad \text{(IV.37)}$$

On aura :

$$p_L = v_{La} \, \mathrm{i_a} + v_{Lb} \, \mathrm{i_b} + v_{Lc} \, \mathrm{i_c} \quad \text{(IV.38)}$$

Ce que donne :

$$p = L\left(\frac{di_a}{dt}i_a + \frac{di_b}{dt}i_b + \frac{di_c}{dt}i_c\right) \quad \text{(IV.39)}$$

$$p_s = v_{dc} \, \mathrm{I_{dc}} \quad \text{(IV.40)}$$

Avec :

$$\mathrm{I_{dc}} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad \text{(IV.41)}$$

Donc :

$$p_s = v_{dc}(S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \quad \text{(IV.42)}$$

Alors :

$$\hat{p} = L\left(\frac{di_a}{dt}i_a + \frac{di_b}{dt}i_b + \frac{di_c}{dt}i_c\right) + v_{dc}(S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \quad \text{(IV.43)}$$

Les premières parties des deux expressions représentées précédemment présentent la puissance dans les inductances de ligne, notant ici que les résistances internes de ces inductances sont négligeables car la puissance active dissipée dans ces résistances est en fait beaucoup plus faible devant la puissance mise en jeu. Les autres parties représentent la puissance dans le convertisseur. [BOU-10]

D'après les expressions IV.36 et IV.43, la puissance change instantanément en fonction des ordres de commutation du convertisseur.

III.3.2 Estimation de la tension :

Le secteur de travail de la tension de ligne est nécessaire, pour déterminer les ordres de commutation. De plus il est important d'estimer la tension de ligne correctement, même avec l'existence des harmoniques, sa donne un facteur de puissance élevé.

La chute de tension aux bornes de l'inductance peut être calculée en dérivant le courant. Donc, la tension peut être calculée en additionnant la tension de référence à l'entrée du convertisseur avec la chute de tension déjà calculée.

En revanche, cette approche à un inconvénient qui est la dérivée du courant, où les bruits seront amplifiés. Pour éviter cet inconvénient une estimation de tension basée sur le calcul des puissances peut être appliquée. [ABD-97]

.L'expression suivante (IV.44) donne les courants de ligne i_a, i_b, i_c dans les coordonnées stationnaires _ β .

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.44)}$$

On peut écrire les expressions des puissances active et réactive comme suit :

$$\hat{p} = \underline{v}_{(abc)} . \underline{i}_{(abc)} = \underline{v}_\alpha . \underline{i}_\alpha - \underline{v}_\beta . \underline{i}_\beta \quad \text{(IV.45)}$$

$$\hat{q} = \underline{v}_{(abc)} \wedge \underline{i}_{(abc)} = \underline{v}_\alpha . \underline{i}_\beta - \underline{v}_\beta . \underline{i}_\alpha \quad \text{(IV.46)}$$

L'écriture matricielle des expressions (IV.45) et (IV.46) est :

$$\begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{(IV.47)}$$

L'équation matricielle (IV.47) peut être réécrite, en fonction du courant de ligne (mesuré) et la puissance (estimée), comme suit :

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha \\ \hat{v}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix} \quad \text{(IV.48)}$$

La transformée inverse de Concordia des tensions de ligne s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_a \\ \hat{v}_b \\ \hat{v}_c \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha \\ \hat{v}_\beta \end{bmatrix} \quad \text{(IV.49)}$$

IV.3.3 Régulateurs à hystérésis :

Le schéma de principe de la figure (Figure .IV.7) donne deux régulateurs à hystérésis à deux niveaux. Pour réaliser le réglage des puissances active et réactive. L'un est influencé par l'erreur $\Delta p = p_{ref} - p$ pour la puissance active. L'autre est influencé par l'erreur $\Delta q = q_{ref} - q$ pour la puissance réactive. [FAI-12]

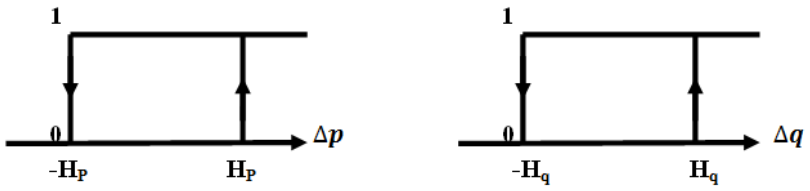


Fig. IV.7 : Caractéristique des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.

Les larges de la bande d'hystérésis ont une influence sur la performance du redresseur en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence moyenne de commutation.

Le régulateur à hystérésis à deux niveaux pour la puissance instantanée active peut être décrit comme:

$$\boldsymbol{S_p} \begin{cases} 1 \ (pour & \hat{p} < \hat{p}_{ref} - H_p \\ 0 \ (pour & \hat{p} > \hat{p}_{ref} + H_p \end{cases} \boldsymbol{et} \ \boldsymbol{S_q} \begin{cases} 1 \ (pour & \hat{q} < \hat{q}_{ref} - H_q \\ 0 \ (pour & \hat{q} > \hat{q}_{ref} + H_q \end{cases}$$

Où H_p, H_q sont les écarts des régulateurs à d'hystérésis à deux niveaux.

IV.3.4 Table de commutation :

Les signaux numériques d'erreurs S_p et S_q , et le secteur de travail sont les entres de la table de commutation (Tableau IV.1), où les états de commutations S_a, S_b, S_c du redresseur à *MLI* sont mémorisés.

S_P	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
0	0	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
	1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1
1	0	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5
	1	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3

En employant la table, l'état optimum de commutation du convertisseur peut être choisi à chaque état de commutation selon la combinaison des signaux numériques S_p et $S_q$le numéro du secteur, c'est-à-dire, que le choix de l'état optimum de commutation est effectué de sorte que l'erreur de la puissance active puisse être restreinte dans une bande à hystérésis de largeur $2H_p$, et de même pour l'erreur de la puissance réactive, avec une bande de largeur**.** [Bou10]

Tableau IV.1 : Table de commutation douze secteurs de la commande DPC.

IV.3.5 Détermination du secteur :

La connaissance du secteur de la tension estimée est nécessaire pour déterminer les états de commutation optimale. Pour cela, le plan de travail *(α, β)* est divisé en douze secteurs (Figure.IV.8), ces derniers peuvent être déterminés par la relation suivante. [Ben]

$$(n-2)\frac{\pi}{6} \leq \theta n \leq (n-1)\frac{\pi}{6} \qquad \text{(IV.50)}$$

n= 1,2, ...,12.

Où : *n :* est le numéro du secteur.

Le numéro du secteur est déterminé instantanément par la position de vecteur tension donné par:

$$\theta_n = Arctg\left(\frac{\hat{v}_s}{\hat{v}_s}\right) \qquad \text{(IV.51)}$$

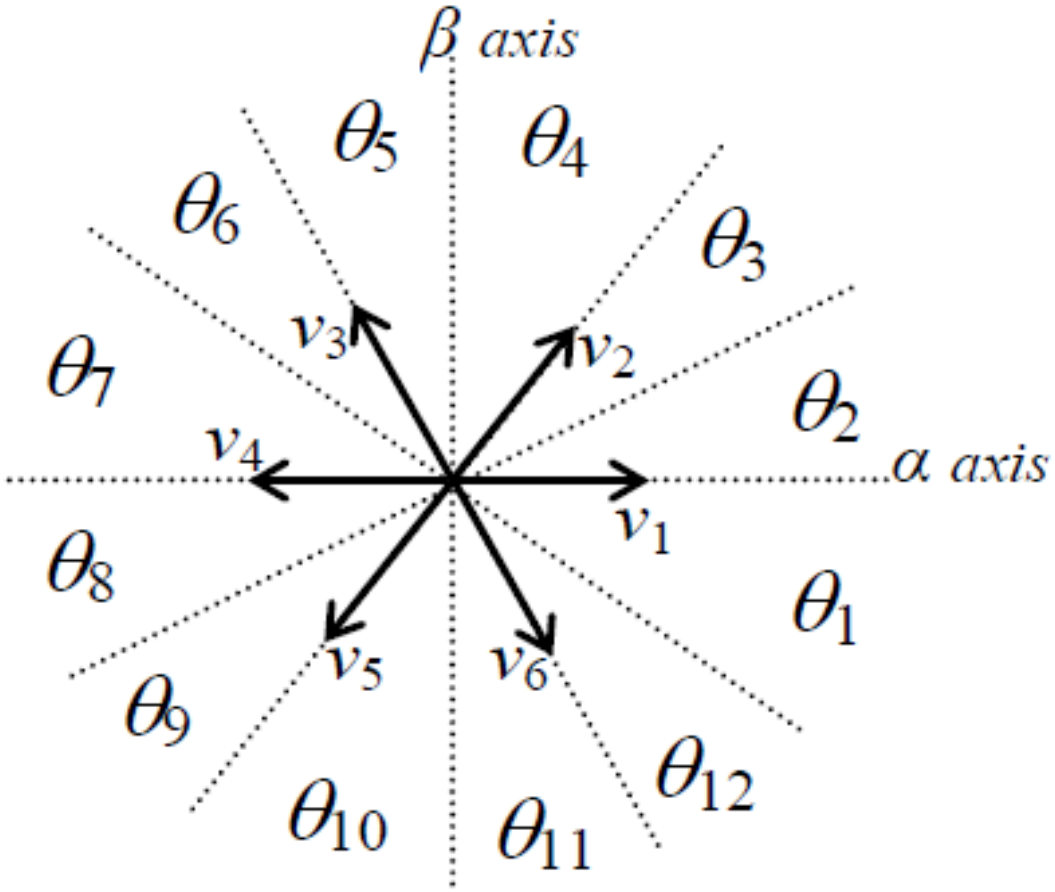


Figure. IV.8 : Le plan vectoriel divisé en douze secteurs.

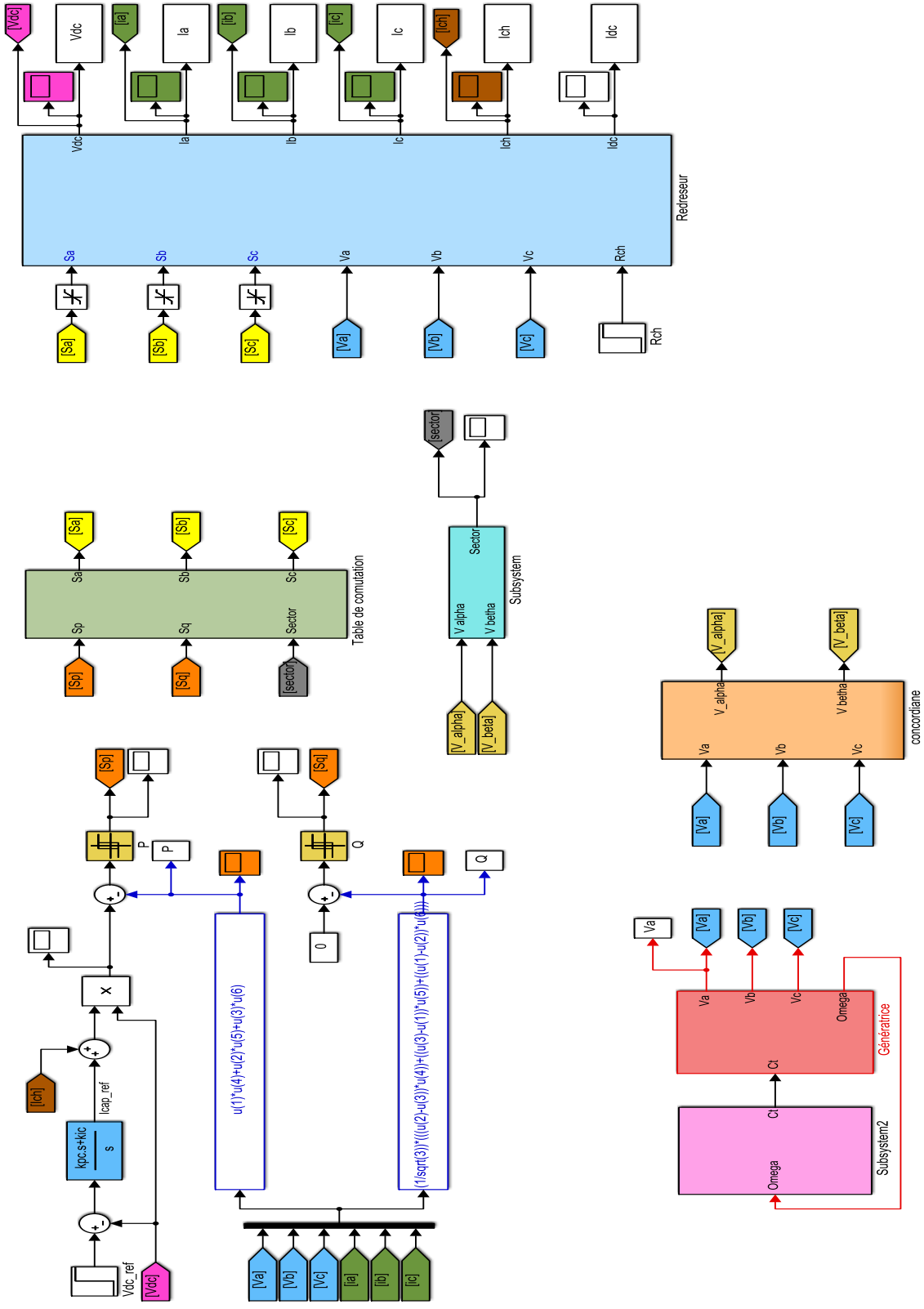


Figure.IV.9: Schéma bloc de la commande DPC.

IV.4 Résultats de simulation DPC douze secteurs :

La Figure (Figure.IV.9) montre la réponse du redresseur commandé par la commande *DPC*

lors d'un changement de la référence de la tension de sortie de $V_{dc\,ref}$= 220V à $V_{dc\,ref}$ = 260 à (0.5) $t\ s$ = et un échelon de puissance réactive (Q_{ref}= 0 VAR).

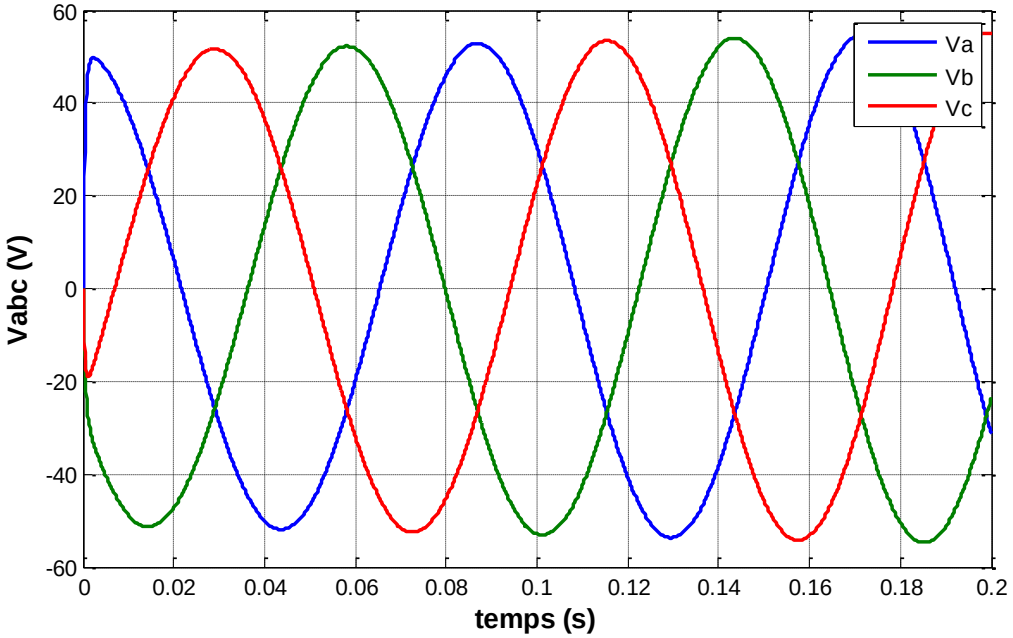


Figure. IV.10.a : Tensions statoriques V_{abc}

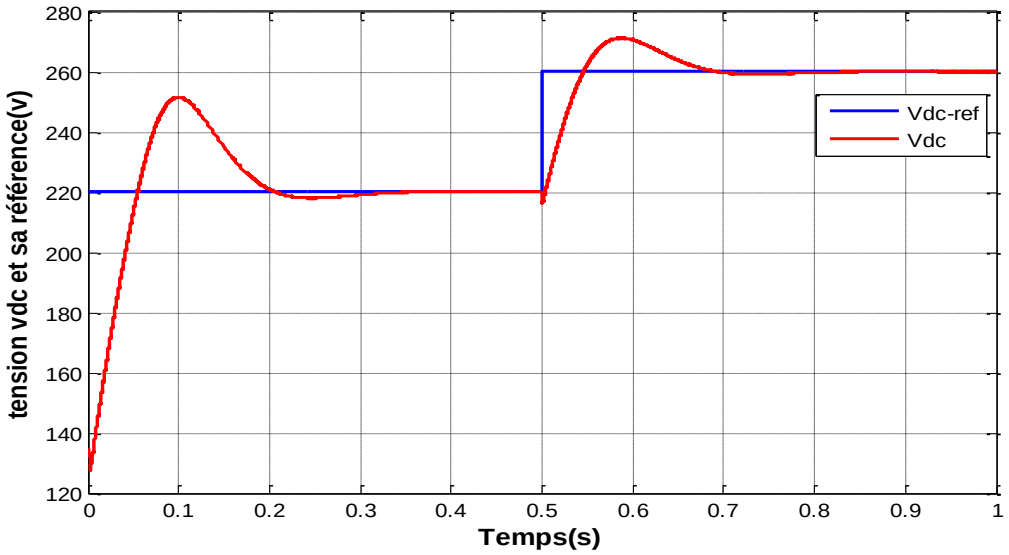


Figure. IV.10.b : l'allure de tension V_{dc} et sa référence.

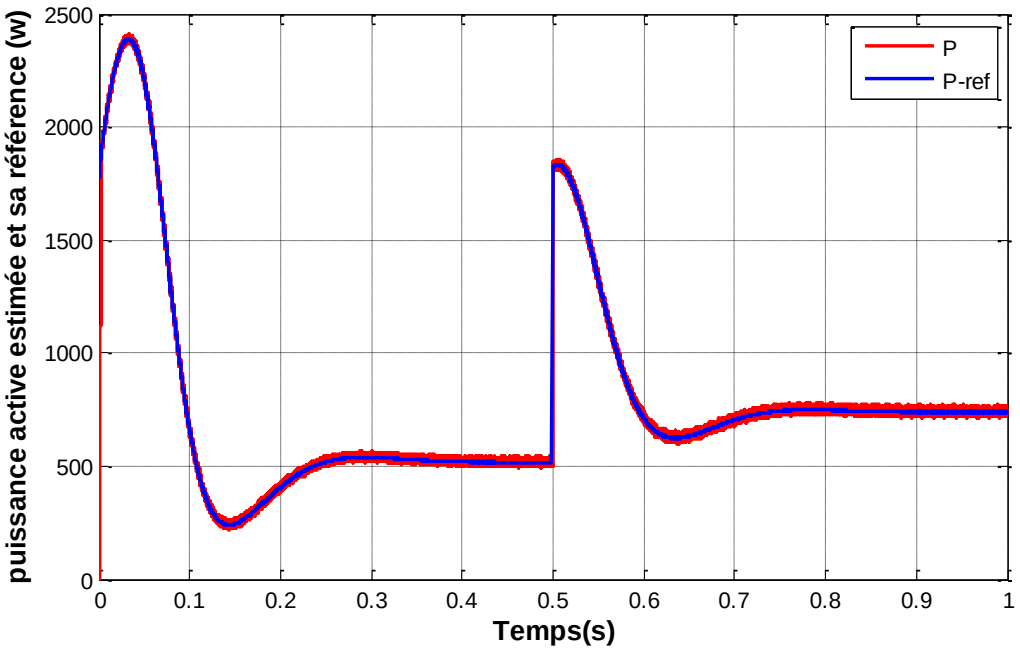


Fig. IV.10.c : L'allure de puissance active estimée et sa référence.

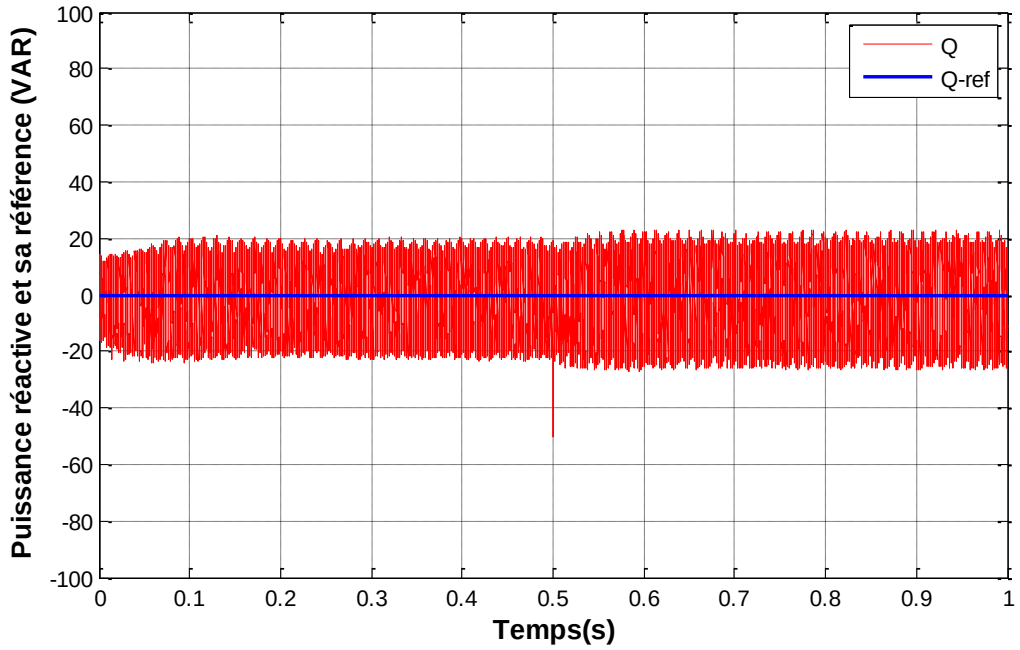


Figure. IV.10.d : L'allure de puissance réactive estimée et sa référence.

Fig. IV.10 : Performances du redresseur commandé par *DPC* (douze secteur) lors d'une variation de la tension de référence

IV.4.1 Interprétations des résultats :

Les résultats des figures (Figure.IV.9) montrent les résultats de simulation de la *DPC* sous un facteur de puissance unitaire, lors d'un changement de la tension de référence de la sortie, en remarque sur la figure (Figure.IV.9.a) la tension et la fréquence de *GSAP* est (V_{abc}=53 V et f=50H),a(t = 0 à 0.3sec) en remarque sur la figure (Figure.IV.9.b) il, y un perturbation de la signale produite par la démarrage de la *GSAP* ,mais a (t =0.3 à 0.5sec), en remarque que la tension continue atteint sa valeur de référence($V_{dc} = 220v$), et les puissances instantanées (p.q.) suivi la puissance de référence (P=520 W), et (q=20VAR), a(t = 0.5 à 0.7sec) il y a un perturbation produite par la changement de la tension de référence , a(t = 0.7 à 1 sec) la tension V_{dc} suivi la tension de référence, a la figure (Figure.IV.9.c) et figure (Figure.IV.9.d) on peut noter que les puissances instantanées (p , q) sont suivi et contrôlées à leurs références (p=750W), la tension et le courant du *GSAP* sont en phase, ainsi que les courants des lignes sont sinusoïdaux.

IV.5 Conclusions :

Dans ce chapitre, pour améliore la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques, nous proposé une configuration de la commande directe de puissance classique appliquée pour un redresseur triphasée à deux niveaux raccordé avec une *GSAP*, et alimenté une charge résistive.. Ensuite, nous avons présenté stratégies de commande *DPC*. En premier, en faire la modélisation de la parte puissance le redresseur *à MLI*. En dernier, évaluer la commande *DPC* proposée et nous présentons des résultats de simulation. Les résultats obtenus ont montré les bonnes performances dynamiques de cette commande (*DPC*) sous différents condition : facteur de puissance unitaire, échelon de tension, perturbation au niveau de l'alimentation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master 2 en commandes electriques , nous avons choisi de travailler sur le thème de la production et conversion de l'énergie éolienne. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaine de conversion éolienne constituée d'une turbine eolienne associée à une génératrice synchrone à aimants permanents. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers la charge à alimenter. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les différentes éolienne utilisées dans

L'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Après les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé le vent qui est la source principale d'énergie. Nous avons ensuite modélisé la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Quelques résultats de simulation ont été ensuite donnés.

Le chapitre trois a été consacré à la génératrice synchrone à aimants permanents. Nous avons donné des exemples sur des machines différentes du point de vue structurel avant de donner les équations électriques, magnétiques et mécanique régissant la MSAP

La troisième partie de ce travail, a été consacrée à l'étude de ce nouveau contrôle proposé. Cette structure de commande, appelée commande directe de puissance (DPC), est basée sur le contrôle direct des puissances active et réactive instantanées. Cette technique de contrôle des convertisseurs AC/DC sans capteur repose sur l'estimation de la tension de ligne. En utilisant la DPC, on peut contrôler l'échange d'énergie entre le redresseur et le réseau électrique donc on peut travailler avec un facteur de puissance unitaire en imposant la puissance réactive à une valeur nulle. Après une modélisation de l'ensemble du système de puissance avec ces commandes, nous avons mis au point un modèle de simulation de l'ensemble du système (puissance, commande) avec le logiciel MATLAB (SIMULINK).

Bibliographie

Bibliographie

[ABD-07] **A. Abdini, A. Nasiri,** « PMSG Wind Turbine Performances Analysis During Short Circuit s », IEEE Canada Electrical Conference, pp.165, 2007.

[ABD-97] **R. Abdessemed, M. Kadjoudj,** « Modélisation des Machines Electriques », Presses de l'Université de Batna, 1997.

[AIM-05] **S. El Aimani**, << Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension >>, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.

[ANN-10] **A. Annane,** « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable », mémoire magister en Electromécanique, Universite Badji Mokhtar Annaba, 2010

[BEN-] **S. Bengana,** « Stratégie de contrôle de puissance d'un redresseur PWM Triphasé »,
mémoire de master en Electronique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.

[BOU-05] **S. Bouchakour, «** Commande Directe de Puissance d'un Convertisseur AC/DC
Triphasé Sans Capteurs de Tension », mémoire de magister en Electrotechnique, Ecole Militaire Poly Technique, Alger, 2005.

[BOU-10] **A. Bouafia, F. Krim, J. Gaubert,** « Predictive direct power control of three-phase pulse width modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM) », IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 1,pp. 1945–1955, 2010.

[BOY-06] **A.oyette,** << Contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne >>, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré,B.Nancy I, 2006.

[CAM-03] **H. Camblong,** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des

aérogénérateurs a vitesse variable », thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, France, 2003.

[CRA-03] **M.Crappe,**«Commande et régulation des réseaux électriques >>, Lavoisier, 2003.

[COU-08] **V. Courtesuisse**, «supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique» thèse de doctorat en génie électrique, Ecole nationale d'Arts en métiers, Paris, France, 2008.

[DIO-18] **D. Fatou**, '' Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents''. Mémoire d master électrotechnique juin2018.

[ERN-85] **J. Ernst et W. Leonhard**, << Optimisation of wind energy output of variable wind speed turbine >>, Wind power 85, San Francisco, CA, 1985.

[FAI-12] **K. Fairouz,** « Centrale Eolienne et Qualite de L'energie Electrique », thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2012

[GEN-05] [**Gen05**]**T. Ghennam,** « Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP », mémoire de magistère en Génie Électrique, Ecole Militaire Polytechnique, Alger, 2005.

[GRI-06] **T. Grinoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion,** « Eoliennes en milieu urbain -Etat de l'art », Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies, Actualisation (P.SALVI), PP. 1-129, France ,2006.

[HAM-13] **S.HAMECHA , E.BOUREKACHE** « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents »,Mémoire de Magister Université de Tizi Ouzou 2013

[HAS-17] **H. Hassani ,A. Belbali** « commande direct de puissance (DPC) de la (GSAP) intégré dans un système éolien » mémoire de master en électrotechnique université de Adrar.2017.

[KED-14] [**Ked14**]**B. Keddari, Y. Kot,** « Modélisation et Simulation d'un Convertisseur AC/DC triphasé », mémoire de master en Génie Électrique, Université d'EL-Oued, 2014.

Bibliographie

[LAT-12] **M. LATRECHE Tahar** « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien », 2012

[LAV-05] **N. Laverdure,** « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », thèse de doctorat, Génie Electrique, l'INPG, France, 2005.

[LEC-] **P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi,** << Eolienne >>, Techniques de l'Ingénieur, BM 4640.

[MUL-] **B. Multon, G. robin, M. Ruellan et H. Ben Ahmed,** « Situation énergétique

[LOU-16] **F.LOUAR** « Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », 2016

[MEL-09] **R. Melicio, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalao**, << Computer simulation of wind power systems: Power Electronics and Transient Stability Analysis >>, International Conference on Power System Transients (IPST 2009), Kyoto, Japan, Juin 3-6, 2009

[MIR-05] **A. Mirecki,** << Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance >>, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.

[MOU-14] **A. Moualdia,** Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », mémoire de magister en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2014.

[NIC-05] **N. Laverdure**, << Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires >>, Thèse de Doctorat, l'INPG, Génie Electrique, 2005.

[NOG-98] **T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, I. Takahashi,** « Direct power control of PWM converter
without power-source voltage sensors », IEEE Trans. Ind. Application, vol.34, pp. 473–479,
1998.

[ROB-06] **B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse,** << Impacte de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité d'énergie >>, J3eA, Vol.5-Hors

série I, 2006.

[SAB-06] **J-C. Sabonnadiére,** << Nouvelles technologies de l'énergie 1 >>, Lavoisier, 2006.

[SEN-08] **T. Senjyu, N. Nakasone, A. Yona, A. Saber, T. Funabashi, H.Sekine,** << Operation strategies for stability of gearless wind power generation systems >>, IEEE conference, Power and Energy Society General Meeting, Convertion and Delivery of Electrical Energy in the 21^{ct} Century , pp 1-7 , 2008.

[STU-00] **G. Sturzer, E. Smigiel,** << Modélisation et commande des machines triphasées >>, Edition Ellipse, Mars 2000

[YIN-07] **M. Yin, G. Li, M. Zhou, C .Zhao,** « Modeling of the wind turbine with à permanent magnet synchronous generator for integration », Power Engineering Society General Meeting, IEEE, pp 1-6. 2007.

[ART-] **Article_Paris_final** « Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection de l'énergie offshore dans un réseau Matlab /Simulink

ANNEXE

ANNEXE :

Tab. 1 : Paramètres de GSAP :

Paramètres	**Valeur**
Résistance statorique	R_s= 0.895 [Ω]
Inductance direct statorique	L_d= 0.012 [H]
Inductance quadrature statorique	L_q= 0.0211 [H]
Flux d'aiment	φ_f = 0.9 [Wb]
Nombre de pair de pole	3
Inertie Totale	J = 0.00141 [Kg.m^2]
Force de frottement	f= 0 Nm/rad.s

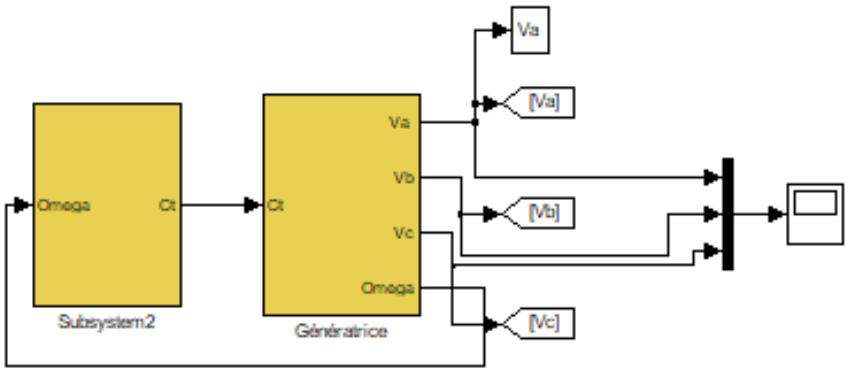
Tab. 2 : Paramètres de la turbine éolienne :

Paramètres	**Valeur**
Rayon de la turbine	5.5 m
Air densité	$\rho =$ 1.22 kg/m^2
L'angle de calage	2°
Le ratio de vitesse	$\lambda = 20.5$

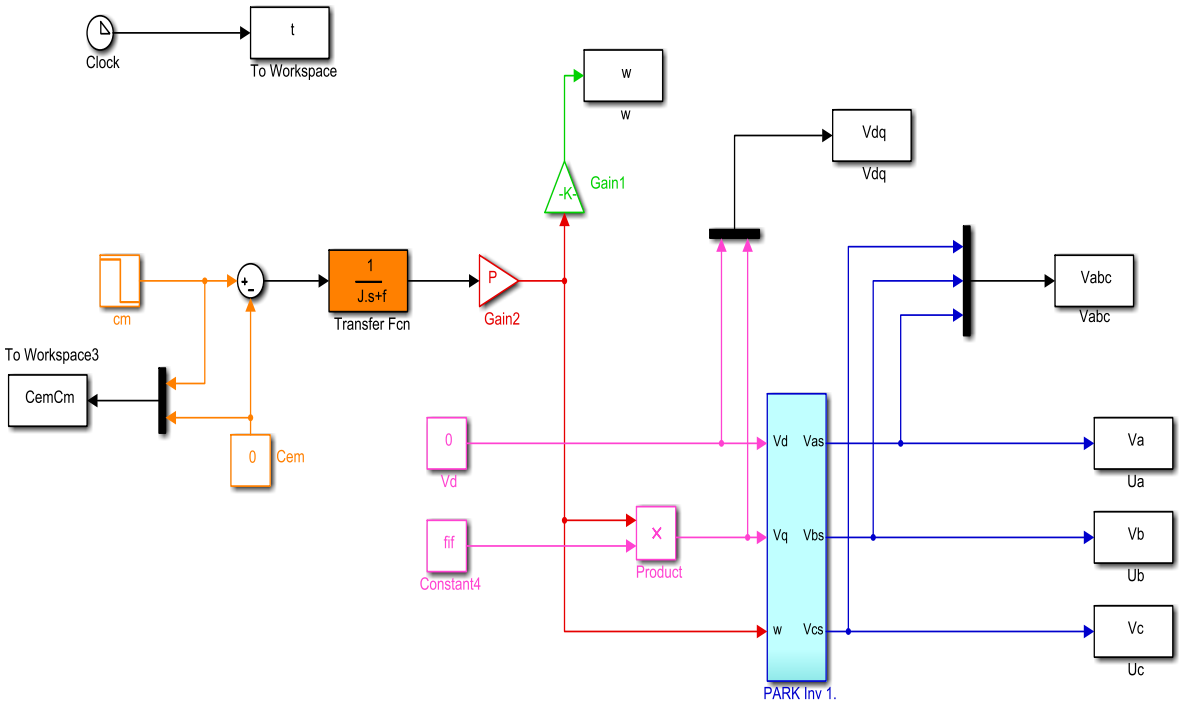
Tab.3 : Paramètres électriques du circuit de puissance (Paramètre du redresseur) **:**

Paramètres	**Valeur**
R : Résistance de la ligne	0.7 [Ω]
L : Inductance de la ligne	0.01 [H]
C : capacité de filtrage	0.0033 [F]
R_{ch} : Résistance de la charge	100 [Ω]
V_{dc}: Tension continue de référence	220 – 260 [V]

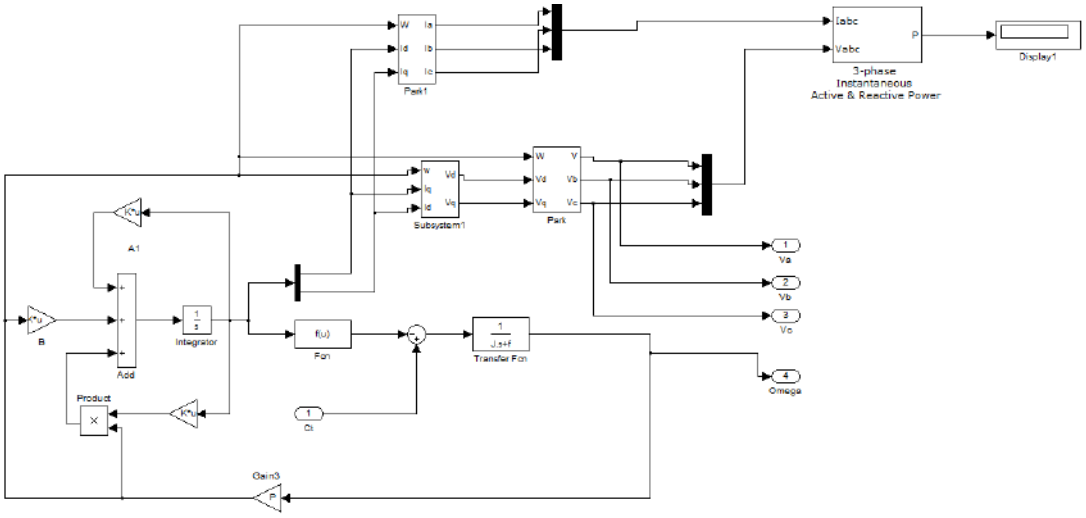
I. Bloc de simulation globale de système éolien :



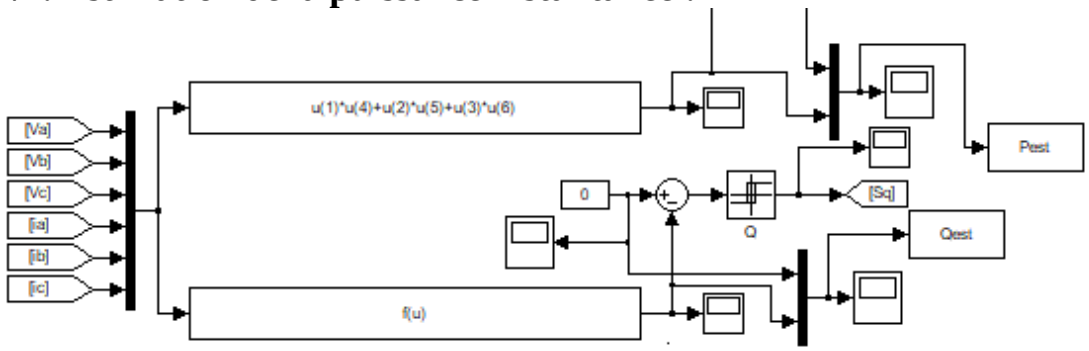
II. Bloc de simulation de GSAP à vide :



III. Bloc de simulation de GSAP en charge:



VI. Estimation de la puissance instantanée :



VII. Estimation de la tension de ligne :

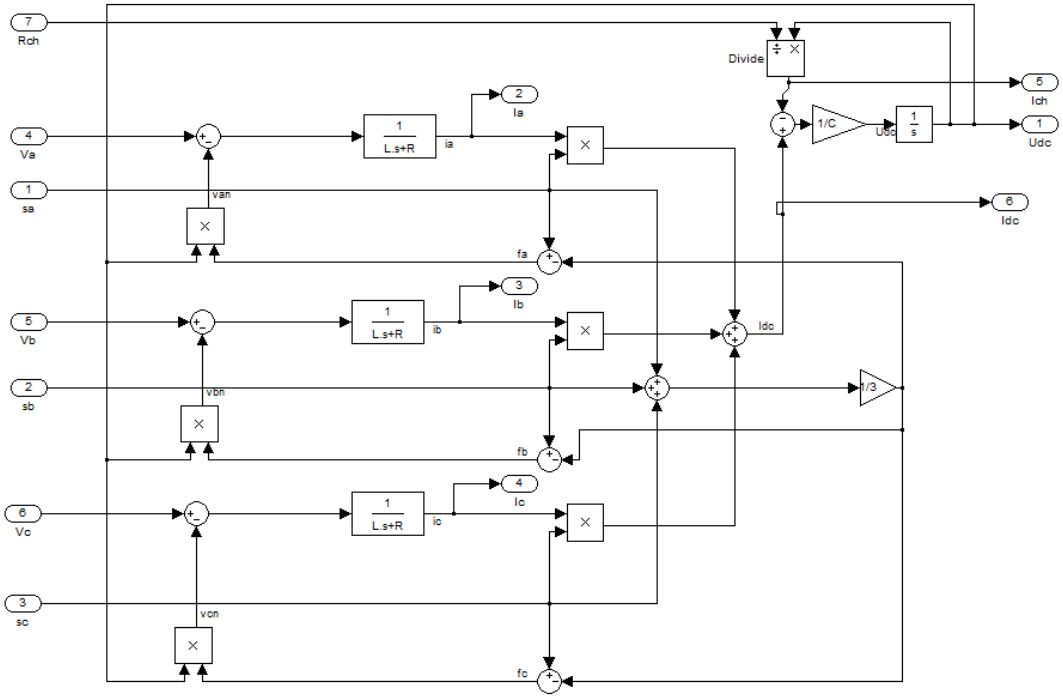
Fonction de transfert en boucle interne :

$$G_{boi}(p) = \frac{i_{res}}{v_s - v_c} = \frac{1}{r(1 + T_n.p)} \quad avec\ T_n = \frac{l}{r}$$

Fonction de transfert en boucle externe :

$$G_{boe}(p) = \frac{V_{dc}(p)}{i_{dc}(p)} = \frac{R_{ch}}{r(1 + T_c.p)} \quad avec\ T_c = R_{ch}.c$$

VIII. Modèle de simulation du redresseur à MLI :



VIII. Schéma bloc de la commande DPC :

