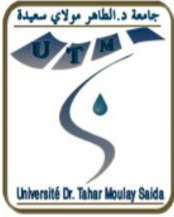


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIEL

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

**Commande d'une génératrice synchrone à aimants
permanents intégré dans un système éolien.**

Présenté par :

**Labras Abdelkrim
Laradj Youcef**

Devant le jury composé de :

Dr. A.YOUCF

Dr. K. BELGACEM

Dr. T. MOHAMMED CHIKOUCHE

Président

Encadreur

Examineur

Promotion 2019-2020

Remerciement

Nous remercions avant tout le bon dieu de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce modeste travail.

*Nous remercions également notre encadreur Dr. **KH. BELGACEM** qui a accepté de nous encadrer et pour les efforts et le temps qu'il nous a consacré, Il nous beaucoup aidés par ses conseils, son expérience et ses encouragements.*

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu nous honorer de leur présence pour juger notre travail.

Notre reconnaissance va également à nos enseignants de la spécialité(M.E.I) pour leurs honorables taches durant notre période des études.

Merci, a tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour accomplir ce travail.

Sommaire

Tables des matières

Remerciements.....	
Table des matières.....	i
Liste des symboles	v
Liste des figures	x
Introduction générale.....	1

Chapitre I : ***Etat de l'art sur la conversion éolienne***

I.1.introduction.....	4
I.2.Du moulin à vent à l'éolienne d'aujourd'hui.....	4
<i>I.2.1.Un peu d'histoire.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.2.Premier pas vers 1ère des éoliennes.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.3.Retour à l'éolien : une source de l'énergie de demain.....</i>	<i>6</i>
1.3. Développement de l'énergie éolienne.....	7
I.4.Gisement éolien en Algérie.....	8
<i>I.4.1.Atlas de la vitesse du vent</i>	<i>9</i>
<i>I.4.2. Atlas de la vitesse moyenne saisonnière du vent</i>	<i>10</i>
<i>I.4.3.L'Energie éolienne en Algérie.....</i>	<i>11</i>
I.5.Définition d'un système éolien.....	12
I.6.Descriptif et qualités de l'énergie éolienne	13
<i>I.6.1. Définition de l'énergie éolienne.....</i>	<i>13</i>
<i>I.6.2. Principaux composants d'une éolienne.....</i>	<i>13</i>

I.6.3. Emplacement des parcs éoliens.....	15
I.6.4. Taille des aérogénérateurs.....	16
I.7. Les différents types d'éoliennes.....	17
I.7.1. Eolienne à axe vertical (VAWT).....	17
I.7.1.1. Avantages.....	18
I.7.1.2. Inconvénients.....	18
I.7.2. Eolienne à axe horizontal	19
I.7.2.1. Avantages.....	19
I.7.2.2. Inconvénients.....	19
I.8. Types de fonctionnement des éoliennes	20
I.8.1. Les éoliennes à vitesse fixe.....	20
I.8.1.1. Avantages.....	22
I.8.1.2. Inconvénients.....	22
I.8.2. Les éoliennes à vitesse variable	23
I.8.2.1. Intérêt de la vitesse variable.....	23
I.8.2.2. Eoliennes à vitesse variable commandées par le stator.....	25
I.9. Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne....	28
I.9.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	28
I.9.2. Systèmes utilisant la machine synchrone.....	28
I.10. Conclusion.....	29

Chapitre II

Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents(MSAP)

II.1. Introduction.....	30
II.2. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents.....	30
<i>II.2.1. Avantages et inconvénients de la MSAP.....</i>	<i>32</i>
<i>II.2.1.1 Avantages</i>	<i>32</i>
<i>II.2.1.2. Inconvénients.....</i>	<i>32</i>
II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	32
<i>II.3.1. Hypothèses simplificatrices.....</i>	<i>33</i>
<i>II.3.2. Représentation de la GSAP dans le système triphasé</i>	<i>33</i>
<i>II.3.3. Equations de la machine synchrone à aimants permanents.....</i>	<i>34</i>
<i>II.3.3.1. Equation électrique de la GSAP.....</i>	<i>34</i>
<i>II.4.3.2. Equation mécanique.....</i>	<i>36</i>
<i>II.3.4. Transforme de PARK.....</i>	<i>36</i>
<i>II.3.5. Modélisation biphasée de la GSAP.....</i>	<i>38</i>
<i>II.3.5.1. Choix de repère de Park</i>	<i>38</i>
<i>II.3.5.2.Equations électriques.....</i>	<i>38</i>
<i>II.3.5.3.Equations magnétiques.....</i>	<i>39</i>
<i>II.3.5.4 Equation du couple électromagnétique.....</i>	<i>40</i>
<i>II.3.5.5.Modélisation de la GSAP relie avec une charge.....</i>	<i>41</i>
<i>II.3.5.6. Modèle d'état de PARK.....</i>	<i>42</i>
<i>II.3.6.Simulation de la GSAP.....</i>	<i>43</i>

II.3.6.1 Simulation de la GSAP à vide.....	43
II.3.6.2. Résultats de simulation à vide.....	44
II.3.6.3. Simulation de la GSAP en charge.....	46
II.3.6.4. Résultats de simulation en charge.....	46
II.4. L'association GSAP – convertisseurs statiques – charge.....	48
II.4.1. Topologies des convertisseurs.....	48
II.4.2. Modélisation du convertisseur alternatif – continu.....	49
II.4.2.1. Structure avec redresseur à MLI.....	49
II.4.2.2. Le filtre passe bas.....	50
II.4.2.3. Modélisation de l'onduleur de tension.....	51
II.4.2.4. Modélisation mathématique de l'onduleur de tension triphasé.....	52
II.4.3. La commande M.L.I.....	54
II.5. Modélisation de la turbine.....	56
II.5.1. Modélisation de la vitesse du vent.....	56
II.5.1.1. Principe physique du vent.....	56
II.5.2. Modélisation de la turbine.....	57
II.5.2.1 Modèle mécanique de la turbine	57
II.5.2.2 Modèle énergétique de la turbine.....	58
II.5.2.3. Modèle du multiplicateur.....	60
II.5.2.4. Equation dynamique de l'arbre de la génératrice.....	60
II.6. Chaîne de conversion éolienne.....	61
II.6.1. La chaîne éolienne globale.....	61
II.7. Conclusion.....	62

Chapitre III

Régulation des puissances statoriques active et réactive

III.1. Introduction.....	63
III.2.La commande vectorielle.....	63
<i>III.2.1. Principe générale de la commande vectorielle.....</i>	<i>64</i>
III.3. Contrôle de la liaison au réseau électrique.....	64
<i>III.3.1. Contrôle des courants injecté au réseau électrique.....</i>	<i>65</i>
<i>III.3.2.Réglage des puissances.....</i>	<i>67</i>
<i>III.3.3. Synthèse des correcteurs.....</i>	<i>70</i>
<i>III.3.4.Schéma bloc de Contrôle de la liaison au réseau électrique.....</i>	<i>72</i>
<i>III.3.5.Simulation sur Matlab/Simulink de contrôle des puissances de la liaison au</i> <i>Réseau électrique sons régulation de puissance active.....</i>	<i>73</i>
<i>III.3.5.1.Bloc de simulation.....</i>	<i>73</i>
<i>III.3.5.2.Résultats de simulation.....</i>	<i>73</i>
<i>III.3.6. Relation entre les puissances de référence et la tension de bus continu...75</i>	
<i>III.3.7.Simulation sur Matlab/Simulink de contrôle des puissances de la liaison au</i> <i>Réseau électrique.....</i>	<i>78</i>
<i>III.3.7.1.Bloc de simulation.....</i>	<i>78</i>
<i>III.3.7.2.Résultats de simulation.....</i>	<i>78</i>
III.4.Conclusion.....	80
Annexes	

Table des notations et Symboles

Glossaire

1. En Français:

Acronyme	Signification
MSAP	M achine S ynchrone à A imants P ermanents ;
MADA	M achine A synchrone à D ouble A limentation ;
MAS	M achine A synchrone ;
MS	M achine S ynchrone à A imants P ermanents ;
GSAP	G énératrice S ynchrone à A imants P ermanents ;
MLI	M odulation de L argeur d' I mpulsion;
PI	P roportionnel et I ntégral;
BC	B us C ontinu ;

2. En Anglais :

Acronyme	Signification
DC	D irect C urrent ;
AC	A lternating C urrent ;
IGBT	I nsulated G ate B ipolar T ransistor ;
MOSFET	M etal O xide S emiconductor F ield E ffect T ransistor ;
GTO	G ate- T urn- O ff T hystors ;
PLL	P hase L ocked L oop ;

Table des notations et symboles

Paramètres de modélisation de la machine :

R_s	(Ω)	Résistance statorique par phase ;
L_s	(H)	Inductance propre statorique,
L_d	(H)	Inductance sur l'axe direct ;
L_q	(H)	Inductance sur l'axe quadrature ;
M	(H)	Inductances mutuelles entre les phases statorique ;
ϕ_s	(wb)	Vecteur des flux statoriques ;
p	($-$)	Nombre de paires de pôles ;
J	($kg \cdot m^2$)	Moment d'inertie de la partie tournante ;
C_{em}	($N \cdot m$)	Couple électromagnétique ;
C_r	($N \cdot m$)	Couple résistant ;
p_e	(W)	Puissances au niveau de stator

Repère :

$(\vec{a}, \vec{b}, \vec{c})$	Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statoriques ;
$(\vec{d}, \vec{q})$	Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme) ;
(θ)	(rd) Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d) ;

Grandeurs électriques au stator :

v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	(V)	Tensions statoriques triphasées ;
$V_{s,abc}$	(V)	Vecteur des tensions statoriques triphasées ;
v_{ds}, v_{qs}	(A)	Tensions statoriques diphasées dans le repère (d, q) ;
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	(A)	Courants statoriques triphasés ;
$I_{s,abc}$	(A)	Vecteur des courants statoriques triphasés ;

i_{ds}, i_{qs}	(A)	Courants statoriques diphasés dans le repère (d, q) ;
$I_{s,dq}$	(A)	Vecteur des courants statoriques diphasés dans le repère (d, q) ;

Grandeurs magnétiques :

$\phi_{as}, \phi_{bs}, \phi_{cs}$	(wb)	Fux magnétiques au stator ;
$\Phi_{s,abc}$	(wb)	Vecteur de flux magnétiques au stator ;
Φ_{ds}, ϕ_{qs}	(wb)	Flux statoriques diphasés dans le repère (d, q) ;
$\phi_{s,dq}$	(wb)	Vecteur de flux statoriques diphasés dans le repère (d, q) ;
ϕ_f	(wb)	Fux magnétique aimant permanent ;

Grandeurs mécaniques :

ω	(rd / s)	Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation ;
Ω	(tr / m)	Vitesse mécanique de rotation $\Omega = \omega / p$;

Transformations

p	(-)	Opérateur de Laplace ;
P	(-)	Transformation de Park : $X_{abc} \rightarrow X_{dq}$;

Paramètres de modélisation de la ligne de connexion au réseau électrique :

R_l	(Ω)	Résistance de la ligne de connexion ;
L_l	(H)	Inductance de la ligne de connexion ;
ω_S	(rd / s)	Pulsation électrique correspondante aux tensions de réseau ;

Grandeurs électriques de la ligne de connexion au réseau électrique :

$v_{abc,res}$	(V)	Tensions de la ligne triphasée ;
$i_{abc,l}$	(A)	Courants de la ligne triphasés ;
$v_{dq,res}$	(V)	Tensions de la ligne diphasées dans le repère (d, q) ;

$i_{dq,l}$	(A)	Courants de la ligne diphasée dans le repère (d, q) ;
$v_{abc,ond}$	(V)	Tensions de sortie de l'onduleur triphasé ;
$v_{dq,ond}$	(V)	Tensions de sortie de l'onduleur diphasées dans le repère (d, q) ;

Symboles spécifiques à la turbine :

v	(m / s)	Vitesse du vent ;
C_p	(–)	Coefficient de puissance ;
$E_{Cinétique}$	($N \cdot m$)	Energie cinétique de vent ;
ρ	(Kg / m^3)	Densité volumique l'air ;
P_v	(W)	Puissance du vent ;
S	(m^2)	Surface circulaire balayée par la turbine ;
$\Omega_{turbine}$	(rd / s)	Vitesse de la turbine ;
R	(m)	Longueur d'une pale ;
G	(–)	Gain du multiplicateur ;
λ	(–)	Rapport de vitesse ;
β	(deg)	Angle de calage ;
C_{aer}	($N \cdot m$)	Couple aérodynamique de la turbine ;
P_{aer}	($N \cdot m$)	Couple aérodynamique de la turbine ;

L'arbre de la génératrice :

Ω_{mec}	(rd / s)	Vitesse mécanique ;
C_g	($N \cdot m$)	Couple mécanique sur l'arbre de la GSAP ;
J_t	($kg \cdot m^2$)	Moment d'inertie totale ;
$J_{turbine}$	($kg \cdot m^2$)	Moment d'inertie de la turbine ;
J_g	($kg \cdot m^2$)	Moment d'inertie de la génératrice ;
C_{mec}	($N \cdot m$)	Couple mécanique ;
C_{vis}	($N \cdot m$)	Couple des frottements visqueux ;

f ($N.m \cdot s / rd$) Le coefficient dû aux frottements visqueux de la GSAP ;

Grandeurs de la commande :

P_l^*	(W)	Consignes ou valeur de référence de la puissance active injectée au réseau Électrique ;
Q_l^*	(VAR)	Consignes ou valeur de référence de la puissance réactive injectée au Réseau électrique ;
e_d, e_q	($-$)	Termes de couplage entre les axes (d) et (q) de la liaison au réseau Électrique ;
$i_{d,l}^*, i_{q,l}^*$	(A)	Termes de commande ou de contrôle entre les axes (d) et (q) de la Liaison au génératrice GSAP ;
$v_{d_ond}^*, v_{q_ond}^*$	(V)	Termes de commande ou de contrôle entre les axes (d) et (q) de la Liaison au réseau électrique ;
$K_{p_id,l}, K_{p_id,l}$	($-$)	Composantes proportionnelle/intégrale du correcteur PI du courant $i_{d,l}$;
$K_{p_iq,l}, K_{p_iq,l}$	($-$)	Composantes proportionnelle/intégrale du correcteur PI du courant $i_{q,l}$;

Listes des figures

Liste des Figures

Figures du chapitre I :

Figure (1-1) :	Ancêtres des moulins à vent (Deutsche Museum)	05
Figure (1-2) :	Première aérogénératrice de Poul La Cour en 1891 à Askov, Danemark,	06
Figure (1-3) :	Graphique de la capacité totale de puissance fournie par les éoliennes de 1996 à 2018 dans le monde (MW) Tirée de GWEC	07
Figure (1-4) :	Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol	09
Figure (1-5) :	Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol,	10
Figure (I-6) :	Conversion de l'énergie cinétique du vent.	12
Figure (1-7) :	Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW).	14
Figure (1-8) :	Les parcs éoliens onshores (a) et offshores (b).	16
Figure (1-9) :	Taille des hélices en m et puissance en MW.	17
Figure (1-10) :	L'aérogénérateur à axe vertical.	18
Figure (1-11) :	éolienne à axe horizontal.	19
Figure (1-12) :	Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone a 2 paires de pôles	20
Figure (1-13) :	Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.	22
Figure (1-14) :	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent	23
Figure (1-15) :	Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.	24
Figure (1-16) :	Eolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à cage.	26

Figure (1-17) :	Eolienne à vitesse variable à base d'une MADA	26
Figure (1-18) :	Eolienne à vitesse variable à base d'une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur.	27
Figure (1-19) :	Eolienne à vitesse variable à base d'une machine synchrone directement couplée à la turbine	27

Figures du chapitre II :

Figure (2-1) :	Photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques.	31
Figure (2-2) :	Représentation électrique de la GSAP.	33
Figure (2-3) :	Passage du système triphasé vers le système biphasé.	37
Figure (2-4) :	Représentation des enroulements fictifs d'axes 'd' et 'q'	39
Figure (2-5) :	Schéma représentatif de la GSAP alimentant appliqué sur une charge $\bar{Z}_{ch}$	41
Figure (2-6) :	Schéma bloc de simulation de la GSAP à vide	44
Figure (2-7) :	Couple moteur pour la GSAP à vide.	44
Figure (2-8) :	Résultats de simulation de la GSAP à vide.	45
Figure (2-9) :	Schéma bloc de simulation de la GSAP en charge.	46
Figure (2-10) :	Couple moteur pour la GSAP en charge.	46
Figure (2-11) :	Résultats de simulation de la GSAP en charge.	47
Figure (2-12) :	Exemple d'une éolienne à vitesses variables connectée au réseau via des convertisseurs statique.	48
Figure (2-13) :	Structure d'un redresseur triphasé à thyristors.	49
Figure (2-14) :	Représentation des tensions v_a v_B v_C et V_{DC} .	50

Figure (2-15) :	Schéma du filtre passif.	50
Figure (2-16) :	Schéma simplifié d'un onduleur de tension triphasé à MLI alimentant une charge triphasée.	51
Figure (2-17) :	Structure de base de l'onduleur à MLI sinus – triangle.	52
Figure (2-18) :	Exemple de chronogramme d'une commande «sinus-triangle» monophasée.	54
Figure (2-19) :	Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle	55
Figure (2-20) :	Profil de vent simulé	56
Figure (2-21) :	Système éolien.	57
Figure (2-22) :	Modèle mécanique de la turbine éolienne.	58
Figure (2-23) :	Le coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse λ et l'angle de calage β .	59
Figure (2-24) :	Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne.	61
Figure (2-25) :	Exemple d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne	62

Figures du chapitre III :

Figure (3-1) :	Equivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une GSAP	63
Figure (3-2) :	Exemple d'une éolienne à vitesses variables connectée au réseau via des convertisseurs statiques.	64
Figure (3-3) :	Schéma simplifié de la liaison de bus continu au réseau électrique.	65
Figure (3-4) :	Modèle simplifié des courants injectés au réseau dans le repère de Park	66

Figure (3-5) :	schéma block de contrôle des courants injectés au réseau électrique	67
Figure (3-6) :	Orientation de l'axe d sur la tension	68
Figure (3-7) :	schéma bloc de contrôle des courants injectés dans le réseau électrique.	69
Figure (3-8) :	Boucle de régulation en puissance du courant $i_{d,l}$	69
Figure (3-9) :	Boucle de régulation en puissance du courant $i_{q,l}$	69
Figure (3-10) :	Système à régulé par un correcteur PI	70
Figure (3-11) :	Schéma bloc de contrôle de la liaison au réseau électrique.	72
Figure (3-12) :	Schéma bloc de simulation de contrôle des puissances de la liaison au réseau électrique son régulation de puissance active.	73
Figure (3-13) :	Puissance active et réactive injectées au réseau électrique.	73
Figure (3-14) :	courants direct et en quadrature injectés au réseau électrique, et Courant réel injecté au réseau électrique	75
Figure (3-15) :	Schéma bloc présente la relation entre la puissance active de référence et la tension de bus continu	76
Figure (3-16) :	bloc de contrôle des puissances de la liaison au réseau électrique.	77
Figure (3-17) :	Schéma bloc de simulation de contrôle des puissances de la liaison au réseau électrique.	78
Figure (3-18) :	Puissance active et réactive injectées au réseau électrique.	79
Figure (3-19) :	Courant réel injecté au réseau électrique	79

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison entre éolienne à vitesse fixe et éolienne à vitesse variable

Tableau 3.1 : Paramètres du correcteur PI de courant $i_{d,1}$

Tableau 3.2 : Paramètres du correcteur PI de courant $i_{q,1}$

Tableau 3.3 : Paramètres du correcteur PI de puissance P_1^* .

Introduction générale

Introduction générale

Depuis les anciennes civilisations, l'Homme a découvert la notion de la force et il a compris qu'il peut puiser dans la nature pour s'en procurer afin de prospérer sur terre, et dompter les obstacles qu'il rencontre dans sa démarche quotidienne vers le progrès. Une de ces forces de la nature est le vent qui est appelée actuellement l'énergie éolienne.

L'Homme a très vite compris la manière de capter cette énergie et comment l'exploiter dans des systèmes simples pour moulinier les grains ou pomper l'eau. On trouve d'ailleurs des ancêtres d'éoliennes jusque dans la perce ancienne [01]. Mais il ne l'a utilisée comme source d'énergie électrique que vers les années quarante du siècle passé. Car jusqu'alors l'électricité était produite à partir des énergies fossiles, du géothermique et de l'hydraulique. Arriva ensuite le nucléaire pour remplacer les ressources traditionnelles déjà en épuisement avec un rendement très important mais des déchets radioactifs très dangereux, et surtout des risques néfastes pour l'environnement et les personnes en cas d'accident ou de séisme ou même d'attaque sur les sites concernés.

Avec l'augmentation de la pollution à cause de l'industrialisation croissante de la majorité des pays, et la surpopulation sur l'ensemble du globe, la demande sur l'énergie électrique est de plus en plus croissante et les sources d'énergie traditionnelles de moins en moins abondantes. L'Homme s'est alors orienté vers des énergies renouvelables mais surtout propres et sans danger.

De nos jours les efforts s'orientent tous vers le développement de la production de l'énergie solaire et éolienne soit à caractère local soit pour la production à grande échelle, suivant le potentiel du site exploité. Du fait de l'abondance de ces ressources et de leur caractère écologique (aucune émission de gaz ni déchets), elles sont considérées comme étant les énergies de l'avenir. Dans ce contexte notre travail va s'intéresser à la filière éolienne et aux outils de son exploitation et son développement.

La majorité des éoliennes installées étaient à vitesse fixe. Elles possèdent néanmoins de nombreux inconvénients : un faible rendement énergétique, dans la mesure où elles ne sont optimisées que pour un point de fonctionnement et une courte durée de vie à cause des efforts importants subis par leur structure. En outre, ces turbines génèrent des fluctuations considérables de la tension et de la puissance du réseau lors des rafales du vent [02].

Les éoliennes à vitesse variable ont été alors introduites pour apporter des solutions à ces problèmes. Les fluctuations de puissance peuvent être atténuées avec un dispositif qui permet des vitesses de rotation variables et par conséquent d'emmagasiner l'énergie des rafales sous forme d'énergie cinétique dans les grandes masses tournantes. Ainsi la production annuelle d'une éolienne à vitesse variable est accrue de 5% à 10% par rapport à une éolienne à vitesse fixe [03].

Parmi différents types de structures éoliennes, la génératrice synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, rend les systèmes à vitesse variables plus attractifs. Ce type de machines permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien. Contrairement à la machine asynchrone à double alimentation qui nécessite un multiplicateur mécanique [25].

La machine synchrone à aimants permanents est également caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible et de faibles inductances. Toutes ces caractéristiques offrent à la machine synchrone à aimants permanents des performances intéressantes, un rendement meilleur et meilleure contrôlabilité, ce qui fait d'elle une sérieuse concurrente de la machine asynchrone [25].

Objectif du mémoire

Notre travail s'inscrit dans le cadre des énergies renouvelables associées au domaine de génie électrique. L'objet de notre travail est de présenter un modèle global d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents basé sur une structure proposée, et des stratégies de contrôle permettant à la fois d'optimiser la puissance produite, et de contrôler les puissances transmises au réseau.

Structure du mémoire

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en trois chapitres : Dans le premier chapitre, nous allons présenter un état de l'art des systèmes éoliens. À commencer par quelques statistiques sur la production mondiale et la production des pays considérés comme de grands producteurs, sans oublier de parler du cas Algérien. Puis nous allons décrire les différents types d'éoliennes existantes et les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Un modèle de la GSAP a été établi et appliqué pour mode de fonctionnements (à vide et en charge) avec des résultats de simulation. Ensuite nous allons porter la modélisation et la simulation des convertisseurs et la chaîne de conversion éolienne complète en boucle ouverte basée sur une GSAP.

Le troisième chapitre traitera le réglage des puissances actives et réactive injectées au réseau électrique via un convertisseur à MLI DC/AC.

Enfin, le mémoire sera achevé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et quelques perspectives.

Chapitre I :

Etat de l'art sur la conversion éolienne

Sommaire

I.1.introduction.....	4
I.2.Du moulin à vent à l'éolienne d'aujourd'hui.....	4
<i>I.2.1.Un peu d'histoire.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.2.Premier pas vers 1ère des éoliennes.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2.3.Retour à l'éolien : une source de l'énergie de demain.....</i>	<i>6</i>
1.3. Développement de l'énergie éolienne.....	7
I.4.Gisement éolien en Algérie.....	8
<i>I.4.1.Atlas de la vitesse du vent</i>	<i>9</i>
<i>I.4.2. Atlas de la vitesse moyenne saisonnière du vent</i>	<i>10</i>
<i>I.4.3.L'Energie éolienne en Algérie.....</i>	<i>11</i>
I.5.Définition d'un système éolien.....	12
I.6.Descriptif et qualités de l'énergie éolienne	13
<i>I.6.1. Définition de l'énergie éolienne.....</i>	<i>13</i>
<i>I.6.2. Principaux composants d'une éolienne.....</i>	<i>13</i>
<i>I.6.3. Emplacement des parcs éoliens.....</i>	<i>15</i>
<i>I.6.4.Taille des aérogénérateurs.....</i>	<i>16</i>

I.7. Les différents types d'éoliennes.....	17
<i>I.7.1. Eolienne à axe vertical (VAWT).....</i>	<i>17</i>
<i>I.7.1.1. Avantages.....</i>	<i>18</i>
<i>I.7.1.2. Inconvénients.....</i>	<i>18</i>
<i>I.7.2. Eolienne à axe horizontal</i>	<i>19</i>
<i>I.7.2.1. Avantages.....</i>	<i>19</i>
<i>I.7.2.2. Inconvénients.....</i>	<i>19</i>
I.8. Types de fonctionnement des éoliennes	20
<i>I.8.1. Les éoliennes à vitesse fixe.....</i>	<i>20</i>
<i>I.8.1.1. Avantages.....</i>	<i>22</i>
<i>I.8.1.2. Inconvénients.....</i>	<i>22</i>
<i>I.8.2. Les éoliennes à vitesse variable</i>	<i>23</i>
<i>I.8.2.1. Intérêt de la vitesse variable.....</i>	<i>23</i>
<i>I.8.2.2. Eoliennes à vitesse variable commandées par le stator.....</i>	<i>25</i>
I.9. Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne....	28
<i>I.9.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone.....</i>	<i>28</i>
<i>I.9.2. Systèmes utilisant la machine synchrone.....</i>	<i>28</i>
I.10. Conclusion.....	29

I.1. Introduction

En raison des vents intermittents et variables, les éoliennes sont des sources d'énergie instables. Mais n'oublions pas que le vent est une source d'énergie renouvelable, gratuite et exploitée avec un bon niveau de sécurité et de respect de l'environnement. Dans le monde entier, les ressources d'énergie éolienne sont pratiquement illimitées. Les récentes recherches dans les domaines des turbines éoliennes à vitesse variable, l'électronique de puissance et les techniques de commandes avancées ont permis le contrôle des puissances produites par ces aérogénérateurs, ainsi tendent à rendre l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine traditionnelle.

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur l'énergie éolienne. Puis, nous décrivons les différents types d'aérogénérateurs couramment utilisés pour la conversion d'énergie éolienne que nous avons classifiés suivant leur mode de couplage au réseau.

I.2. Du moulin à vent à l'éolienne d'aujourd'hui

I.2.1. Un peu d'histoire

L'utilisation de l'énergie du vent pour effectuer un travail est une pratique aussi vieille que l'histoire. Il y a environ 5000 ans, les égyptiens furent les premiers à capter cette source d'énergie dans le domaine maritime. Ils s'en servirent pour déplacer de petites embarcations à l'aide d'une voile. Les chinois sont, à cette époque, les premiers à prendre la mer sur des radeaux de fortune.

Quant aux premières éoliennes, il faut remonter jusqu'à 4000 années en arrière pour en trouver la trace. C'est sous le règne d'Hammourabi, roi de Babylone, qu'apparurent les premiers systèmes d'irrigation entraînés par le vent et on utilisait déjà en Perse les premiers moulins à vent à axe vertical pour moudre du grain [04], des moulins à vent semblables et extrêmement primitifs ont survécu en Afghanistan jusqu'à nos jours comme le montre la figure (1-1). Petit à petit, cette technologie commença à faire son chemin vers toute l'Europe.

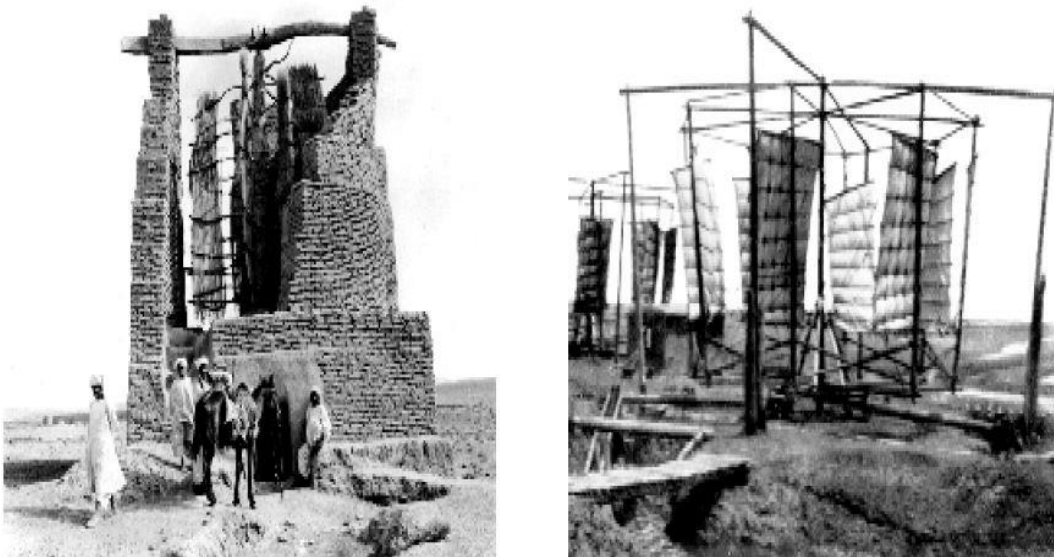


Figure (1-1) : Ancêtres des moulins à vent (Deutsche Museum) [05].

Bien que des éoliennes soient déjà présentes en occident bien avant le XIIe siècle, c'est à cette période qu'elles connurent un réel essor. On les appela « moulins à vent », car leur principale utilisation était de moudre le grain. Les moulins à vent servaient à drainer les champs aux Pays-Bas et à transporter de l'eau pour l'irrigation en France. En Amérique du Nord, dans les années 1800, des millions de moulins à vent furent construits pour pomper de l'eau destinée aux champs et à l'élevage, ce qui permit aux pionniers de s'installer sur les terres semi-arides de l'Ouest [05].

I.2.2. Premier pas vers 1ère des éoliennes

C'est le physicien et mathématicien Lord Kelvin qui eut le premier la brillante idée de coupler une génératrice électrique à un moulin à vent. Ce premier pas vers 1ère des aérogénérateurs modernes remonte à 1802. Mais les premières applications concluantes durent attendre un demi-siècle de plus, lorsque Zénobe Gramme inventa la dynamo. C'est en 1888 que la première éolienne reliée à un système de stockage du courant vit le jour.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il aura vendu 72 exemplaires en 1908[05].



Figure (1-2) : Première aérogénératrice de Poul La Cour en 1891 à Askov, Danemark,
[05]

1.2.3. Retour à l'éolien : une source de l'énergie de demain

Avec l'avènement des énergies fossiles, les éoliennes furent reléguées au second plan jusqu'à la crise pétrolière de 1973. Suite à la panique engendrée par les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979, qui déboucha sur la recherche d'énergies alternatives, un regain d'intérêt sans cesse grandissant se fit sentir pour l'éolien. Les principales motivations actuelles sont la hausse des prix des énergies fossiles et l'alternative au nucléaire. Étant donné que les ressources naturelles s'épuisent inexorablement et que les opinions publiques sont de plus en plus sensibilisées aux énergies renouvelables, il ne fait nul doute que l'éolien s'impose comme une énergie du futur.

Nous cherchons surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques : un fluide (ici : le vent) entraîne une turbine reliée mécaniquement à une machine électrique, appelée génératrice, qui va produire du courant. Ce mode de production est attractif du fait que [06] :

- L'énergie est propre et sans rejet atmosphérique;
- Elle est géographiquement diffuse;
- La source d'énergie (vent) est généralement plus importante en hiver.

Cependant il présente des inconvénients comme :

- Le captage et la conversion de l'énergie sont complexes;
- Les systèmes éoliens utilisent des matériaux coûteux;
- La source d'énergie (vent) est aléatoire.

I.3. Développement de l'énergie éolienne

Le développement de l'éolien s'inscrit dans le cadre de la promotion des énergies renouvelables, face aux dangers que représente à l'échelle planétaire le recours massif aux énergies fossiles. D'autre part, l'énergie éolienne bénéficie de façon générale d'une bonne image auprès du public malgré les oppositions locales qui naissent fréquemment autour des projets pour des motifs environnementaux.

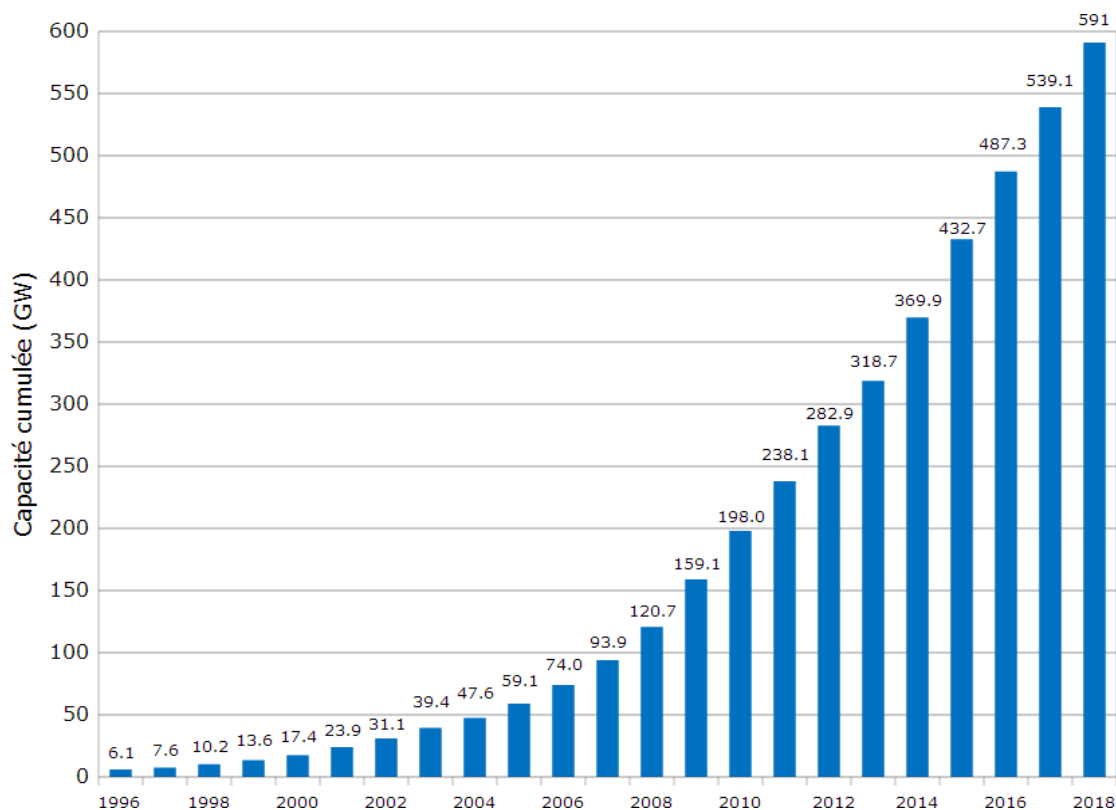


Figure (1-3) : Graphique de la capacité totale de puissance fournie par les éoliennes de 1996 à 2018 dans le monde (MW) Tirée de GWEC [07].

La puissance installée n'est pas un indicateur fiable pour les comparaisons entre les diverses filières énergétiques ou entre pays, car un MW utilisé en continu dans une centrale nucléaire, à charbon ou à gaz produit deux à cinq fois plus qu'un MW d'éoliennes, qui ne fonctionnent que lorsque le vent souffle suffisamment fort ; les pays qui n'utilisent pour

l'éolien que les sites les plus ventés, tels que les États-Unis, ont un ratio production/puissance installée deux fois plus élevé que ceux qui installent des éoliennes même sur des sites peu ventés, comme l'Allemagne ; les éoliennes offshore ont aussi un facteur de charge moyen deux fois plus élevé que celui des éoliennes terrestres ; enfin, certains pays tels que la Chine incluent dans leurs statistiques de puissance installée des éoliennes terminées mais non encore raccordées au réseau.

Selon le GWEC (Global Wind Energy Council - Conseil mondial de l'énergie éolienne), les nouvelles installations de 2018 ont atteint 51,3 GW, en recul de 4 % par rapport à 2017 ; ce recul a surtout affecté l'éolien terrestre : 46,8 GW (-4,5 %), alors que l'éolien en mer a progressé de 0,5 % à 4,5 GW, portant sa part à 8 %. Dans l'éolien terrestre, la Chine, marché leader depuis 2008, a installé 21,2 GW, loin devant les États-Unis (7,6 GW), l'Allemagne (2,4 GW), l'Inde (2,2 GW) et le Brésil (1,9 GW). La Chine a pris pour la première fois la tête des installations en mer avec 1,8 GW, devant le Royaume-Uni (1,3 GW). Le marché a progressé en Chine (+2,7 GW), aux États-Unis (+0,6 GW), au Mexique et dans la région Afrique-Moyen Orient, alors qu'il a baissé en Europe (-4,8 GW) et en Inde (-2,0 GW). La part de marché de la Chine en 2018 s'est élevée à 45 % à terre et 40 % en mer, celle des États-Unis à 16 % à terre, celle de l'Allemagne à 5 % à terre et 22 % en mer, celle du Royaume-Uni à 1 % à terre et 29 % en mer.

La puissance installée mondiale a atteint 591 GW, en progression de 9,4 %, dont 23 GW en mer (+20 %). La part de la Chine atteint 36 % à terre (États-Unis : 17 %, Allemagne : 9 %, Inde : 6 %) et 20 % en mer (Royaume-Uni : 34 %, Allemagne : 28 %). Voici l'historique des installations annuelles de 1996 à 2018. [07].

I.4. Gisement éolien en Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas ténien et l'atlas saharien, entre elles s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien 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, nous remarquons globalement que la vitesse moyenne est peu élevée.

On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia 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 [08].

I.4.1. Atlas de la vitesse du vent

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure (1-4). Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. Nous remarquons qu'à l'exception de la région côtière (moins Bejaia et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s. La région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s [09]. Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

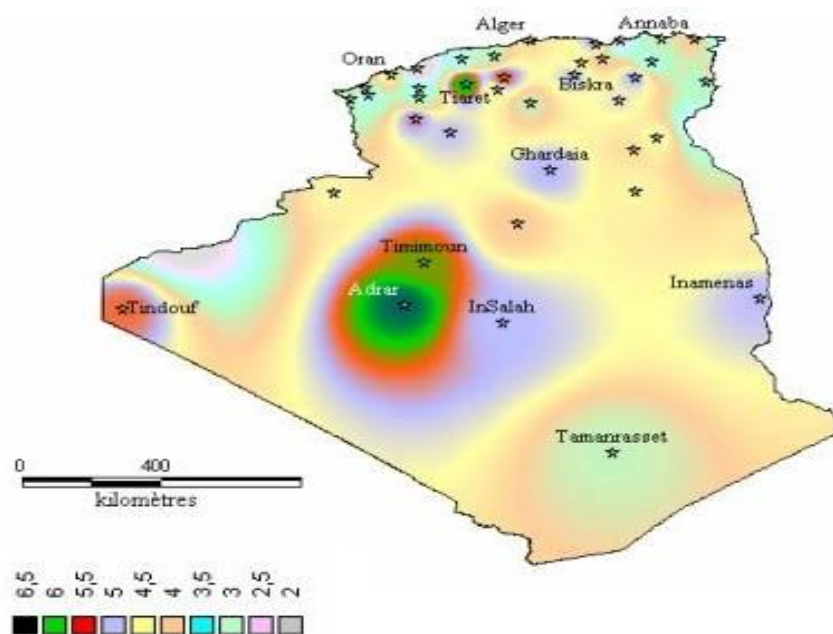


Figure (1-4) : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol, [09].

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.

I.4.2. Atlas de la vitesse moyenne saisonnière du vent

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figure (1-5) (Eté, Printemps, Hiver et Automne).

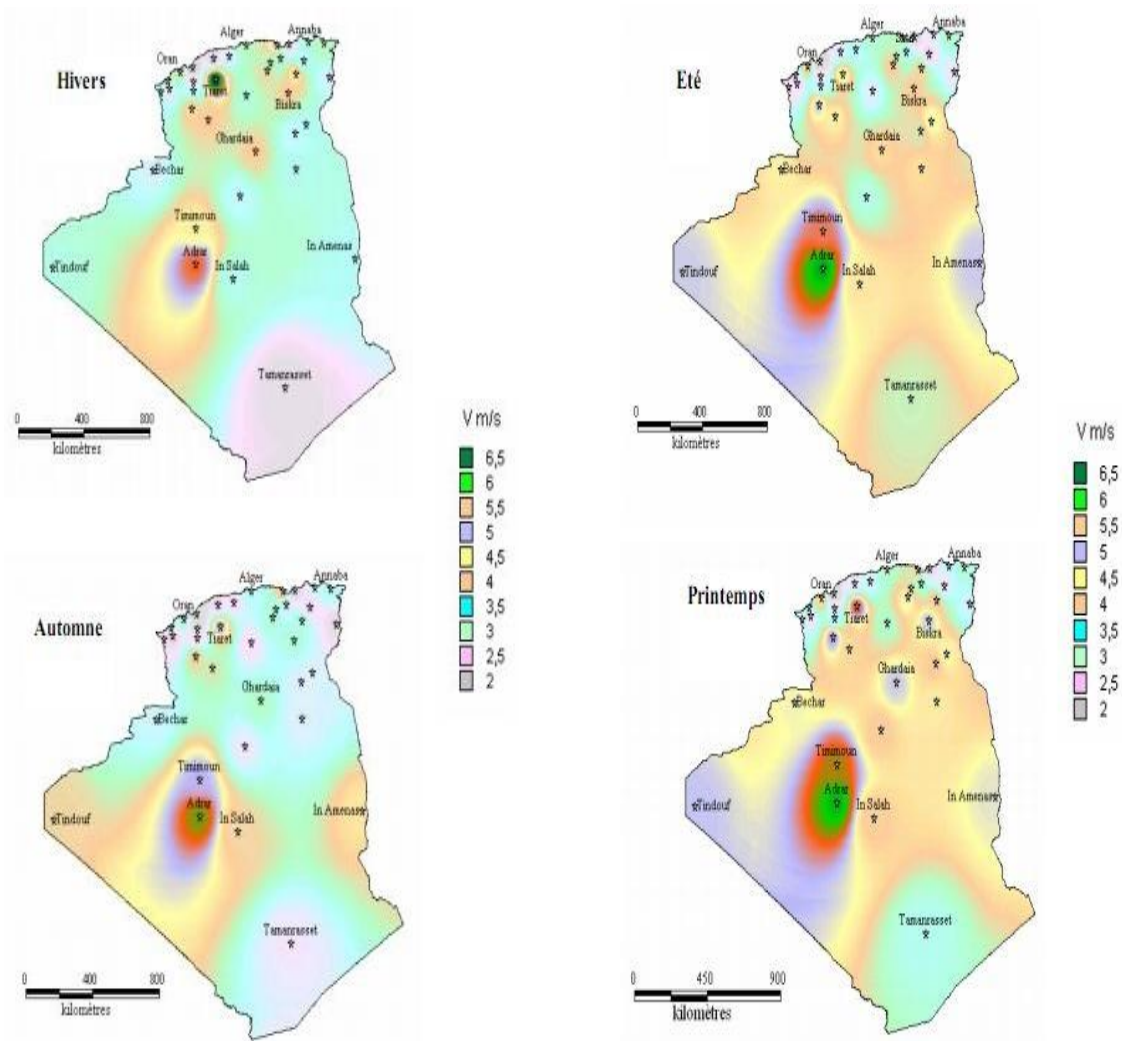


Figure (1-5) : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol, [09].

Nous remarquons qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année. Tous les atlas établis présentent la région sud-ouest, à savoir Adrar, Timimoune et In Salah comme la zone la plus ventée, à l'exception de l'atlas hivernal qui se distingue par le microclimat de Tiaret qui présente les vitesses de vent les plus élevées.

1.4.3. L'Énergie éolienne en Algérie

Le premier essai éolien en Algérie a été installé en date de 1957 en utilisant un aérogénérateur à Alger. Ce dernier était installé en Angleterre puis racheté et installé à Alger. D'autres installations ont été installées ailleurs en Algérie mais sans succès, les technologies éoliennes n'étant pas toujours très concluante. Cependant, ces technologies ont vu un essor considérable suite aux investissements qui lui ont été consacrés au lendemain du choc pétrolier de 1973. En effet, l'énergie éolienne est aujourd'hui plus fiable, plus importante et plus grande [10].

L'énergie éolienne en Algérie est encore insuffisante même si de nouveaux projets voient le jour notamment à Adrar (Ex: ferme éolienne à Adrar). Sept centrales seront ainsi installées d'ici 2030 selon le ministre des énergies. Outre la production d'électricité, l'autre fonction de l'énergie éolienne est le pompage d'eau, dont une installée à Adrar en 1953. Ainsi, 77 éoliennes de pompage ont été installées dans les Hauts plateaux de l'Algérie. Ces éoliennes de pompage peuvent être mécaniques ou électriques, même si l'électrique reste plus fiable. Pour se faire, la puissance du vent doit être plus importante et surtout plus constante. Selon le Européen Wind Energy le coût de l'électricité est plus cher si la disponibilité du vent est plus fiable. En ce qui concerne l'Algérie, les énergies renouvelables n'ont pas encore connu à l'heure actuelle le développement qui permettrait leur exploitation, malgré le gisement en énergies renouvelables dont dispose l'Algérie. Ceci constitue un atout majeur qui pourra être valorisé pour faire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique [10].

Heureusement, En 2011 une décision présidentielle sur l'orientation de l'Algérie vers les énergies renouvelables a été prise. De ce fait, un programme très ambitieux de développement de ces énergies renouvelables a été adopté récemment par le gouvernement en visant une contribution de ces énergies à hauteur de 40% de la production nationale d'électricité à l'horizon 2030. Dans ce contexte, 65 projets pour la période 2011/2020, dont 10 projets pour la seule phase pilote 2011-2013 ont été identifiés [10].

Ces projets seront menés dans le but de produire 22 000 MW à l'horizon 2030, dont 10 000 MW pourraient être dédiés à l'exportation.

L'Algérie vise ainsi l'investissement dans le domaine de la production électrique à partir de la filière éolienne pour atteindre 3% du bilan national à l'horizon 2027. Un premier pas a été fait par le groupe Sonelgaz, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français Vergnet. L'énergie produite par cette ferme, qui sera opérationnelle en 2014, sera injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar [11].

I.5. Définition d'un système éolien

Un aérogénérateur, plus communément est appelé éolien. Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, ce système connus sous l'appellation anglaise Wind Energy Conversion Systems (WECS), Figure (1-6). Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande). [12]

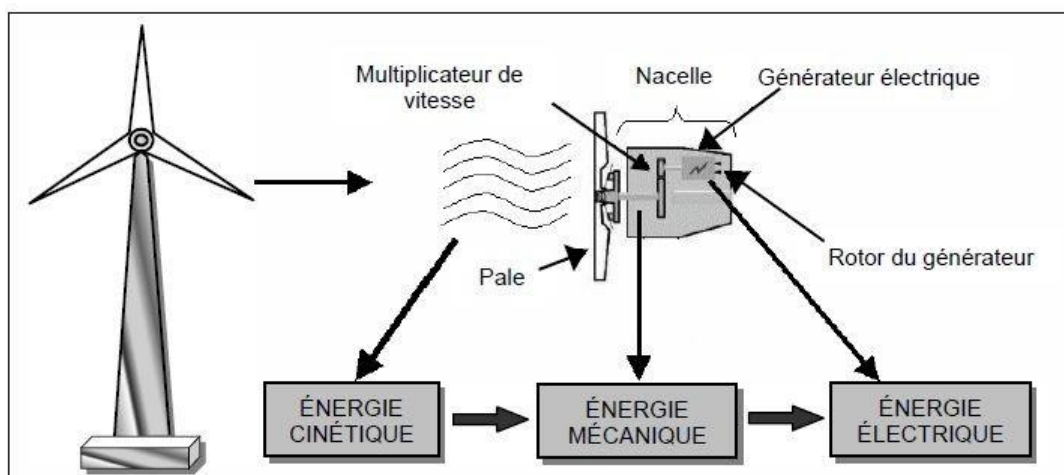


Figure (I-6) : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.6. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

I.6.1. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [13].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. [13]

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

I.6.2. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. Etant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut.

Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.

La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande. Tous ces éléments sont représentés sur la figure (1-7)

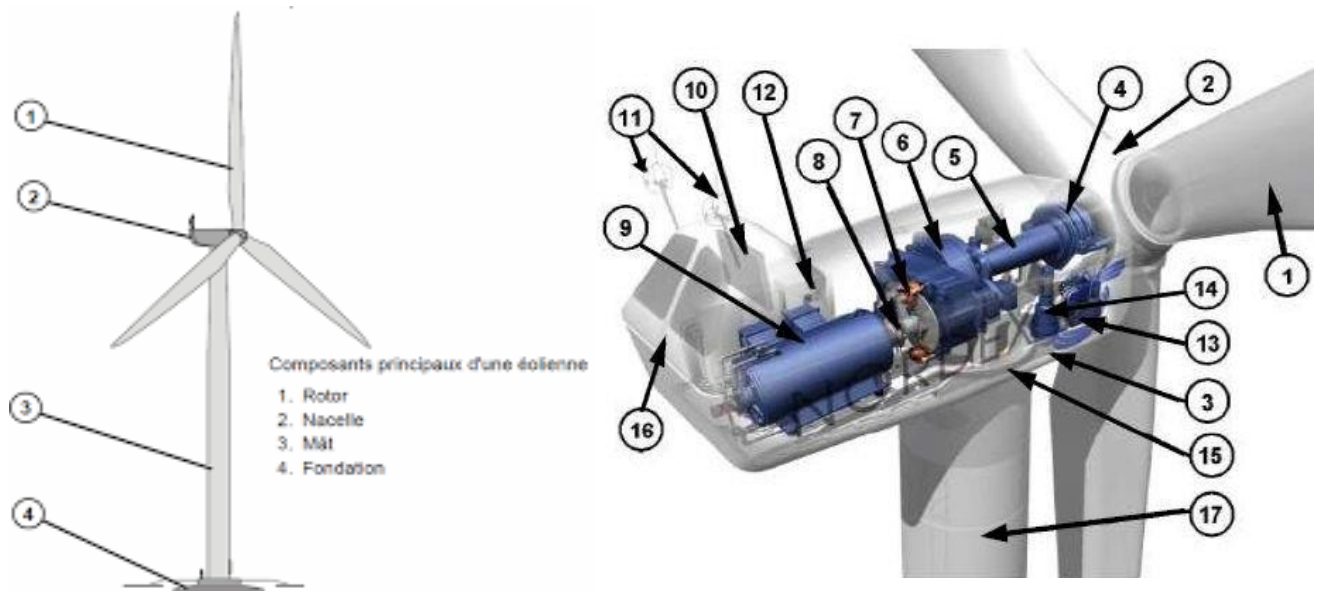


Figure (1-7) : Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW).

- 1 : Pales** en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique).
- 2 : Moyeu** du rotor en fonte.
- 3 : Structure de la turbine** en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4 : Paliers** du rotor à double rangée de billes.
- 5 : Arbre lent** du rotor en acier haute résistance.
- 6 : Multiplicateur** de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
- 7 : Frein à disque** sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
- 8 : Accouplement** avec la génératrice de type flexible.
- 9 : Génératrice** (800/2000 kW) asynchrone refroidie à l'eau.
- 10 : Radiateur de refroidissement** intégré au système multiplicateur-génératrice.
- 11 : Système de mesure de vent** (anémomètre et girouette).

12 : Système de contrôle surveille et pilote la turbine.

13 : Système hydraulique pour les freins d'extrémité de la pale et le système d'orientation.

14 : Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages.

15 : Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.

16 : Capot de la nacelle en structure acier recouvert de composite fibre de verre.

17 : Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

Le mât : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2.3 MW: diamètre de 90 m, mât de 80 m de hauteur).

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

Le rotor : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [14].

1.6.3. Emplacement des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en terme de vent mais il faut aussi tenir compte

de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits (540 MW offshore installés en Europe fin 2003). Ces derniers comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur la figure (1-8) [15].

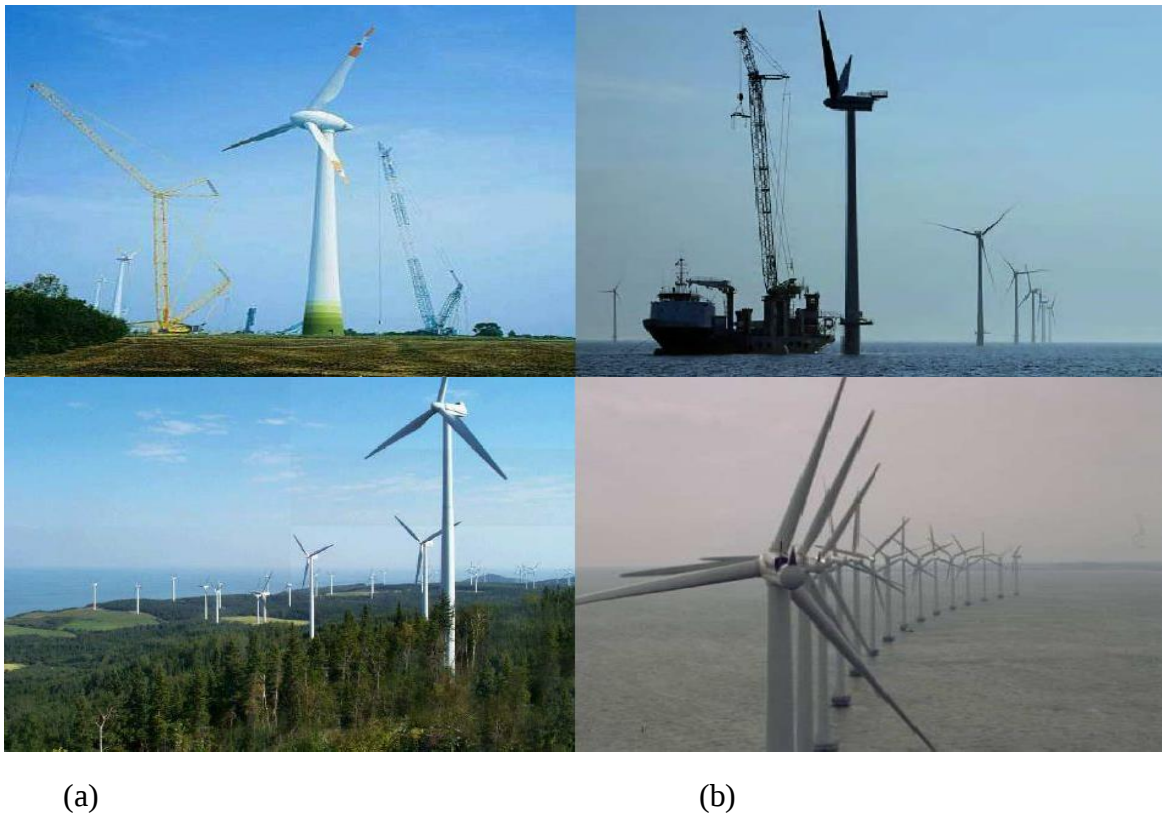


Figure (1-8) : Les parcs éoliens onshores (a) et offshore (b).

1.6.4. Taille des aérogénérateurs

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce que présente la figure (1.9). Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum.

Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

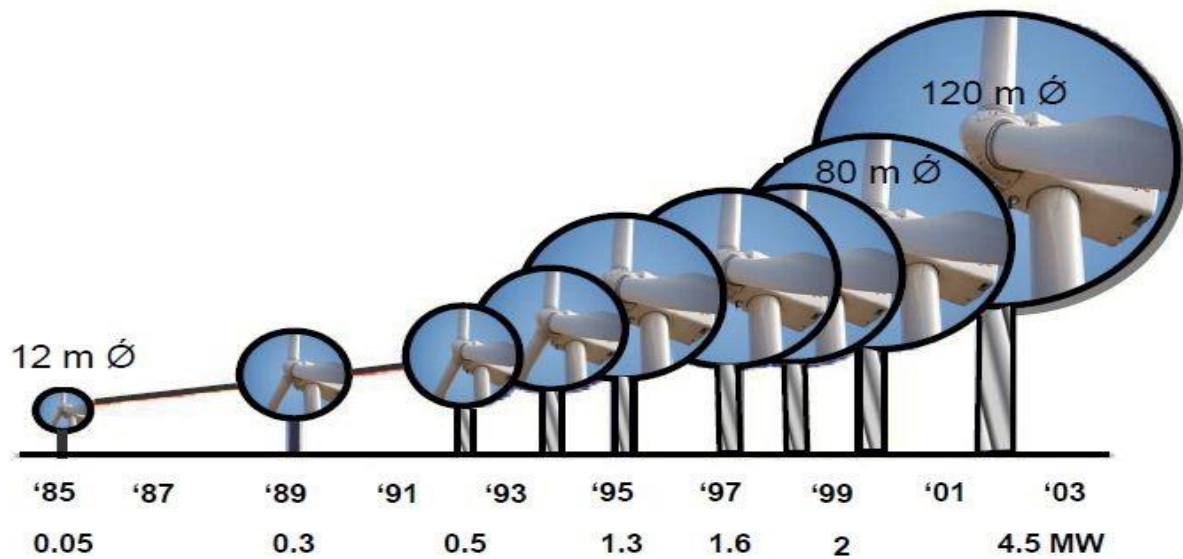


Figure (1.9) : Taille des hélices en m et puissance en MW [4].

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 mètres de diamètre. Cette hélice est perchée à plus de 100 mètres de hauteur pour produire jusqu'à 4.5 MW [15].

I.7. Les différents types d'éoliennes

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

I.7.1. Eolienne à axe vertical (VAWT)

Afin de diminuer la vitesse de rotation et de limiter le bruit et de capter le flux d'air dont la direction change de façon turbulente, on voit apparaître de petites éoliennes à axe vertical, de type Savonius, Darrieus ou H-type. Les turbines VAWT tournent en moyenne 2 à 6 fois moins vite qu'un tripale classique avec le même rayon. Ce type de turbine est aussi quelque fois une réponse à la question de l'esthétique, sans doute essentielle pour obtenir l'adhésion des riverains, en particulier en site urbain.



Figure (1-10) : L'aérogénérateur à axe vertical.

I.7.1.1. Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

I.7.1.2. Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus. L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la

fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée [08].

1.7.2. Éolienne à axe horizontal

C'est les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent.



Figure (1-11) : éolienne a axe horizontal

1.7.2.1. Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage de sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

1.7.2.2. Inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

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

Dans le reste de notre étude, nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales [08].

I.8. Types de fonctionnement des éoliennes

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure.

Les machines électriques synchrones et asynchrones constituent le cœur de l'éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable. Le fonctionnement de ces aérogénérateurs, qui présente quelques avantages, est influencé principalement par leurs configurations électriques [08].

I.8.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.

La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure (1-12) [16].

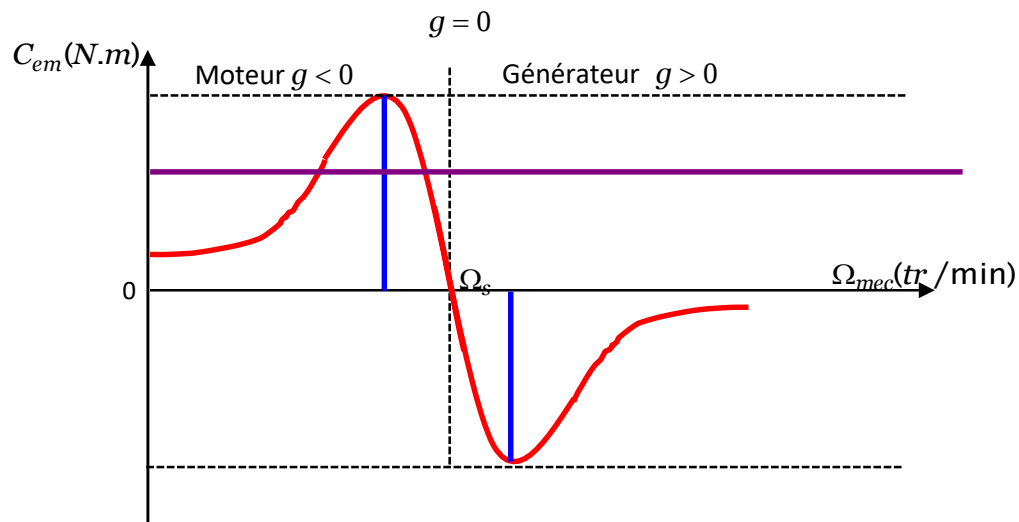


Figure (1-12) : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g = 0$). Le couple mécanique entraînant

(Produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique Ω_{mec} est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500tr / \text{min}$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau figure (1-13). La machine à un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%).

La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau.

Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure (1-13) qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

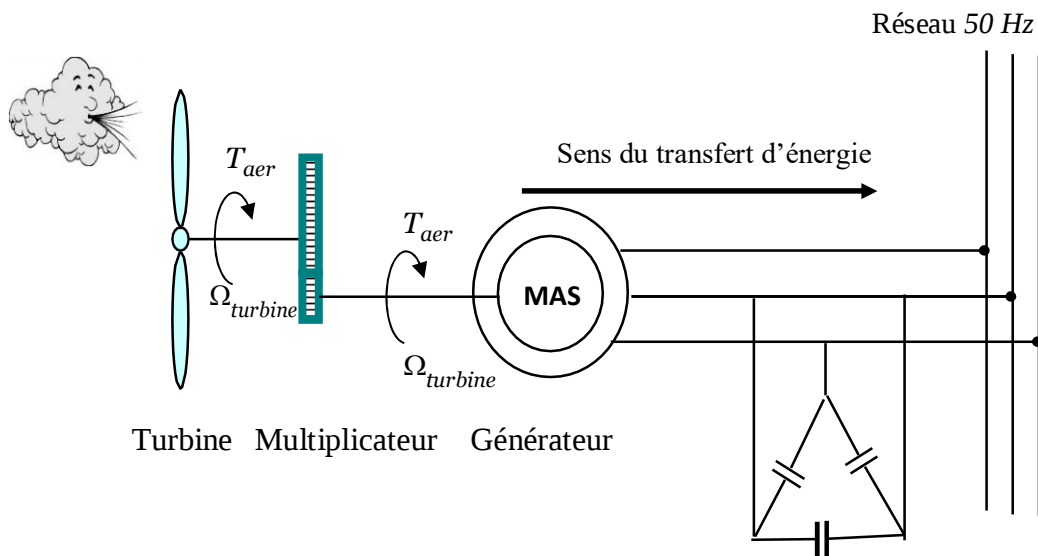


Figure (1-13) : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus, les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

1.8.1.1. Avantages

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Pas besoin de système électrique de commande.
- Moins chère.

1.8.1.2. Inconvénients

- Pas de gestion de la puissance extraite.
- Maintenance de la boîte de vitesse.

- Magnétisation de la machine non gérée.
- Fonctionnement à une plage de vitesse de vent très étroite, donc une production d'énergie très perturbée

Ces inconvénients ont poussé les industriels à développer d'autres systèmes plus performants et fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large.

I.8.2. Les éoliennes à vitesse variable

Elles peuvent fonctionner sur une plus large plage de vitesse de vent. On peut ainsi tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse du vent.

I.8.2.1. Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (1-14).

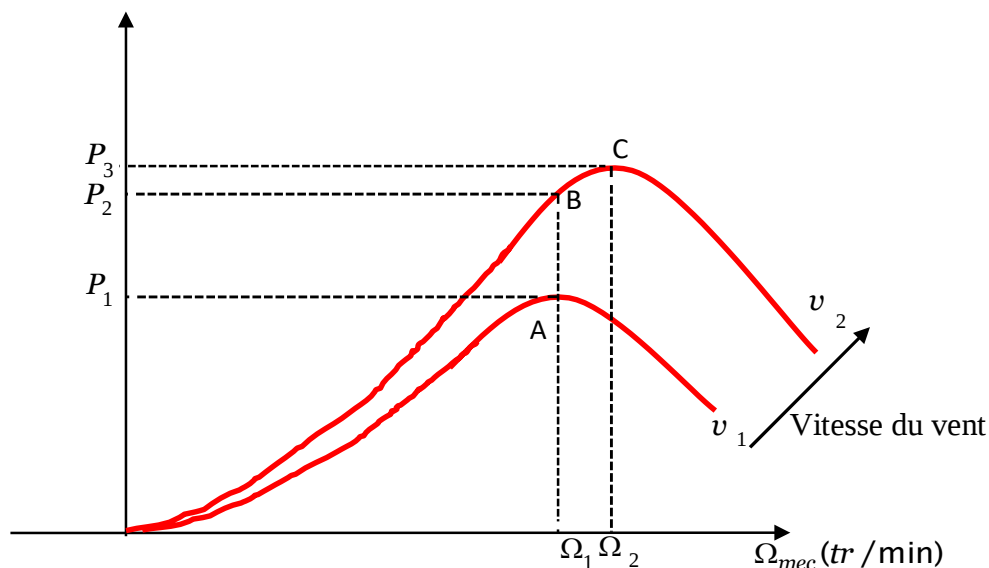


Figure (1-14) : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; nous obtenons une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 Et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve la 2^{ème} caractéristique (point B).

La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C).

Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite.

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée sur la figure (1-15). Trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées. La zone **(A)** correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance. La zone **(B)** correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer. La zone **(C)** correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale [11].

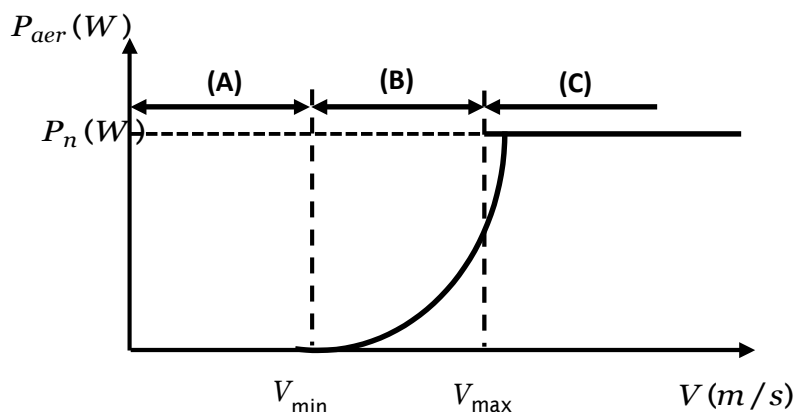


Figure (1-15) : Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent sous vitesse variable. Les avantages principaux des éoliennes à vitesse variable comparées à celles à vitesse fixe sont les suivants [17] :

- Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses

De vent où le maximum de puissance peut être aisément converti.

- Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale P_n .
- Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie.
- Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.

1.8.2.2. Éoliennes à vitesse variable commandées par le stator

Les machines électriques qui sont couramment utilisées pour ce genre d'éoliennes, directement couplées au réseau, sont les machines asynchrone à cage, à double alimentation et synchrone à aimant permanent. La machine asynchrone à cage ou à double alimentation est généralement couplée à la turbine via un multiplicateur de vitesse figure (1-16) et la figure (1-17), tandis que la machine synchrone à aimant permanent peut être couplée aussi à la turbine à travers un multiplicateur figure (1-18) ou couplée directement à la turbine figure (1-19) si la machine comporte un grand nombre de pôles évitant ainsi le multiplicateur de vitesse.

Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. En effet, deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés. La connexion de ces convertisseurs est réalisée au moyen de trois inductances de lissage permettant de réduire significativement les harmoniques de courant.

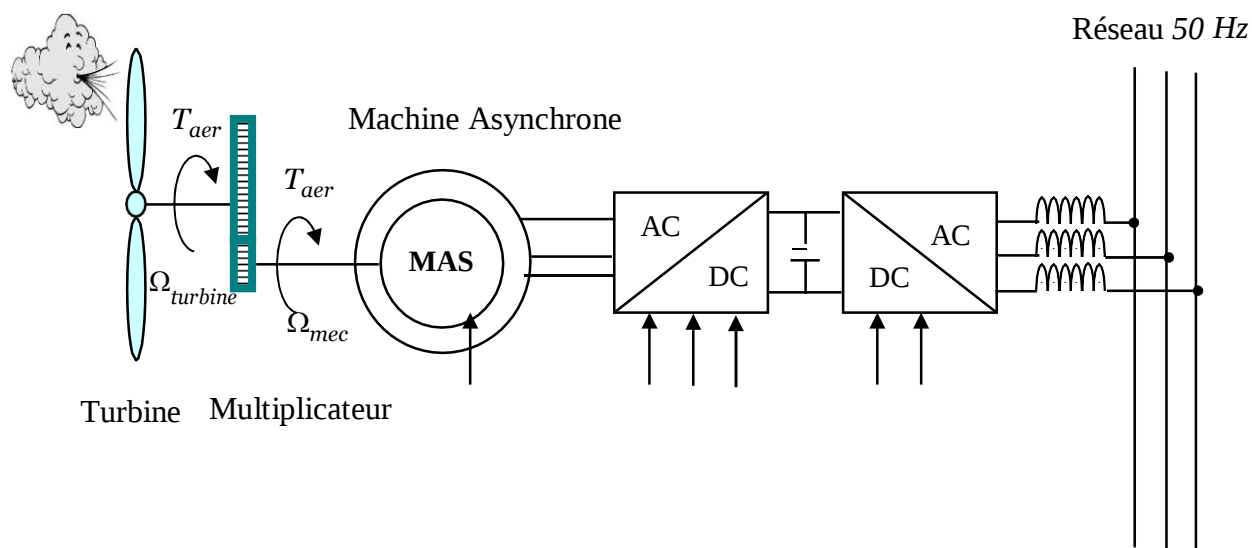


Figure (1-16) : Eolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à cage.

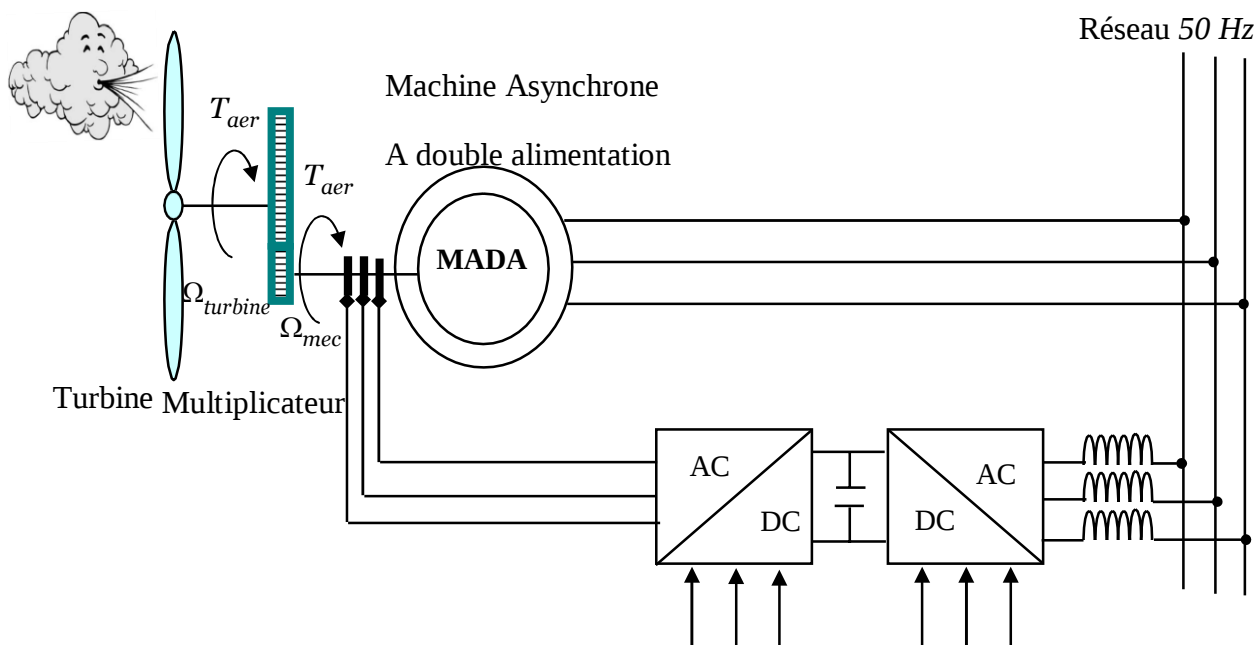


Figure (1-17) : Eolienne à vitesse variable à base d'une MADA.

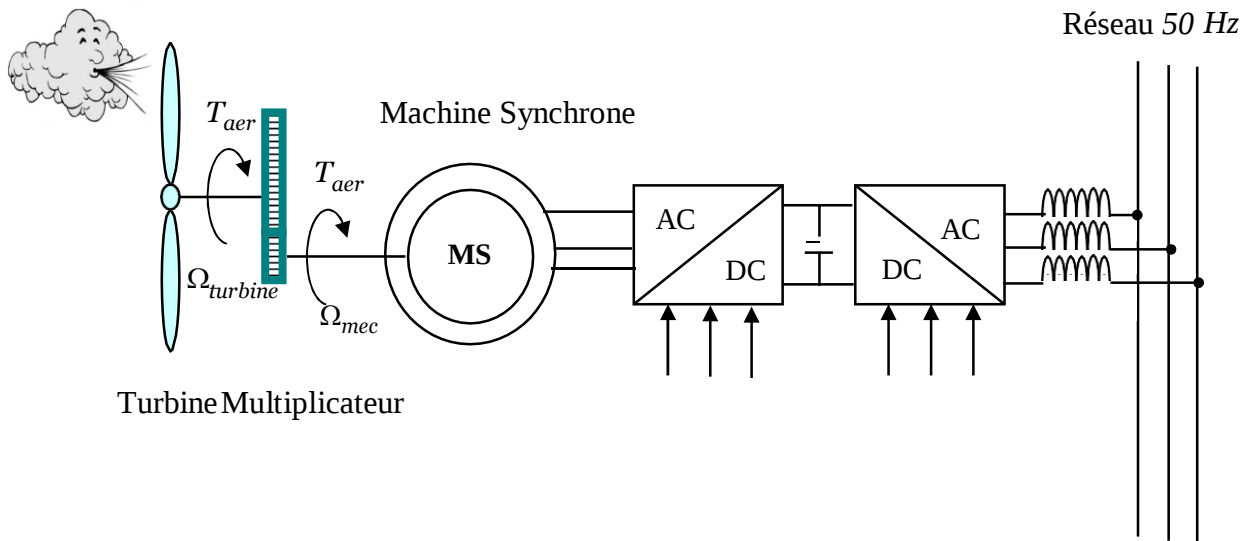


Figure (1-18) : Eolienne à vitesse variable à base d'une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur.

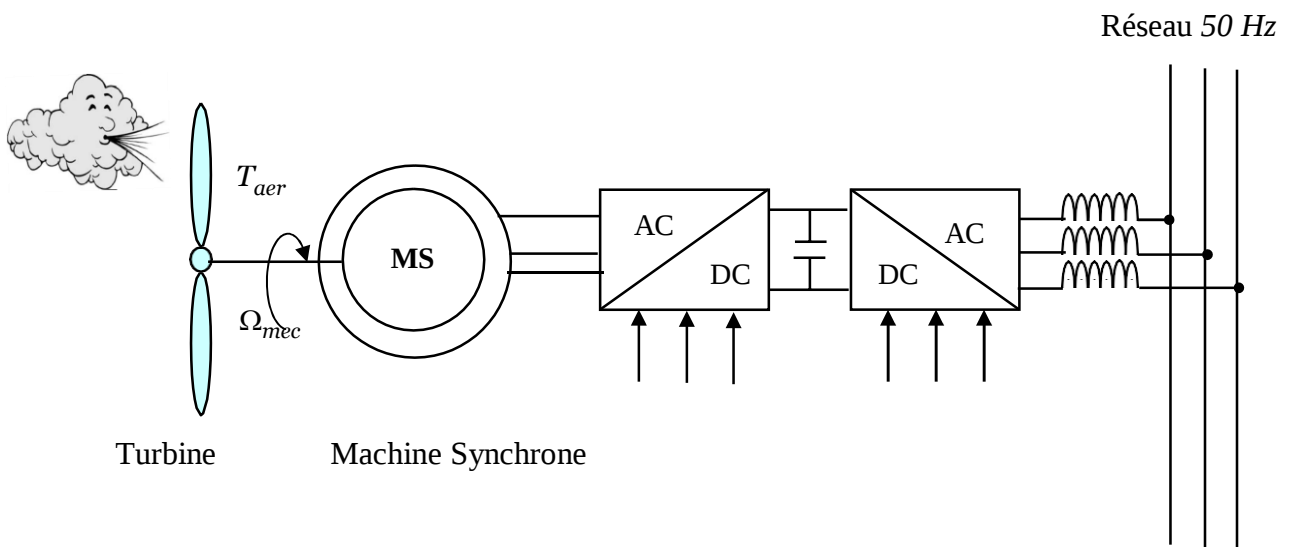


Figure (1-19) : Eolienne à vitesse variable à base d'une machine synchrone directement couplée à la turbine.

Le tableau suivant illustre une comparaison simple entre les différents modes de fonctionnement de l'éolienne [08].

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
▪ Simplicité du système électrique. ▪ Plus grande fiabilité. ▪ Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne. ▪ Moins cher. ▪ Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale).	▪ Augmentation du rendement énergétique. ▪ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance. ▪ Réduction des efforts subis par le train de puissance. ▪ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Tableau I.1 : Comparaison entre éolienne à vitesse fixe et éolienne à vitesse variable.

I.9. Différents systèmes utilisés pour l'exploitation de l'énergie éolienne

I.9.1. 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.) [19].

I.9.2. 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 [19].

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ 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.

I.10. Conclusion

Une brève description du domaine des énergies éoliennes a été présentée dans ce chapitre. Quelques principales notions sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, ses types de sa classification, ses principaux constituants et son principe de fonctionnement d'une chaîne éolienne, les différents types de machines utilisées avec des courbes caractérisant leurs principes de fonctionnement. Ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Après avoir présenté les différentes génératrices (machines) utilisées dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. La suite de ce travail est principalement consacrée à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

Chapitre II :

Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents(MSAP)

Sommaire

II.1. Introduction.....	30
II.2. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents.....	30
<i>II.2.1. Avantages et inconvénients de la MSAP.....</i>	<i>32</i>
<i>II.2.1.1 Avantages</i>	<i>32</i>
<i>II.2.1.2. Inconvénients.....</i>	<i>32</i>
II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	32
<i>II.3.1. Hypothèses simplificatrices.....</i>	<i>33</i>
<i>II.3.2. Représentation de la GSAP dans le système triphasé</i>	<i>33</i>
<i>II.3.3. Equations de la machine synchrone à aimants permanents.....</i>	<i>34</i>
<i>II.3.3.1. Equation électrique de la GSAP.....</i>	<i>34</i>
<i>II.4.3.2. Equation mécanique.....</i>	<i>36</i>
<i>II.3.4. Transforme de PARK.....</i>	<i>36</i>
<i>II.3.5. Modélisation biphasée de la GSAP.....</i>	<i>38</i>
<i>II.3.5.1. Choix de repère de Park</i>	<i>38</i>
<i>II.3.5.2.Equations électriques.....</i>	<i>38</i>

II.3.5.3. Equations magnétiques.....	39
II.3.5.4 Equation du couple électromagnétique.....	40
II.3.5.5. Modélisation de la GSAP relie avec une charge.....	41
II.3.5.6. Modèle d'état de PARK.....	42
II.3.6. Simulation de la GSAP.....	43
II.3.6.1 Simulation de la GSAP à vide.....	43
II.3.6.2. Résultats de simulation à vide.....	44
II.3.6.3. Simulation de la GSAP en charge.....	46
II.3.6.4. Résultats de simulation en charge.....	46
II.4. L'association GSAP – convertisseurs statiques – charge.....	48
II.4.1. Topologies des convertisseurs.....	48
II.4.2. Modélisation du convertisseur alternatif – continu.....	49
II.4.2.1. Structure avec redresseur à MLI.....	49
II.4.2.2. Le filtre passe bas.....	50
II.4.2.3. Modélisation de l'onduleur de tension.....	51
II.4.2.4. Modélisation mathématique de l'onduleur de tension triphasé.....	52
II.4.3. La commande M.L.I.....	54
II.5. Modélisation de la turbine.....	56
II.5.1. Modélisation de la vitesse du vent.....	56
II.5.1.1. Principe physique du vent.....	56
II.5.2. Modélisation de la turbine.....	57
II.5.2.1 Modèle mécanique de la turbine	57
II.5.2.2 Modèle énergétique de la turbine.....	58

<i>II.5.2.3. Modèle du multiplicateur.....</i>	60
<i>II.5.2.4. Equation dynamique de l'arbre de la génératrice.....</i>	60
II.6. Chaîne de conversion éolienne.....	61
<i>II.6.1. La chaîne éolienne globale.....</i>	61
II.7. Conclusion.....	62

II.1. Introduction

L'étude du comportement d'un moteur électrique est une tâche difficile qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés.

Dans ce chapitre, nous présenterons la modélisation du moteur synchrone à aimants permanent, le modèle triphasé et le modèle obtenu à l'aide de la décomposition selon deux axes (transformation de Park), puis nous attachons à présenter le redresseur à MLI en donnant son modèle mathématique qui permet de le simuler sous MATLAB. Ensuite nous allons détailler le fonctionnement de l'onduleur à MLI et son modèle également.

Enfin, nous allons terminer par donner la modélisation de la turbine et le schéma global de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

II.2. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

Le terme de la machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. [21]

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles :

- Les machines synchrone à rotor bobiné
- Les machines synchrone à réluctance
- Les machines synchrone à aimants permanents.

Notre intérêt va plus particulièrement vers cette dernière catégorie, en effet avec l'apparition d'aimants permanents de plus en plus performants (faible désaimantation, énergie maximale stockée plus grande, induction de saturation et champ coercitif plus élevé).

La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance.



Figure (2.1) : Photographie de moteur à aimants en géométries cylindriques

Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de 120° . [21]

Le rotor de la MSAP est généralement de deux types :

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

II.2.1. Avantages et inconvénients de la MSAP

II.2.1.1 Avantages

L'apparition d'aimants performants et le développement des composants d'électronique de puissance sont les raisons qui ont poussé un bon nombre de chercheurs et industriels à se lancer dans des investigations dans le domaine des associations convertisseurs statiques machines synchrones à aimants permanents.

L'utilisation des aimants permanents dans les machines électriques pour la production du flux présente plusieurs avantages :

- Pertes Joule d'inducteur nulles.
- Une grande facilité de refroidissement, car les pertes sont localisées au stator.
- Un rendement plus élevé.
- La suppression des frottements des balais sur le collecteur.
- La diminution des problèmes de maintenance.

II.2.1.2. Inconvénients :

Le principal inconvénient réside dans la difficulté de réglage du flux d'inducteur et de ce fait la commande du moteur est effectuée par action extérieure. [22]

II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La modélisation de la machine électrique est une étape primordiale pour l'élaboration des systèmes de commande. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels, permettent de réaliser des simulations performantes et d'envisager l'optimisation des systèmes de régulation [08]

Le modèle classique de la machine synchrone à aimants permanents correspondent au schéma monophasé équivalent, n'est valable qu'en régime sinusoïdale à fréquence fixe au stator.

Pour étudier son comportement a une fréquence variable et avec des signaux fournis par les convertisseurs statiques qui ne sont pas sinusoïdaux, il faut faire appel à un modèle plus précis. A l'aide de la transformation de PARK, chaque armature triphasé statorique ou rotorique peut être représentée par une armature diphasée équivalente [08].

II.3.1. Hypothèses simplificatrices

La machine synchrone à aimants permanents est un système complexe, dont la modélisation obéit aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- On admet que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- La machine est équilibrée par conséquent la composante homopolaire est nulle.

II.3.2. Représentation de la GSAP dans le système triphasé

La machine synchrone à aimant permanent est représentée sur la figure (2-2) par ces trois enroulements statoriques. L'induction magnétique des aimants permanents est représentée par une source de flux qui tourne à la vitesse du rotor(ω)[22].

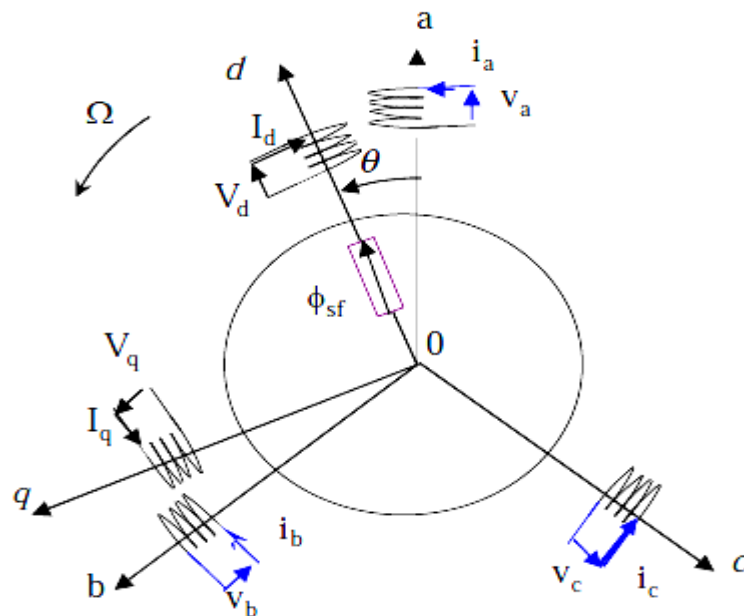


Figure (2-2) : Représentation électrique de la GSAP.

II.3.3. Equations de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est constituée par trois bobinages statoriques qui constituent les trois phases, et des aimants au rotor distribués en 17 paires de pôles. Les flux créés par les aimants permanents sont de forme sinusoïdale le long de l'entrefer. Les expressions des flux mutuels inducteur-phase sont données par [19]:

II.3.3.1. Equation électrique de la GSAP

Par application de la loi de Faraday à la GSAP, la loi des mailles s'exprime par la relation :

$$v = -Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette machine par les relations suivantes :

$$\begin{cases} v_{as} = -R_s i_{as} + \frac{d}{dt} \phi_{as} \\ v_{bs} = -R_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \phi_{bs} \\ v_{cs} = -R_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \phi_{cs} \end{cases} \quad (2.2)$$

Où :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

D'où la forme matricielle considérée :

$$[V_s] = -[R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad (2.4)$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Où R_s est Résistance d'une phase statorique.

Avec :

$$[V_s] = [v_a \ v_b \ v_c]^T \quad (2.6)$$

$$[I_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad (2.7)$$

$$[\Phi_s] = [\phi_a \ \phi_b \ \phi_c]^T \quad (2.8)$$

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques.

$[I_s]$: Vecteur des courants statoriques.

$[\Phi_s]$: Vecteur des flux statoriques.

$$[\Phi_f] = \begin{bmatrix} \phi_f \cos(\theta) & \phi_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \phi_f \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

La relation du flux , s'exprime par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \phi_a = \phi_{ap} + \phi_{ab} + \phi_{ac} + \phi_{af} \\ \phi_b = \phi_{bp} + \phi_{ba} + \phi_{bc} + \phi_{bf} \\ \phi_c = \phi_{cp} + \phi_{ca} + \phi_{cb} + \phi_{cf} \end{cases} \quad (2.10)$$

Avec :

ϕ_{xp} : Flux propre de l'enroulement (x), x=a, b, c.

ϕ_{xy} : Flux propre de l'enroulement (y) et embrasse par l'enroulement (x) (x≠y).

ϕ_{xf} : flux crée par les aimants et embrasse par l'enroulement (x) , x=(a, b, c).

Donc, l'équation (2.10) s'écrit comme suite :

$$\begin{cases} \phi_{as} = L_a i_{as} + M_{ab} i_{bs} + M_{ac} i_{cs} + \phi_f \cos(\theta) \\ \phi_{bs} = M_{ba} i_{as} + L_b i_b + M_{bc} i_{cs} + \phi_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \phi_{cs} = M_{ca} i_{as} + M_{cb} i_{bs} + L_c i_{cs} + \phi_f \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.11)$$

Etant donné que la machine et de la construction triphasée symétrique, alors :

$$\begin{aligned}L_a &= L_b = L_c \\M_{ab} &= M_{ba} = M \\M_{ac} &= M_{ca} = M \\M_{bc} &= M_{cb} = M\end{aligned}$$

Alors, l'expression (2.11) s'écrit sous la forme matricielle :

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [\Phi_f] \quad (2.12)$$

Avec :

$$[\Phi_s] = [\phi_a \ \phi_b \ \phi_c]^T \quad (2.13)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$[\Phi_f] = \phi_f \left[\cos(\theta) \quad \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \right]^T \quad (2.15)$$

II.3.3.2. Equation mécanique

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - C_f \quad (2.16)$$

Avec : $C_f = f.\Omega$ et $\Omega = \frac{\omega}{p}$

II.3.4. Transforme de PARK

Pour traduire le passage du système triphasés (a, b, c) au système biphasés (d, q) tournant aune vitesse ω et pouvoir essentiellement linéariser les équations précédentes on utilise la transformation de PARK.

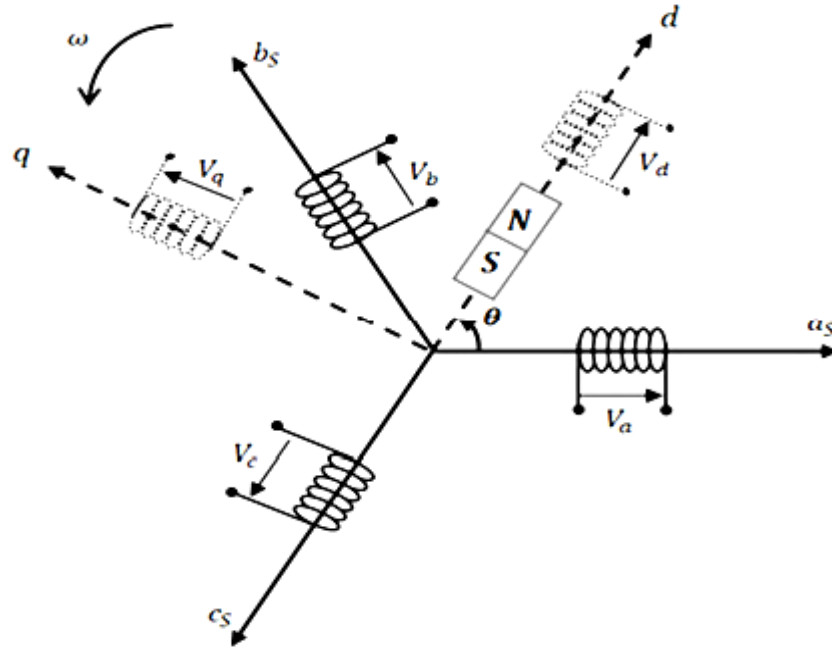


Figure (2-3): Passage du système triphasé vers le système biphasé.

Pour le passage du système triphasé au système biphasé, on utilise la matrice de passage $P(\psi)$, et on écrit:

$$[X_{dqh}] = [P(\psi)][X_{abc}] \quad (2.17)$$

$$[P(\psi)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\psi) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

La transformation inverse est définie par :

$$[p(\psi)]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Avec la position du repère de PARK : $\psi(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau$

II.3.5. Modélisation biphasée de la GSAP

Le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents dans le référentiel (a, b, c) étant fort complexe, et aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. Le but des transformations matricielles est de le simplifier.

Donc cette simplification permet de réduire l'ordre du système. C'est-à-dire, obtenir un modèle caractérisé par un système d'équation à coefficients constant [22].

La transformation de Park est un passage du système triphasés (a, b, c) vers un système biphasés (d, q). On désigne par : "d" l'axe direct et par "q" l'axe en quadrature arrière.

II.3.5.1. Choix de repère de Park

Pour bénéficier de façons judicieuses des simplifications apportées par la transformation de Park, nous choisissons un repère (d, q) tournant à la vitesse du rotor. Ainsi les grandeurs du rotor (flux inducteur) ne subissent aucun changement. Donc, la transformation de Park s'applique seulement aux grandeurs statoriques.

II.3.5.2. Equations électriques

La transformation de PARK permet d'écrire :

$$\begin{cases} [V_{dqh}] = [P(\theta)][V_s] \\ [I_{dqh}] = [P(\theta)][I_s] \\ [\Phi_{dqh}] = [P(\theta)][\Phi_s] \end{cases} \quad (2.20)$$

En remplaçant (2.18) dans (2.4), on obtient :

$$\begin{aligned} [V_s] &= -[R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [P(\theta)]^{-1}[V_{dqh}] &= -[R_s][P(\theta)]^{-1}[I_{dqh}] + \frac{d}{dt}\{[P(\theta)]^{-1}\}[\Phi_{dqh}] \end{aligned} \quad (2.21)$$

On multipliant les deux termes par : $[P(\theta)]$ et après simplification on trouve:

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega \phi_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega \phi_{ds} \end{cases} \quad (2.22)$$

II.3.5.3. Equations magnétiques

Les relations entre flux et courant dans le repère de Park se déduisent en multipliant l'équation (2.12) par $P(\theta)$:

$$\begin{aligned} [\Phi_s] &= [L_s][I_s] + [\Phi_f] \\ [P(\theta)]^{-1} [\Phi_{dqh}] &= [L_s][P(\theta)]^{-1} [I_{dqh}] + [\Phi_f] \end{aligned} \quad (2.23)$$

Donc :

$$[\Phi_{dqh}] = \{ [P(\theta)][L_s][P(\theta)]^{-1} \} [I_{dqh}] + [P(\theta)][\Phi_f] \quad (2.24)$$

Etant donné que la composante homopolaire est nulle, on aboutit finalement au système suivant :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_d i_{ds} + \phi_f \\ \phi_{qs} = L_q i_{qs} \end{cases} \quad (2.25)$$

Ou :

$$L_d = L_q = L - M$$

En remplace l'équation (2.25) dans (2.22), on trouve :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega (L_q i_{qs}) - L_d \frac{d}{dt} i_{ds} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega (L_d i_{ds} + \phi_f) - L_q \frac{d}{dt} i_{qs} \end{cases} \quad (2.26)$$

La machine diphasée sera représentée dans l'espace électrique par la figure (2-4) :

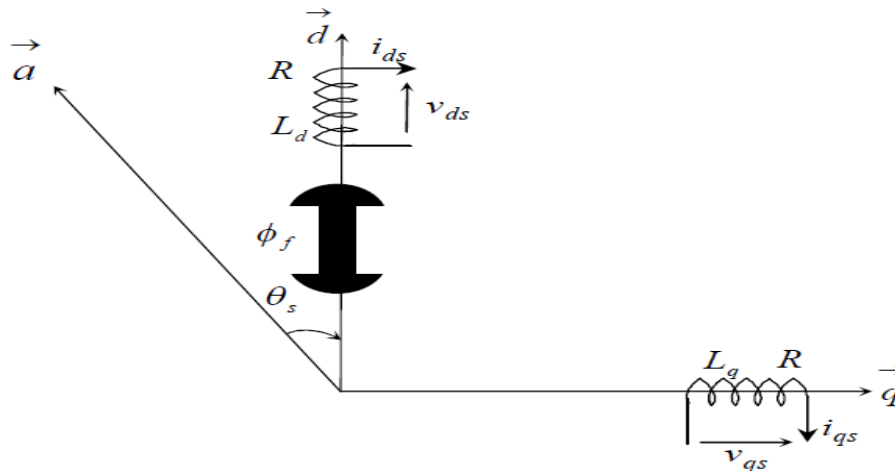


Figure (2-4): Représentation des enroulements fictifs d'axes 'd' et 'q'.

II.3.5.4 Equation du couple électromagnétique

La puissance instantanée électrique aux bornes de la machine est :

$$p_e(t) = v_{as}i_{as} + v_{bs}i_{bs} + v_{cs}i_{cs} \quad (2.27)$$

En utilisant les propriétés de la matrice de PARK, après un calcul simple on trouve :

$$p_e(t) = \frac{3}{2} (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (2.28)$$

En remplaçant les expressions de v_{ds} et v_{qs} dans l'équation (2.28).

$$p_e(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \right] + \left[(i_d L_d \frac{d}{dt} i_d + i_q L_q \frac{d}{dt} i_q) \right] + \left[(i_q L_q i_d - i_d L_d i_q) \omega + \phi_f i_q \omega \right] \quad (2.29)$$

- Le premier terme représente les pertes joules dans l'induit.
- Le deuxième terme représente la variation par unité de temps de l'énergie magnétique emmagasinée.
- Le troisième terme représente la puissance mécanique transformée en puissance électrique à l'intérieure de la machine, comme ω est la vitesse instantanée de rotation, on déduit l'expression du couple électromagnétique.

$$C_{em} = \frac{3}{2} p ((L_q - L_d) i_q i_d + \phi_f i_q) \quad (2.30)$$

Où :

$(L_q - L_d) i_q i_d$: Couple supplémentaire du à la saillance des pôles

$\phi_f i_q$: Couple obtenu avec une machine à pôles lisses.

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - f \cdot \Omega \quad (2.31)$$

L'expression du couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p ((L_q - L_d) i_d + \phi_f) i_q \quad (2.32)$$

Avec :

J : Le moment d'inertie de la machine ;

f : Le coefficient dû aux frottements visqueux ;

$f.\Omega$: Le couple de frottements ;

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice;

II.3.5.5. Modélisation de la GSAP relie avec une charge

Le modèle biphasée de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega (L_q i_{qs}) - L_d \frac{d}{dt} i_{ds} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega (L_d i_{ds} + \phi_f) - L_q \frac{d}{dt} i_{qs} \end{cases} \quad (2.33)$$

D'autre coté, les tensions de la génératrice sont appliquées directement sur une charge $\bar{Z}_{ch}$. La figure (2-5) représente le schéma de la génératrice synchrone à aimants permanents alimentant une charge $\bar{Z}_{ch}$.

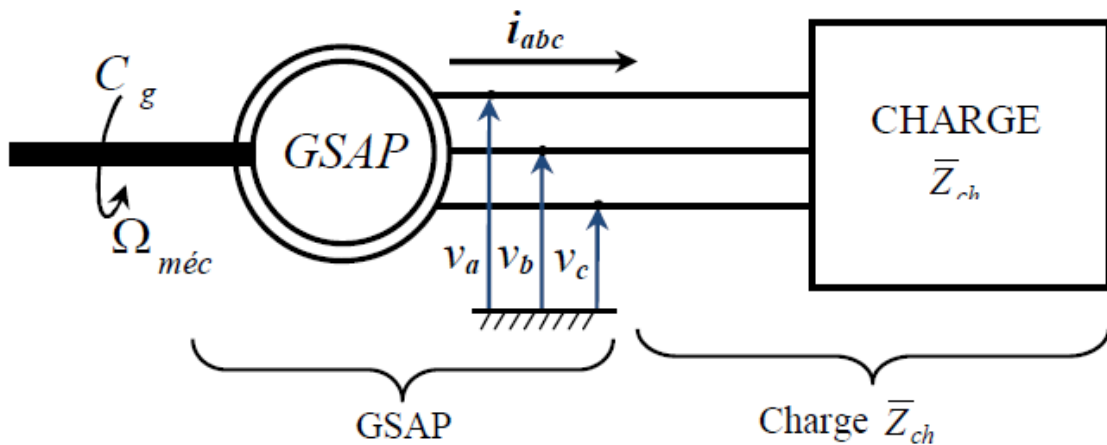


Figure (2-5): Schéma représentatif de la GSAP alimentant appliqué sur une charge $\bar{Z}_{ch}$

La figure (2-5), nous permet d'écrire l'équation relative à la charge :

$$[V_{abc,ch}] = [Z_{ch}] [I_{abc,ch}] \quad (2.34)$$

La transformation de PARK permet d'écrire :

$$[P(\theta)][V_{abc,ch}] = [Z_{ch}][P(\theta)][I_{abc,ch}] \quad (2.35)$$

Après simplification, on trouve:

$$[V_{dqh,ch}] = [Z_{ch}][I_{dqh,ch}] \quad (2.36)$$

Avec:

$$[V_{abc,s}] = [V_{abc,ch}] \quad (2.37)$$

Donc:

$$[V_{dqh,s}] = [V_{dqh,ch}] \quad (2.38)$$

Après simplification, on trouve:

$$\begin{cases} v_{d,ch} = R_{ch}i_{ds} - \omega(L_{ch}i_{qs}) + L_{ch} \frac{d}{dt}i_{ds} \\ v_{q,ch} = R_{ch}i_{qs} + \omega(L_{ch}i_{ds}) + L_{ch} \frac{d}{dt}i_{qs} \end{cases} \quad (2.39)$$

En remplaçant les expressions de v_{ds} et v_{qs} , $v_{d,ch}$ et $v_{q,ch}$ dans (2.38), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega(L_q i_{qs}) - L_d \frac{d}{dt}i_{ds} = R_{ch}i_{ds} - \omega(L_{ch}i_{qs}) + L_{ch} \frac{d}{dt}i_{ds} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} - \omega(L_d i_{ds} + \phi_f) - L_q \frac{d}{dt}i_{qs} = R_{ch}i_{qs} + \omega(L_{ch}i_{ds}) + L_{ch} \frac{d}{dt}i_{qs} \end{cases} \quad (2.40)$$

Après simplification, on trouve:

$$\begin{cases} (R_s + R_{ch})i_{ds} + (L_{ch} + L_d) \frac{d}{dt}i_{ds} - \omega(L_{ch} + L_q)i_{qs} = 0 \\ (R_s + R_{ch})i_{qs} + (L_{ch} + L_q) \frac{d}{dt}i_{qs} + \omega(L_{ch} + L_d)i_{ds} - \omega\phi_f = 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

II.3.5.6. Modèle d'état de PARK

Considérons ensuite les courants statoriques et la vitesse de rotation comme variables d'état. Après réarrangement des équations on obtient:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega \cdot \phi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

En introduisant la transformée de LAPLACE dans le modèle ci-dessus, elles deviennent :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega \cdot \phi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\begin{cases} p i_{ds} = -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} i_{ds} + \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} i_{qs} \\ p i_{qs} = -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} i_{qs} - \omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} i_{ds} + \frac{\omega \phi_f}{L_q + L_{ch}} \end{cases} \quad (2.44)$$

$$\begin{cases} i_{ds} = \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} i_{qs} \left(\frac{1}{p + \frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}}} \right) \\ i_{qs} = \omega \left(-\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} i_{ds} + \frac{\phi_f}{L_q + L_{ch}} \right) \left(\frac{1}{p + \frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}}} \right) \end{cases} \quad (2.45)$$

Avec :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p ((L_q - L_d) i_{ds} + \phi_f) i_{qs} \quad (2.46)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{j} C_m - \frac{p}{j} C_{em} - \frac{f}{j} \cdot \omega \quad (2.47)$$

II.3.6.Simulation de la GSAP

Les résultats de la simulation sous MATLAB/SIMULINK du modèle la GSAP à vide et en charge, basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park sont représentés sur les figures ci-dessous.

II.3.6.1 Simulation de la GSAP à vide :

Le schéma bloc de simulation de la GSAP à vide est donné à la figure (2-6).

Les paramètres de la GSAP sont : $R_s = 0.895\Omega$, $L_d = 0.012H$, $L_q = 0.012H$, $\phi_f = 0.9wb$,
 $p = 2$, $J = 0.9 \cdot 10^{-5} kg \cdot m^2$, $f = 0.1 Nm \cdot rad/s$, $C_m = 7 N.m$



Figure (2-6): Schéma bloc de simulation de la GSAP à vide

II.3.6.2. Résultats de simulation à vide :

On fait lancer la génératrice par un couple moteur égale à 07 N.m pour une durée de 0.1(s), puis, on la laisse tourner librement Figure (2-7).

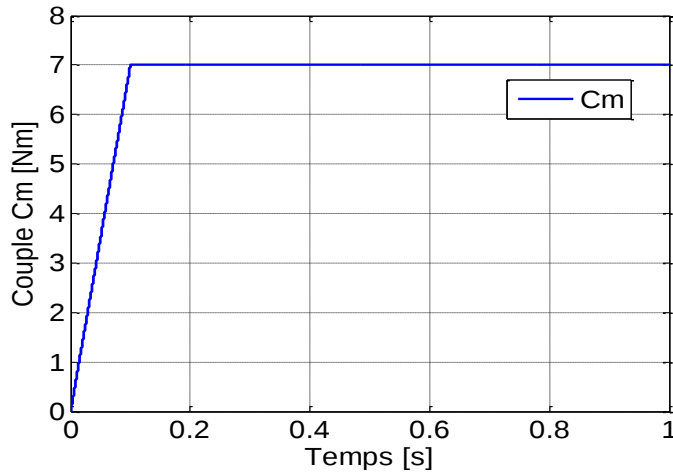


Figure (2-7) : Couple moteur pour la GSAP à vide.

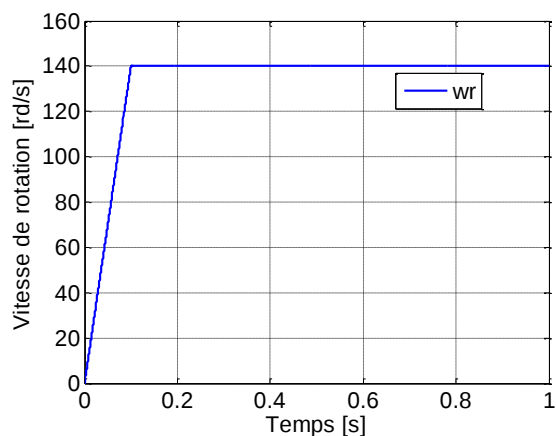
A vide, les courants sont nuls :

$$\begin{cases} i_d = 0 \\ i_q = 0 \end{cases} \quad (2.48)$$

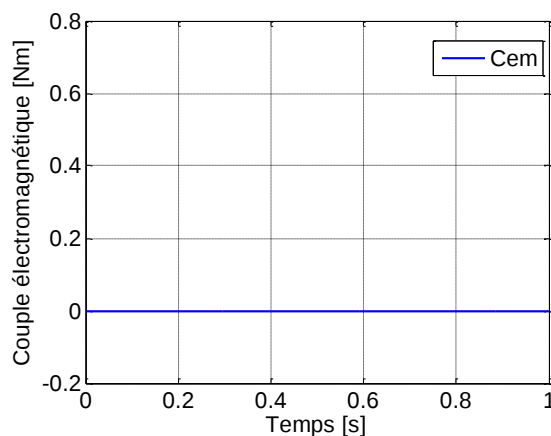
Les expressions des tensions et couple deviennent:

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = \omega \phi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (2.49)$$

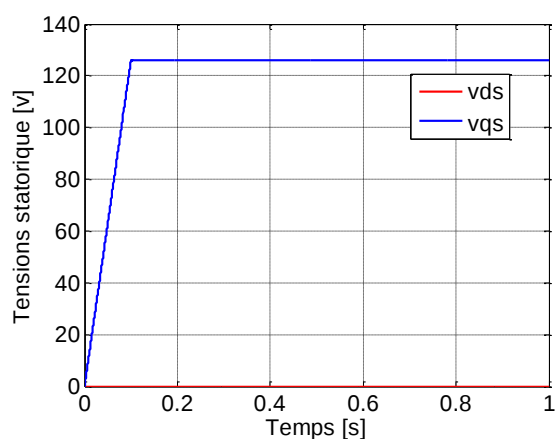
On constate sur la figure (2-8) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 140 (rad/s), alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime permanent. Le couple électromagnétique est nul.



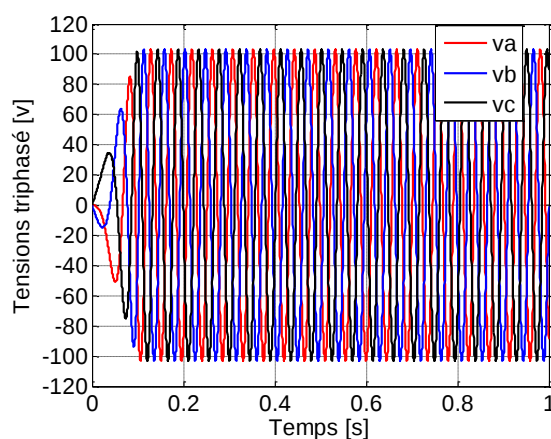
(a) Vitesse de rotation



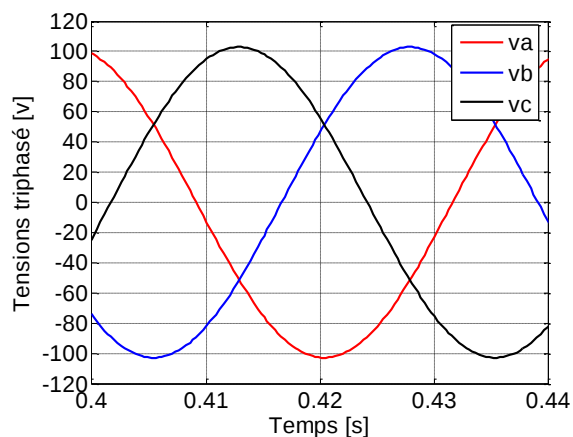
(b) Couple électromagnétique



(c) Tensions v_{ds} et v_{qs}



(d) Tensions v_a v_b v_c



(e) Zoom sur tensions v_a v_b v_c

Figure (2-8) : Résultats de simulation de la GSAP à vide pour $C_m=07$ N.m.

II.3.6.3. Simulation de la GSAP en charge :

Le schéma bloc de simulation de la GSAP alimentant une charge est donné à la figure (2-9). Les paramètres de la GSAP sont : $R_s = 0.895\Omega$, $L_d = 0.012H$, $L_q = 0.012H$, $\phi_f = 0.9wb$,

$$p=3 \quad J = 0.00141kg \cdot m^2 \quad f = 0.1Nm \cdot rad/s \quad C_m = 7N.m$$

Les paramètres de la charge sont : $R_{ch} = 50\Omega$ $L_{ch} = 0.002H$

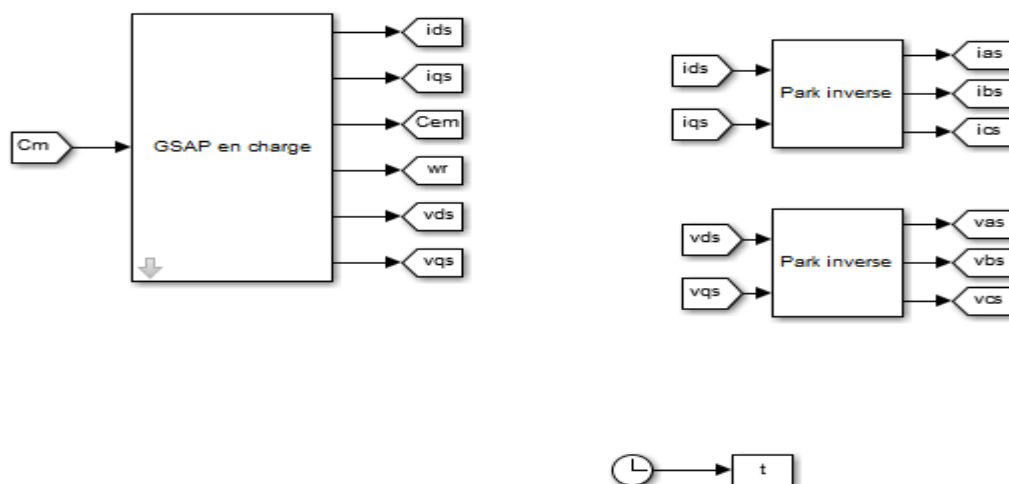


Figure (2-9): Schéma bloc de simulation de la GSAP en charge.

II.3.6.4. Résultats de simulation en charge

Pour étudier l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, nous avons appliqué un couple moteur variable suivant la figure (2.10).

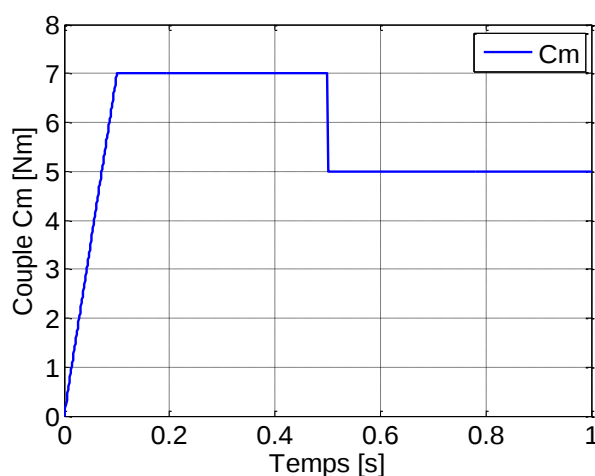


Figure (2-10) : Couple moteur pour la GSAP en charge

Les résultats de simulation sont donnés à la figure (2.11).

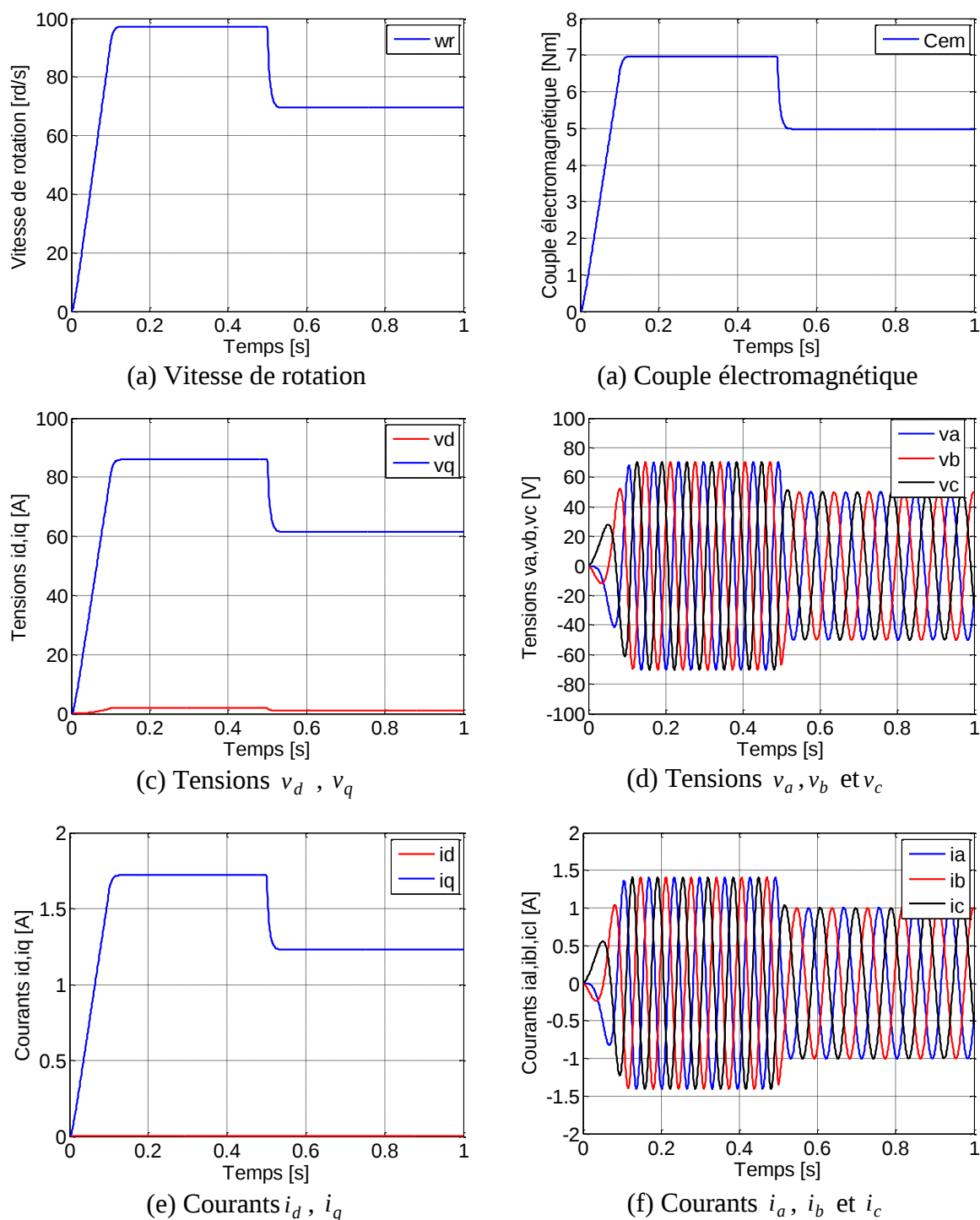


Figure (2-11): Résultats de simulation de la GSAP en charge.

La figure (2-11) représente les résultats de simulation de la génératrice synchrone à aimants Permanents en charge. Il est clair que le couple moteur appliqué influe sur l'amplitude et la fréquence de la tension et le courant.

La vitesse de la génératrice est faible, ce qui traduit par des faibles fréquences de tension. Ceci est expliqué par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

II.4. L'association GSAP – convertisseurs statiques

II.4.1. Topologies des convertisseurs

Grâce au développement très rapide de l'électronique de puissance, offrant à la fois, une grande capacité, et une bonne qualité de puissance, avec le moindre de coût ; le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation des convertisseurs de l'électronique de puissance.

Des nouveaux types de génératrices associées à ces convertisseurs sont en cours de développement. L'utilisation des convertisseurs de l'électronique de puissance dans le système de conversion d'énergie éolienne permet, non seulement, d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie électrique, mais aussi d'optimiser la puissance prélevée. [23]

Plusieurs structures de conversion de l'énergie électrique fournie par la génératrice éolienne à vitesses variables peuvent être utilisées dans le but d'avoir une tension de fréquence et amplitude constants du côté réseau. Ces structures sont basées sur des dispositifs électroniques figure (2-12), et se sont caractérisées par leurs performances et avantages sur les plans techniques et économiques. [24]

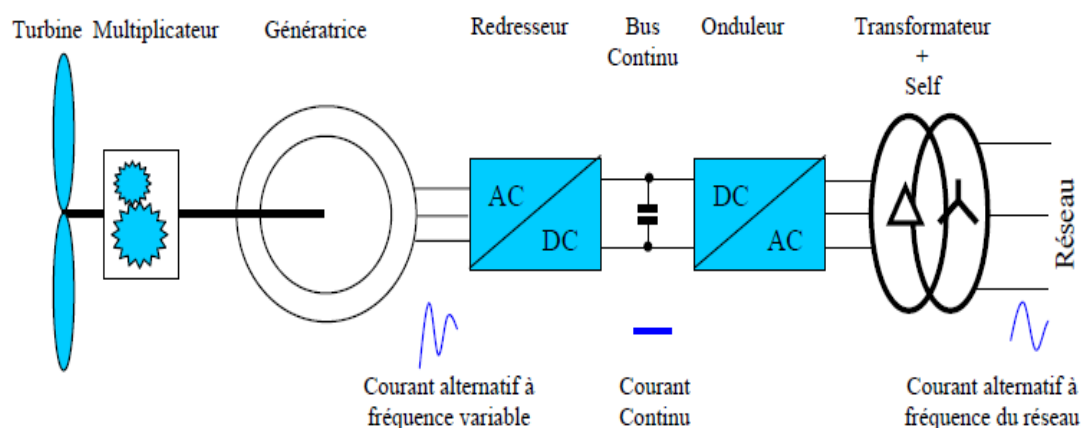


Figure (2-12) : Exemple d'une éolienne à vitesses variables connectée au réseau via des convertisseurs statique

II.4.2. Modélisation du convertisseur alternatif – continu

II.4.2.1. Structure avec redresseur à MLI

C'est un pont à six thyristors qui a pour fonction de convertir les tensions triphasées sinusoïdales en une tension unidirectionnelle : la tension redressée. Il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation. Sa structure est exprimée sur la figure suivante : [22]

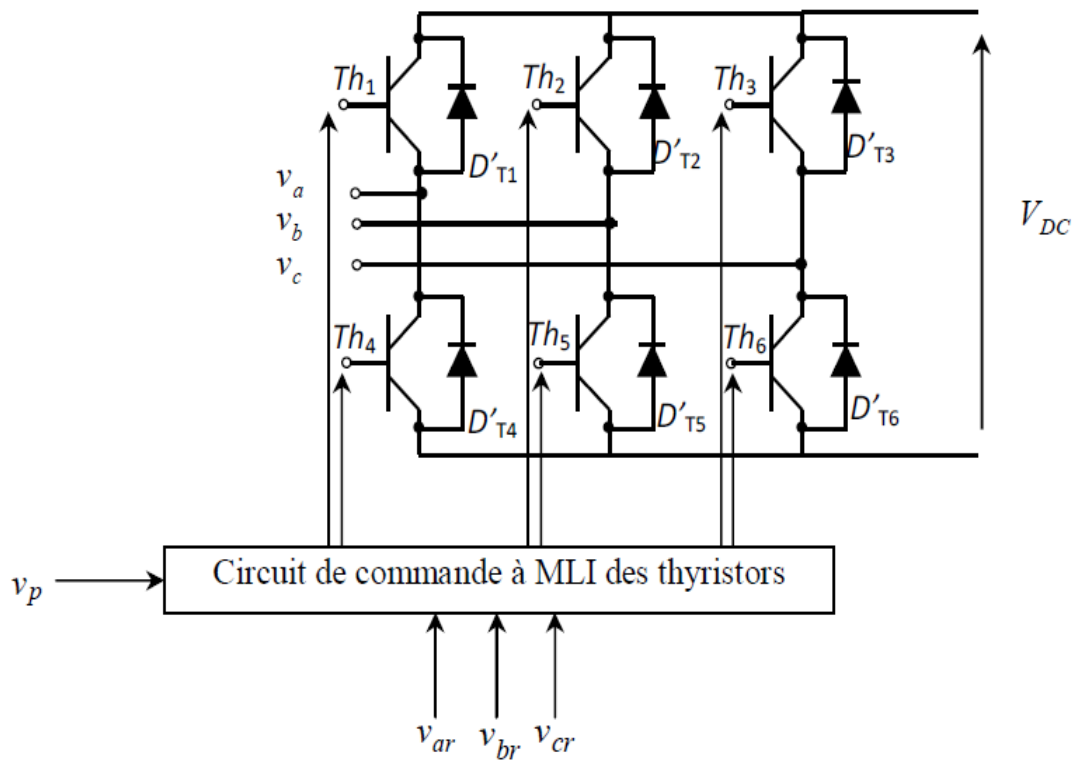


Figure (2-13) : Structure d'un redresseur triphasé à thyristors.

Si nous considérons l'expression des tensions simples de la forme suivante :

$$\begin{cases} V_1 = v_m \sin \omega t \\ V_2 = v_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_3 = v_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (2.50)$$

Donc, la tension de sortie du redresseur sera présentée comme suit :

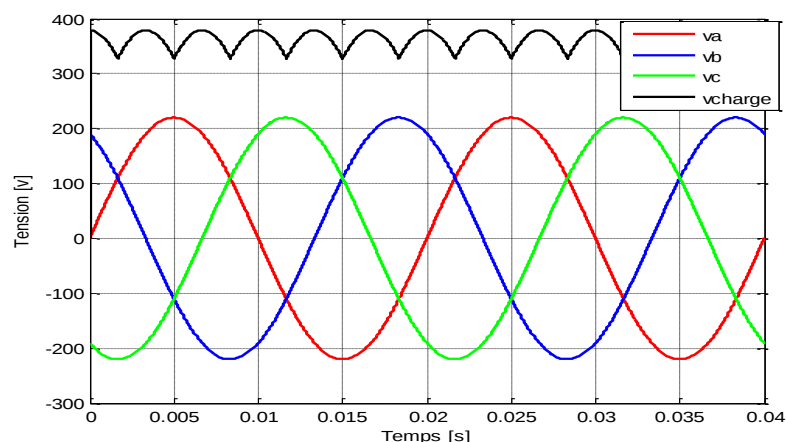


Figure (2-14) : Représentation des tensions v_a v_b v_c et v_{DC} .

II.4.2.2. Le filtre passe bas

La tension de la sortie du redresseur n'est pas sans ondulations. Elle contient une composante alternative, d'où la nécessité d'utiliser un filtre passe bas afin d'atténuer l'effet de cette composante. Un filtre passe bas est un quadripôle dont la tension de sortie doit être faiblement amortie pour le fondamental et le plus possible pour les harmoniques. Généralement, on utilise un filtre constitué d'une inductance L_f et d'un condensateur de capacité C_f . Très répandu, il est simple et reconnu pour ses performances et pour éliminer les harmoniques de haute fréquence, ce filtre est schématiser par la figure suivante : [22]

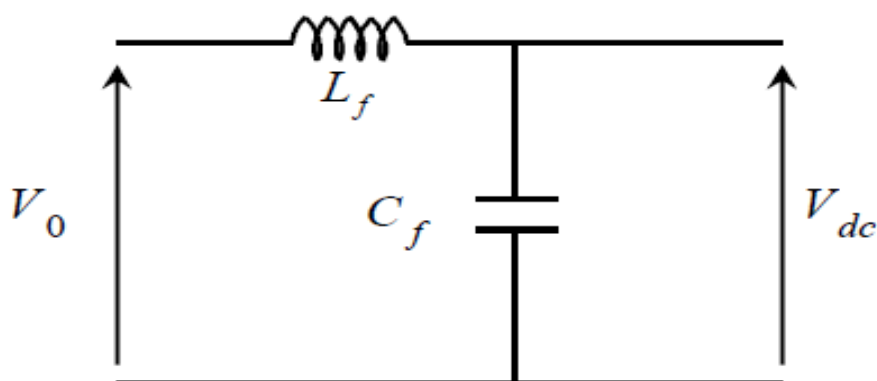


Figure (2-15) : Schéma du filtre passent

II.4.2.3. Modélisation de l'onduleur de tension

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet de transformer un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif, il a la même structure que le redresseur à MLI. .

L'onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion est un convertisseur de l'électronique de puissance (DC-AC) entièrement commandable qui permet d'imposer à sa sortie des tensions d'amplitude et de fréquence réglables en agissant sur la commande des interrupteurs du convertisseur statique (GTO, transistors bipolaire, MOSFET, IGBT, etc.). Pour réaliser un onduleur triphasé classique alimenté par une source de tension continue (munie d'un filtrage capacitif), dont le récepteur est une charge alternative se comportant en source de courant, on a besoin de 6 interrupteurs bidirectionnels en courant. Il faut aussi disposer de diodes rapides et performantes, montées en antiparallèle avec les transistors. Les techniques dites Modulation de Largeur d'Impulsions sont utilisées. [22]

La figure suivante représente la structure de base d'un onduleur de tension triphasé à MLI alimentant une charge triphasée :

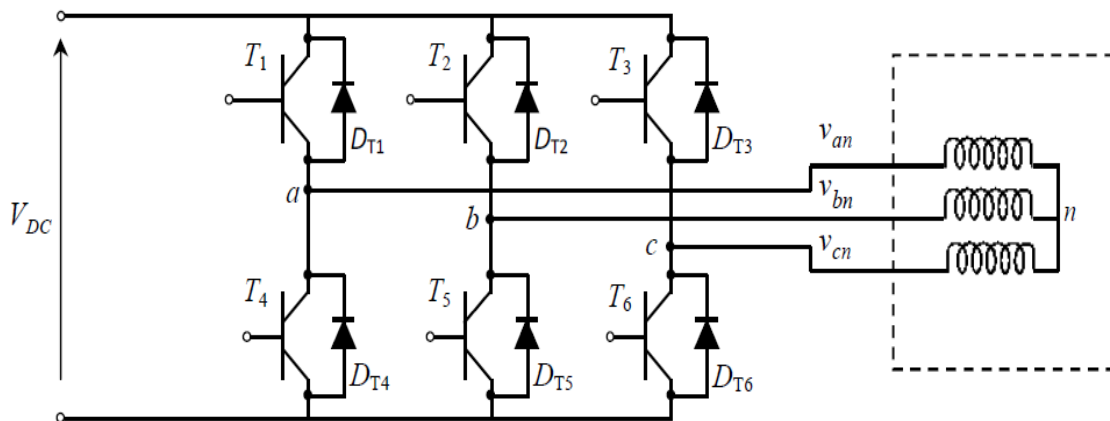


Figure (2-16) : Schéma simplifié d'un onduleur de tension triphasé à MLI alimentant une charge triphasée

II.4.2.4. Modélisation mathématique de l'onduleur de tension triphasé

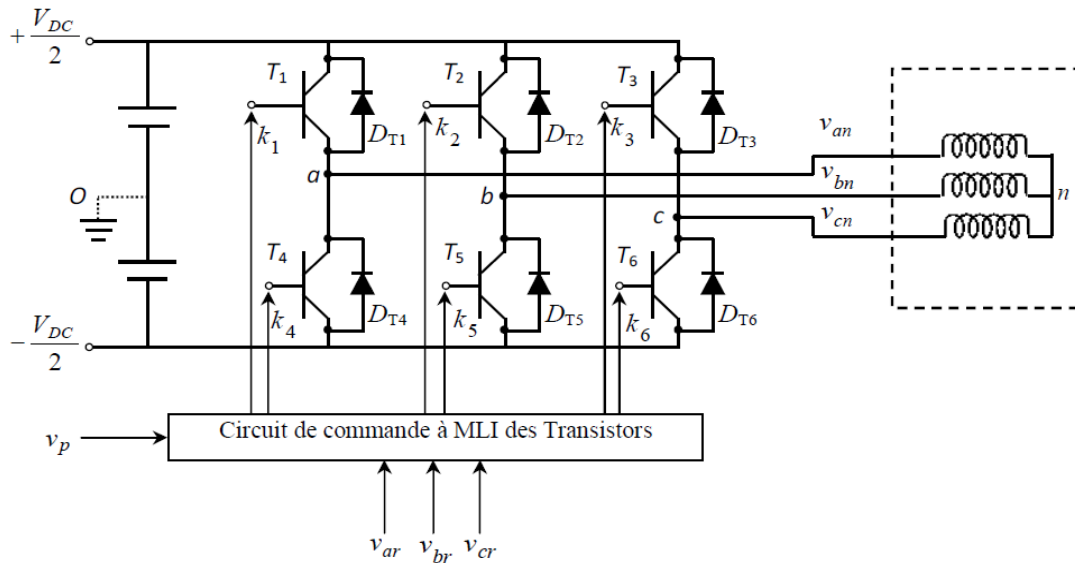


Figure (2-17) : Structure de base de l'onduleur à MLI sinus – triangle.

Les six interrupteurs électroniques peuvent être des transistors (Bipolaires, MOSFET, IGBT) associés à des diodes en tête bêche, et que nous supposons parfaits, et encore des thyristors équipés de circuit d'extinction en plus du dispositif d'amorçage.

Pour simplifier l'étude, nous supposons que :

- Le couplage est du type étoile sans neutre (bien que le branchement d'une charge en triangle soit envisageable),
- Ainsi les harmoniques de rang trois et multiples de trois sont éliminées,
- Le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont :

$$\begin{cases} v_a = v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_b = v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_c = v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (2.51)$$

Par addition on a :

$$v_a + v_b + v_c = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} \quad (2.52)$$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

Donc, on peut déduire que :

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{cn} = 0 \quad (2.53)$$

$$v_{on} = -\frac{1}{3(v_{ao} + v_{bo} + v_{co})} \quad (2.54)$$

En remplaçant (2.54) dans (2.51), on obtient :

$$\begin{cases} v_a = \frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \\ v_b = -\frac{1}{3}v_{ao} + \frac{2}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \\ v_c = -\frac{1}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} + \frac{2}{3}v_{co} \end{cases} \quad (2.55)$$

Sous la forme matricielle de système (2.56) devient :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Avec :

$$\begin{cases} v_{ao} = \frac{V_{DC}}{2} S_1 \\ v_{bo} = \frac{V_{DC}}{2} S_2 \\ v_{co} = \frac{V_{DC}}{2} S_3 \end{cases} \quad (2.57)$$

Tel que :

$$S_1 = 1 \text{ Si } k_1 \text{ fermé si non } S_1 = -1$$

$$S_2 = 1 \text{ Si } k_2 \text{ fermé si non } S_2 = -1$$

$$S_3 = 1 \text{ Si } k_3 \text{ fermé si non } S_3 = -1$$

On remplace (2.57) dans (2.56), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Le système (2.58) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI. La commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion). A partir de ces équations, on peut réaliser le modèle de l'onduleur triphasé, comme il est montré dans la figure (2-17).

II.4.3. La commande M.L.I

Le principe de la technique de modulation de largeur d'impulsion est basé sur la comparaison d'un signal dit la modulante et un autre dit la porteuse.[22]

La technique choisie pour la commande de nos convertisseurs est la M.L.I sinus-triangle car elle permet d'éliminer les harmoniques et l'obtention d'un bon rendement. Elle est basée sur la comparaison d'un signal triangulaire de grande fréquence et d'un signal sinusoïdal de la même fréquence que le signal de référence que l'on souhaite obtenir. Le signal triangulaire est appelé la Porteuse et le signal sinusoïdal est appelé la Modulante.

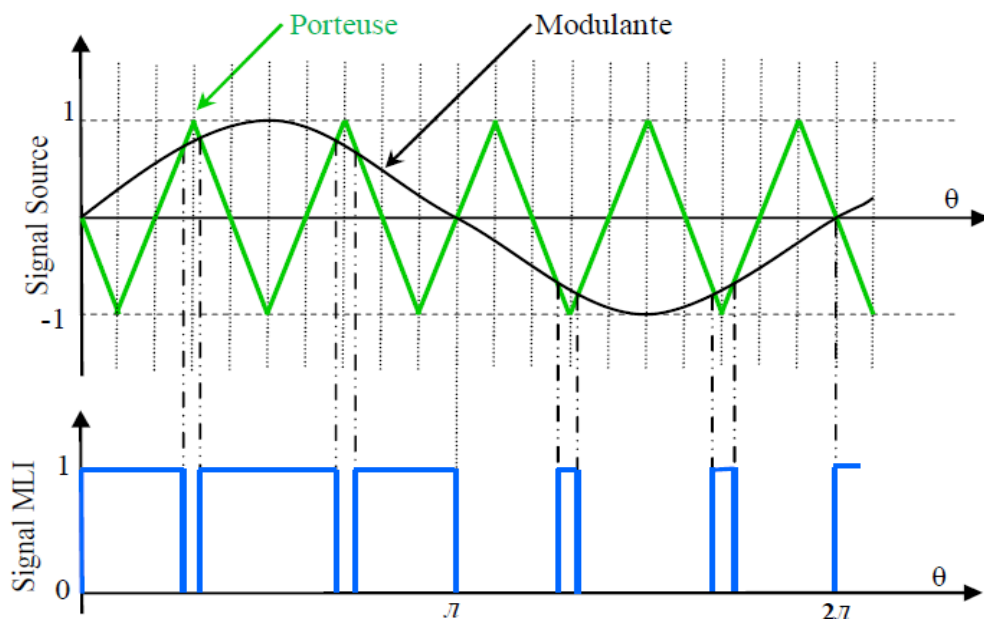


Figure (2-18): Exemple de chronogramme d'une commande «sinus-triangle» monophasée.

Ces signaux ont les propriétés suivantes :

- La modulante est une onde sinusoïdale $v_{ref}(t)$ d'amplitude u_r et de fréquence f_r
- La porteuse est une onde triangulaire ou en dents de scie $v_p(t)$ d'amplitude

$$|u_p| \geq |u_r|, \text{ et d'une fréquence } f_p \gg f_r$$

➤ L'indice de modulation $m = \frac{f_p}{f_r}$

➤ Le coefficient de réglage en tension : $r = \frac{u_r}{u_p}$

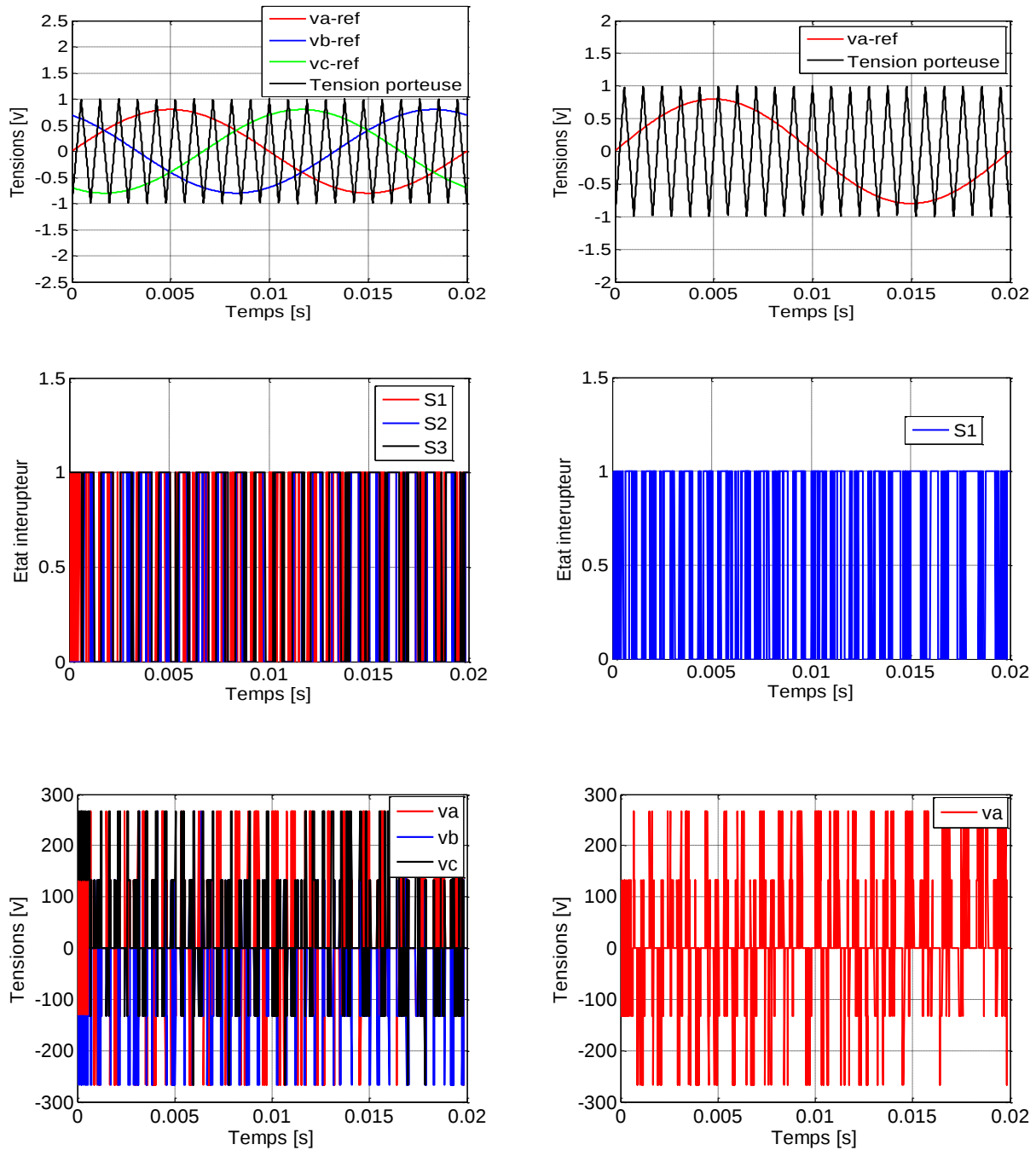


Figure (2-19) : Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle.

II.5. Modélisation de la turbine

II.5.1. Modélisation de la vitesse du vent

La vitesse du vent v est généralement représentée par une fonction $v(t)$. Cette fonction du vent, peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement, et des fluctuations : [08]

$$v(t) = v_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (2.59)$$

Tel que :

v_0 : est la composante moyenne ;

A_i , ω_i , φ_i sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de

Chaque composante spectrale fluctuante.

La figure (2-20) montre l'évolution de la vitesse de vent en fonction du temps. L'allure de la courbe prend une forme aléatoire.

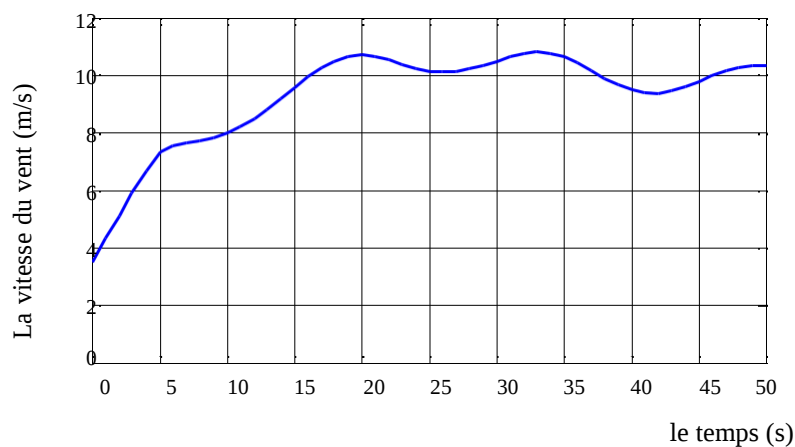


Figure (2-20) : Profil de vent simulé.

II.5.1.1. Principe physique du vent

Comme tout corps en mouvement, on peut associer, au vent, une énergie cinétique qui dépend de sa masse (m) et sa vitesse (v). [08]

$$E_{\text{Cinétique}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 [N \cdot m] \quad (2.60)$$

La masse de l'air s'exprime comme le produit du volume occupé (V) en mètre cube par la masse volumique (ρ) en kilogramme par mètre cube.

$$m = \rho \cdot v \quad (2.61)$$

En considérant un dispositif de récupération de cette énergie de surface (S) et en faisant l'hypothèse que la vitesse du vent est identique en chaque point de cette surface, le volume d'air qui traverse cette surface en 1 seconde est égal à ($v \cdot S$).

$$P_v = E_{c/S} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot S \cdot v^2$$

Dans le cas du vent actionnant une éolienne, le volume occupé dépend de la zone balayée par la turbine. La puissance du vent sur l'éolienne correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant la turbine de chaque seconde.

II.5.2. Modélisation de la turbine

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R , entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G figure (2-21).[08]

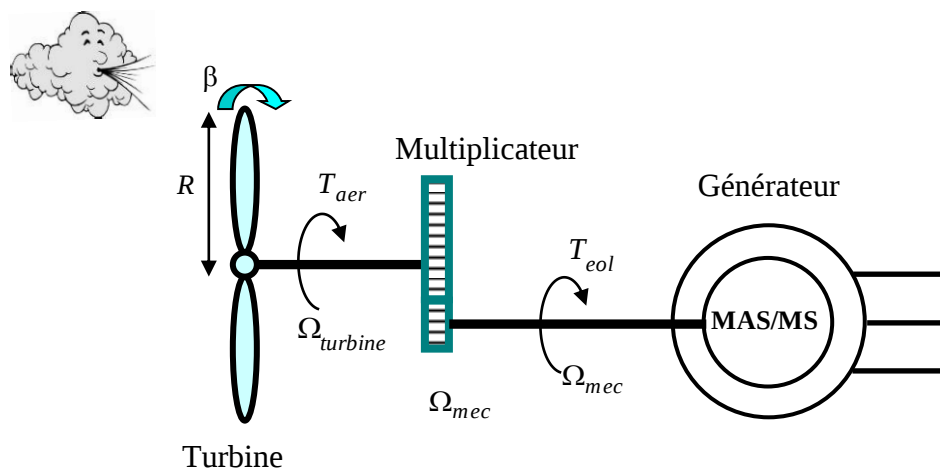


Figure (2-21) : Système éolien.

II.5.2.1 Modèle mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation de turbine $\Omega_{turbine}$, relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques.[08]

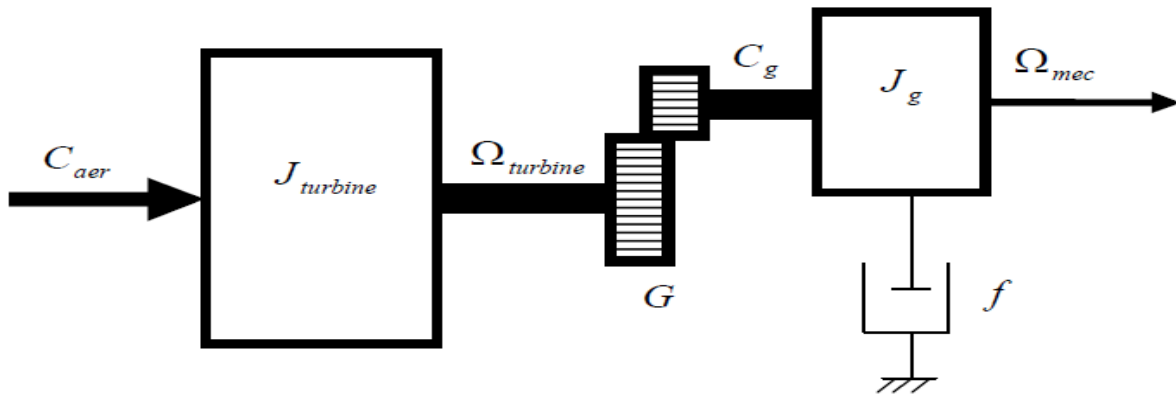


Figure (2-22) : Modèle mécanique de la turbine éolienne

$J_{turbine}$: Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne

J_g : Le moment d'inertie de la GSAP ;

f : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la GSAP ;

C_g : Le couple mécanique sur l'arbre de la GSAP ;

C_{mec} : La vitesse de rotation de la GSAP ;

II.5.2.2 Modèle énergétique de la turbine

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de l'expression suivante:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (2.62)$$

Où :

v : La vitesse du vent;

ρ : Densité de l'air (approximativement $1.22 \text{ Kg} / \text{m}^3$ 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;

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.63)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine [20].

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

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (2.64)$$

Où $\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine.

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée.

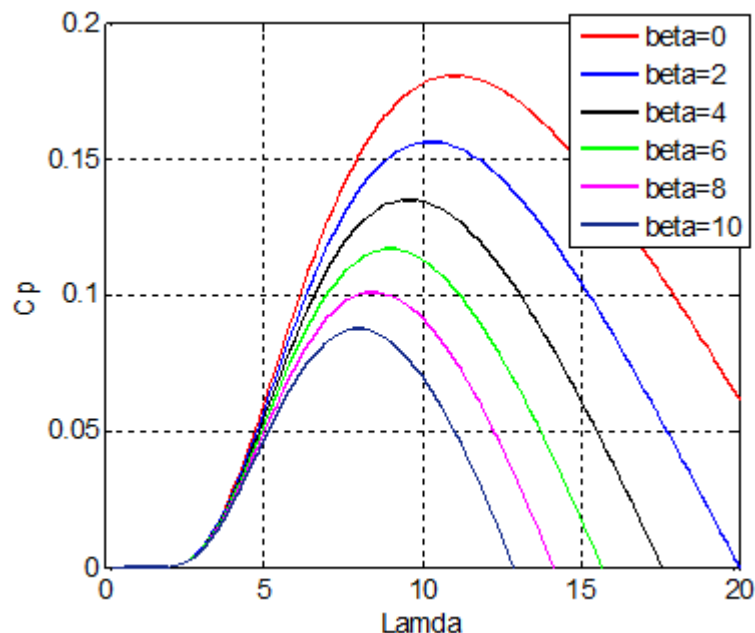


Figure (2-23) : Le coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse λ et l'angle de calage β .

A partir des relevées réalisées sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [30] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\lambda_i^{-21}} \quad (2.64)$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_P \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2.65)$$

II.5.2.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse adapte la vitesse lente de la turbine $\Omega_{turbine}$ à la vitesse rapide de la génératrice Ω_{mec} . Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.66)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.67)$$

Avec : G le gain du multiplicateur.

II.5.2.4. Equation dynamique de l'arbre de la génératrice

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ qui comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J_t constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.[08]

$$J_t = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.68)$$

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

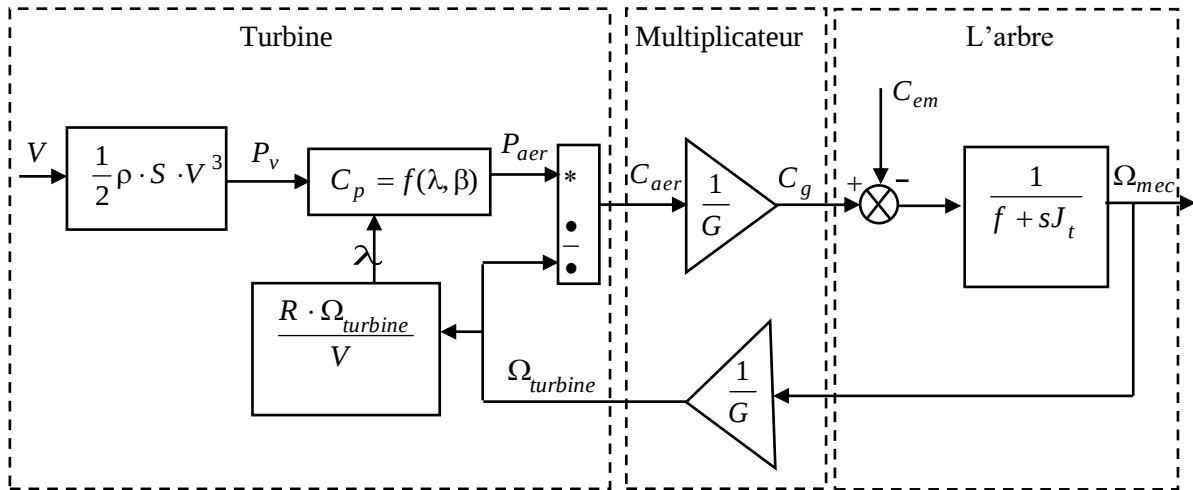
$$J_t = \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.69)$$

Où J_t 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 issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.70)$$

Le couple résistant dû aux frottements modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.71)$$



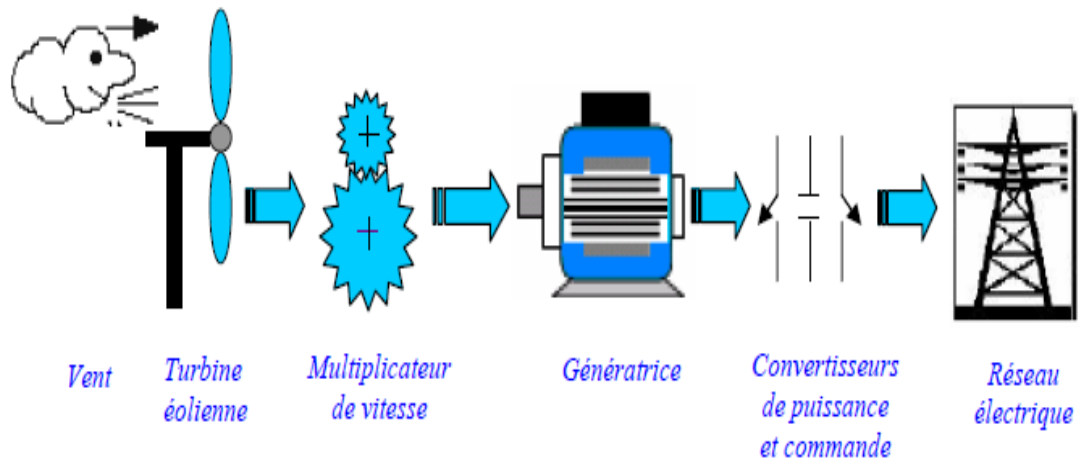


Figure (2-25) : Exemple d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

II.7.Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents. En premier lieu, nous avons donné une description sur les machines synchrone à aimants permanents, les types des machines synchrones utilisés, les avantages et inconvénients de la MSAP. Ensuite, nous avons présenté la modélisation mathématique de la machine électrique triphasée dans sa structure générale, avant d'arriver à un modèle définitif de la génératrice synchrone à aimants permanents. Ce modèle a été validé par une série de simulation.

Après avoir décrit les différentes topologies des convertisseurs statiques utilisés fréquemment dans les structures éoliennes basées sur la génératrice synchrone à aimants permanents, puis nous avons donné une descriptions sur la turbine et le modèle complet de la chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine, d'une génératrice synchrone à aimants permanents, d'un redresseur triphasé, d'un filtre et d'un onduleur triphasé. L'ensemble est relié à une charge triphasée. Il est claire que le profil du vent influe beaucoup sur la puissance mécanique de la turbine, et automatiquement sur la puissance électromagnétique de la génératrice, l'amplitude et la fréquence des tensions induites par la génératrice, et en fin sur l'amplitude et la fréquence des tensions générées par l'onduleur pour alimenter la charge triphasée.

Le chapitre suivant sera consacré au réglage des puissances statoriques dans un système éolien.

Chapitre III :

Régulations des puissances statoriques active et réactive

Sommaire

III.1. Introduction.....	63
III.2. La commande vectorielle.....	63
III.2.1. Principe générale de la commande vectorielle.....	64
III.3. Contrôle de la liaison au réseau électrique.....	64
III.3.1. Contrôle des courants injecté au réseau électrique.....	65
III.3.2. Réglage des puissances.....	67
III.3.3. Synthèse des correcteurs.....	70
III.3.4. Schéma bloc de Contrôle de la liaison au réseau électrique.....	72
III.3.5. Simulation sur Matlab/Simulink de contrôle des puissances de la liaison au Réseau électrique son régulation de puissance active.....	73
III.3.5.1. Bloc de simulation.....	73
III.3.5.2. Résultats de simulation.....	73
III.3.6. Relation entre les puissances de référence et la tension de bus continu...75	
III.3.7. Simulation sur Matlab/Simulink de contrôle des puissances de la liaison au Réseau électrique.....	78
III.3.7.1. Bloc de simulation.....	78
III.3.7.2. Résultats de simulation.....	78
III.4. Conclusion.....	80

II.1.Introduction

Après avoir modélisé la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, nous sommes en mesure de donner l'allure de la puissance électrique produite.

Toutefois, la puissance produite par l'éolienne varie énormément tout au long de la journée, car la puissance produite suit la puissance disponible dans le vent et présente les mêmes variations que ce dernier. Dans ce chapitre, nous allons proposer une étude développée sur un système de conversion éolienne permettant de produire une puissance constante dans un premier temps, puis variable dans un second, tout en offrant des services, tel que la correction de la puissance réactive fournie. La commande de puissance réactive permet d'offrir un service appréciable et utile pour la gestion et le maintien du plan de tension au réseau auquel l'éolienne est connectée [19].

Ce chapitre présentera le fonctionnement d'un système éolien à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent avec contrôle des puissances statoriques active et réactive injectées au réseau électrique.

III.2.La commande vectorielle

L'application de la commande vectorielle à la machine synchrone à aimants permanents permet de la modéliser suivant deux axes perpendiculaires d'une manière indépendante afin d'avoir un fonctionnement similaire à une machine à courant continu. Ceci concilie les avantages des propriétés du moteur à courant continu et de l'absence du collecteur mécanique. Le contrôle du couple d'une machine à courant alternatif nécessite un contrôle en phase et en amplitude des courants d'alimentation d'où le nom de contrôle vectoriel. Physiquement, cette stratégie revient à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation. [22]

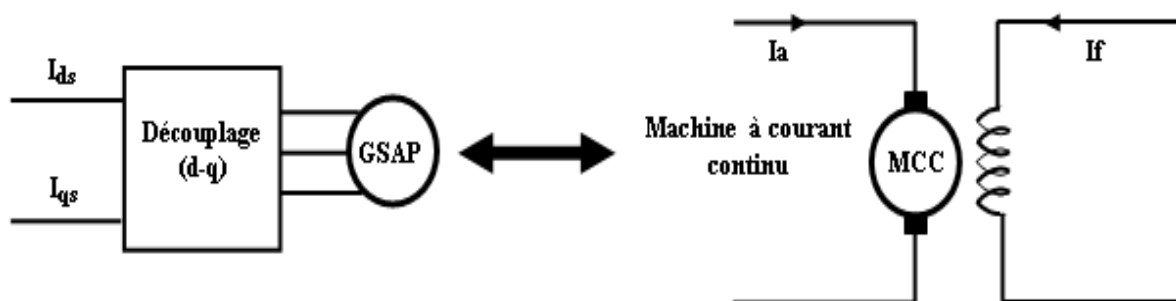


Figure (3-1) : Equivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une GSAP.

III.2.1. Principe générale de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle avec alimentation en tension et commande en courant, permet d'imposer le couple électromagnétique de la machine. Or, quel que soit le but de la commande (régulation de couple, de vitesse ou de position), le contrôle des courants reste cependant nécessaire.

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines à courant alternatif. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (i_{ds}, i_{qs}) en quadrature dans un référentiel lié aux champs tournant de façon que l'une des composantes (i_{qs}) commande le couple et l'autre (i_{ds}) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée [26].

III.3. Contrôle de la liaison au réseau électrique

L'ensemble de la production d'énergie est connecté au réseau triphasé via un convertisseur à MLI et un transformateur, entre lesquels s'insère un filtre triphasé. Le rôle du convertisseur à MLI est de régler les puissances active et réactive quel que soit la variation de la tension de bus continu, en générant un courant nécessaire pour la régulation des puissances. [22]

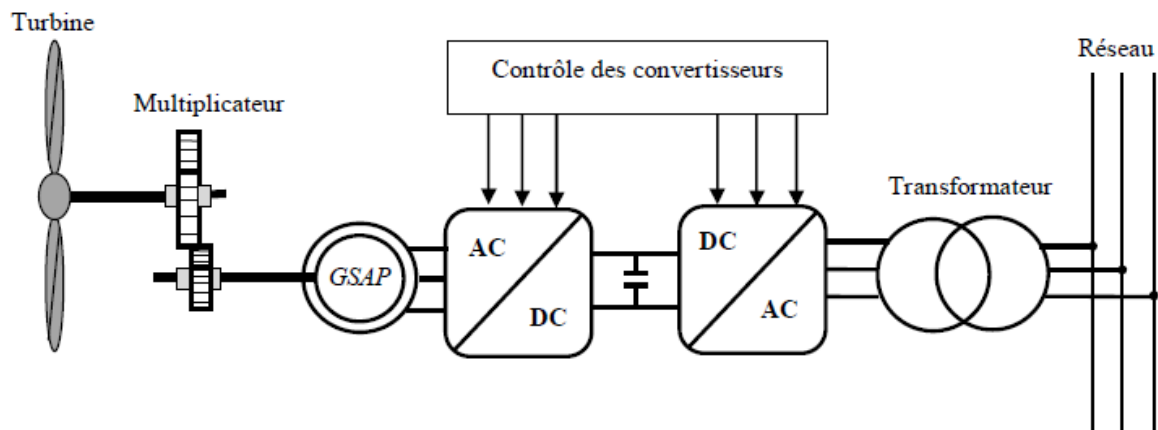


Figure (3-2) : Exemple d'une éolienne à vitesses variables connectée au réseau via des convertisseurs statiques.

La Figure (3-3) représente Schéma simplifié de la liaison de bus continu au réseau électrique.

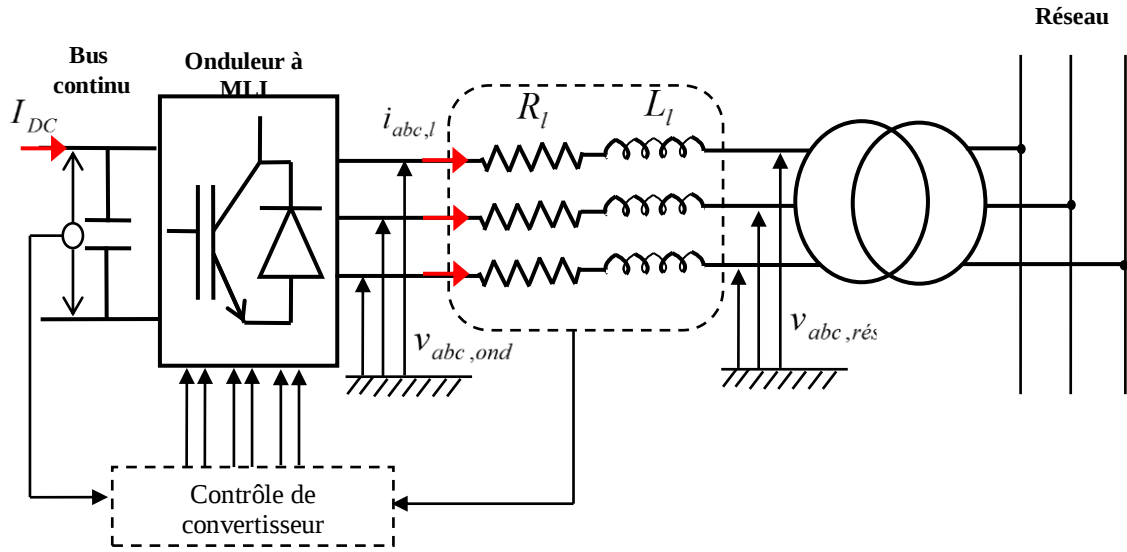


Figure (3-3): Schéma simplifié de la liaison de bus continu au réseau électrique.

III.3.1. Contrôle des courants injecté au réseau électrique

D'après la figure ci-dessus, on obtient un modèle simple qui exprime la relation entre la tension du côté onduleur et celle du réseau électrique :

$$\begin{cases} v_{a,ond} - v_{a,res} = R_l i_{a,l} + \frac{d}{dt} \phi_{a,l} \\ v_{b,ond} - v_{b,res} = R_l i_{b,l} + \frac{d}{dt} \phi_{b,l} \\ v_{c,ond} - v_{c,res} = R_l i_{c,l} + \frac{d}{dt} \phi_{c,l} \end{cases} \quad (3.1)$$

D'après Park on obtient :

$$\begin{cases} v_{d,ond} - v_{d,res} = R_l i_{d,l} + L_l \frac{d}{dt} i_{d,l} - \omega_s L_l i_{q,l} \\ v_{q,ond} - v_{q,res} = R_l i_{q,l} + L_l \frac{d}{dt} i_{q,l} + \omega_s L_l i_{d,l} \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec la transformé de Laplace, nous écrivons :

$$\begin{cases} v_{d,ond} - v_{d,res} + \omega_s L_l i_{q,l} = (R_l + L_l p) i_{d,l} \\ v_{q,ond} - v_{q,res} - \omega_s L_l i_{d,l} = (R_l + L_l p) i_{q,l} \end{cases} \quad (3.3)$$

Ou :

$$\begin{cases} i_{d,1} = \frac{1}{L_l \cdot p + R_l} (v_{d,ond} - v_{d,res} + \omega_s L_l i_{q,l}) \\ i_{q,1} = \frac{1}{L_l \cdot p + R_l} (v_{q,ond} - v_{q,res} - \omega_s L_l i_{d,l}) \end{cases} \quad (3.4)$$

A partir de ces équations, nous pouvons tracer le schéma bloc du modèle simplifié des courants transités vers le réseau dans le repère de Park suivant la figure (3-4) :

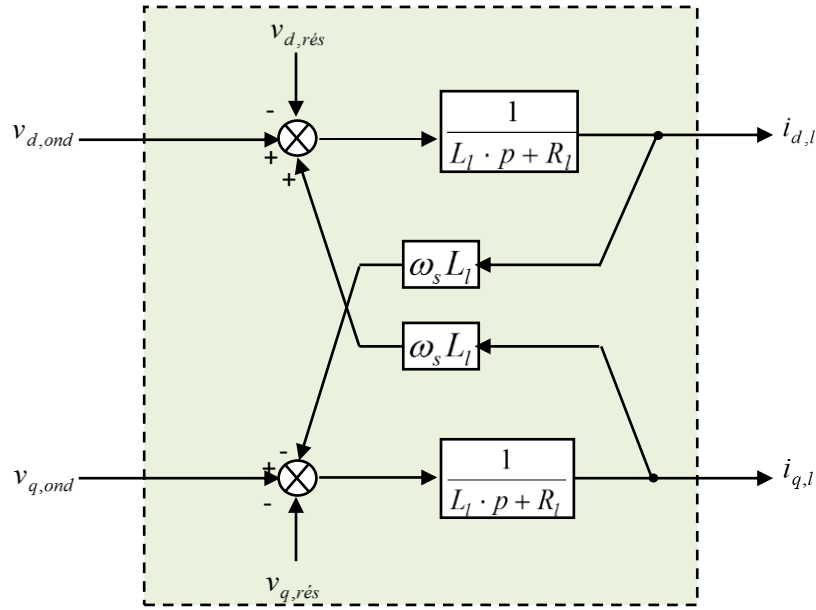


Figure (3-4) : Modèle simplifié des courants injectés au réseau dans le repère de Park.

En posant les $i_{dq,l}$ suivantes :

$$\begin{cases} e_{d,l} = \omega_s L_l i_{q,l} \\ e_{q,l} = -\omega_s L_l i_{d,l} \end{cases} \quad (3.5)$$

Donc l'équation (3.6) devient :

$$\begin{cases} i_{d,1} = \frac{1}{L_l \cdot p + R_l} (v_{d,ond} - v_{d,res} + e_{d,l}) \\ i_{q,1} = \frac{1}{L_l \cdot p + R_l} (v_{q,ond} - v_{q,res} - e_{q,l}) \end{cases} \quad (3.6)$$

Avant de faire le réglage des courants injectés au réseau électrique, il est nécessaire de réaliser un découplage pour commander séparément les courants. Dans ce cas, nous utilisons le découplage par compensation. Pour rendre les axes d et q complètement indépendants.

Le réglage des courants $i_{dq,l}$ nécessite l'ajout d'un correcteur (PI) permettant d'optimiser les performances du système :

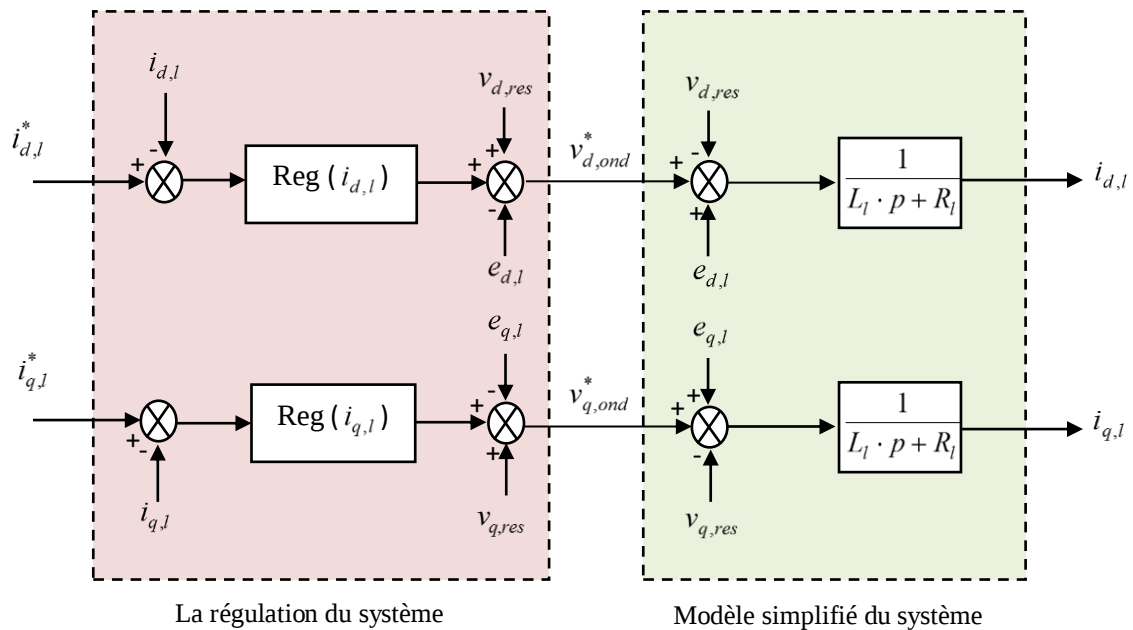


Figure (3-5) : schéma block de contrôle des courants injectés au réseau électrique.

III.3.2. Réglage des puissances

Il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine : [08]

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un correcteur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode est appelée **méthode directe** car les correcteurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode est appelée **méthode indirecte**.

Les puissances active et réactive injectées dans le réseau électrique sont données dans le modèle de Park par les relations suivantes :

$$\begin{cases} P_1 = \frac{3}{2}(v_{d,rés} \cdot i_{d,l} + v_{q,rés} \cdot i_{q,l}) \\ Q_1 = \frac{3}{2}(v_{q,rés} \cdot i_{d,l} - v_{d,rés} \cdot i_{q,l}) \end{cases} \quad (3.7)$$

Le principe d'orientation consiste à aligner la tension $v_{dq,rés}$ sur l'axe en quadrature du repère de Park [19], [27]. Il est illustré par la figure (3-6) :

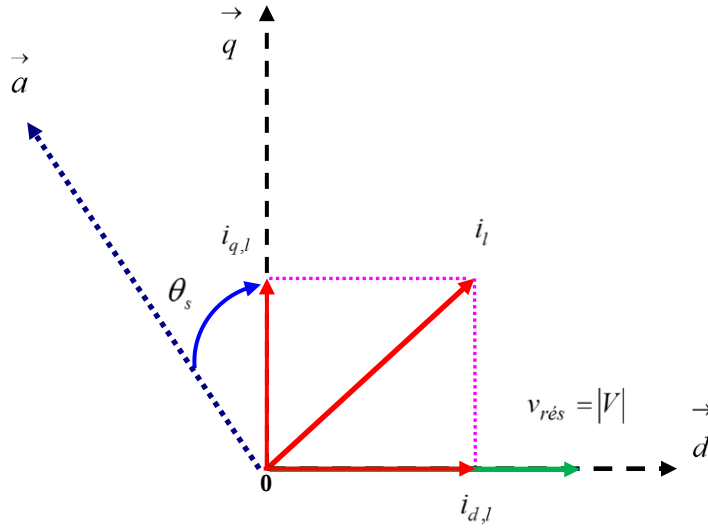


Figure (3.6) : Orientation de l'axe d sur la tension $v_{rés}$

Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} v_{d,rés} = |V| \\ v_{q,rés} = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Les expressions des puissances actives et réactives deviennent alors sous la forme suivante [27]:

$$\begin{cases} P_l = \frac{3}{2} \cdot |V| \cdot i_{d,l} \\ Q_l = -\frac{3}{2} \cdot |V| \cdot i_{q,l} \end{cases} \quad (3.9)$$

Si on a les puissances de référence P_1^* et Q_1^* on peut écrire :

$$\begin{cases} i_{d,l}^* = \frac{3}{2 \cdot |V|} \cdot P_l^* \\ i_{q,l}^* = -\frac{3}{2 \cdot |V|} \cdot Q_l^* \end{cases} \quad (3.10)$$

Alors, le schéma bloc de régulation des courants par les puissances est réalisé comme suit :

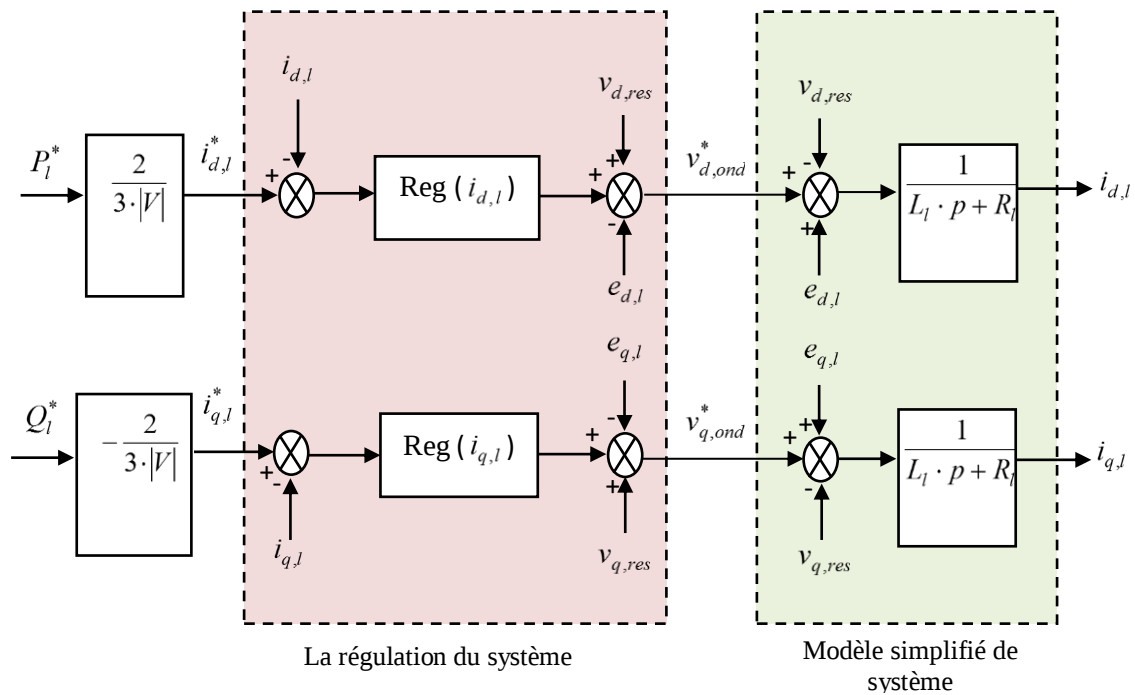


Figure (3-7): schéma bloc de contrôle des courants injectés dans le réseau électrique.

Nous aboutissons alors aux schémas blocs simples et identiques pour les deux courants injectés dans le réseau électrique :

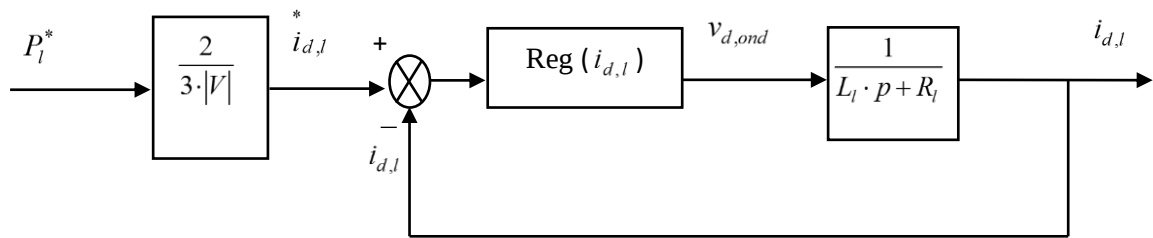


Figure (3.8) : Boucle de régulation en puissance du courant $i_{d,l}$

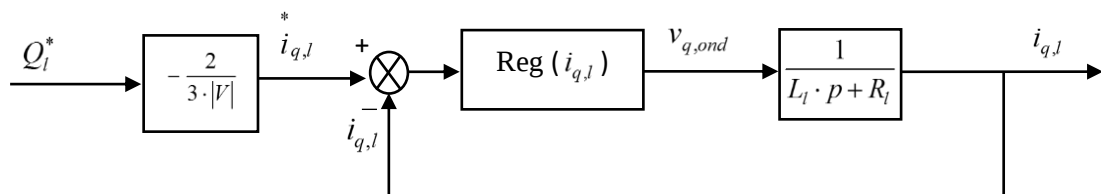


Figure (3-9): Boucle de régulation en puissance du courant $i_{q,l}$

III.3.3. Synthèse des correcteurs

Le correcteur Proportionnelle Intégrale (PI) utilisé pour le réglage des courants de la GSAP est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. L'action proportionnelle sert à régler la rapidité de la dynamique du système, alors que l'action intégrale permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir. Sa fonction de transfert est: [08]

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (3.11)$$

D'après les figures (3-8) et (3-9), la fonction de transfert en boucle ouverte $F(s)$ est donnée par:

$$F(s) = \frac{A}{1 + T \cdot p} \quad (3.12)$$

Avec :

$$\begin{cases} A = \frac{1}{R_s} \\ T = \frac{L_s}{R_s} \end{cases} \quad (3.13)$$

Les boucle de régulation des courants $i_{d,l}$, $i_{q,l}$ est représentés par la figure (3-10) :

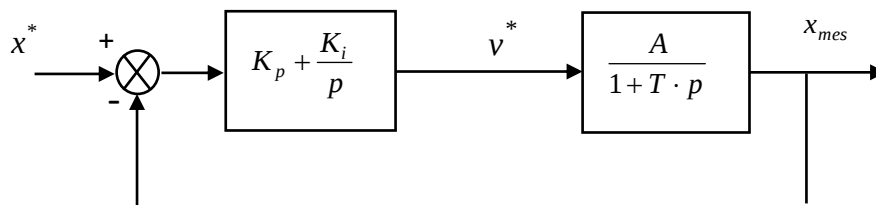


Figure (3.10) : Système à régulé par un correcteur PI.

La fonction transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les correcteurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{\frac{A}{T} (K_p \cdot P + K_i)}{P^2 + P \left(\frac{1 + A \cdot K_p}{T} \right) + \frac{A \cdot K_i}{T}} \quad (3.14)$$

Le dimensionnement du correcteur est fait à l'aide du principe d'imposition des pôles. Comme le polynôme caractéristique de l'équation (3.11) est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles à partie réelle négative. Pour avoir plus de souplesse dans le choix des dynamiques de régulation, nous utilisons le faisceau de courbes présenté à l'annexe B pour lequel le dénominateur des fonctions de transfert correspondantes est de la forme :

$$D(s) = P^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot P + \omega_0^2 \quad (3.15)$$

Ainsi, nous obtenons les paramètres du correcteur, en fonction de l'amortissement ξ et la Pulsation propre ω_0 .

Avec :

$$\begin{cases} K_p = \frac{(2 \cdot T \cdot \xi \cdot \omega_0 - 1)}{A} \\ K_i = \frac{T \cdot \omega_0^2}{A} \end{cases} \quad (3.16)$$

▪ **Correcteur de courant $i_{d,l}$**

	$K_{p_{id,l}}$	$K_{i_{id,l}}$
Correcteur PI	12.6000	1210

Tableau 3.1 : Paramètres du correcteur PI de courant $i_{d,l}$.

▪ **Correcteur de courant $i_{q,l}$**

	$K_{p_{iq,l}}$	$K_{i_{iq,l}}$
Correcteur PI	12.6000	1210

Tableau 3.2 : Paramètres du correcteur PI de courant $i_{q,l}$.

III.3.4. Schéma bloc de Contrôle de la liaison au réseau électrique

La figure ci-dessous représente le schéma bloc de la régulation des courants injectés au réseau. Le principe consiste à contrôler les courants $i_{dq,l}$ par le réglage des puissances active et réactive (P_l^* et Q_l^*). Les tensions de référence ($v_{d,ond}^*$; $v_{q,ond}^*$) sont contrôlées par le réglage des courants ($i_{dq,l}$). Le bus continu est connecté directement au convertisseur à MLI.

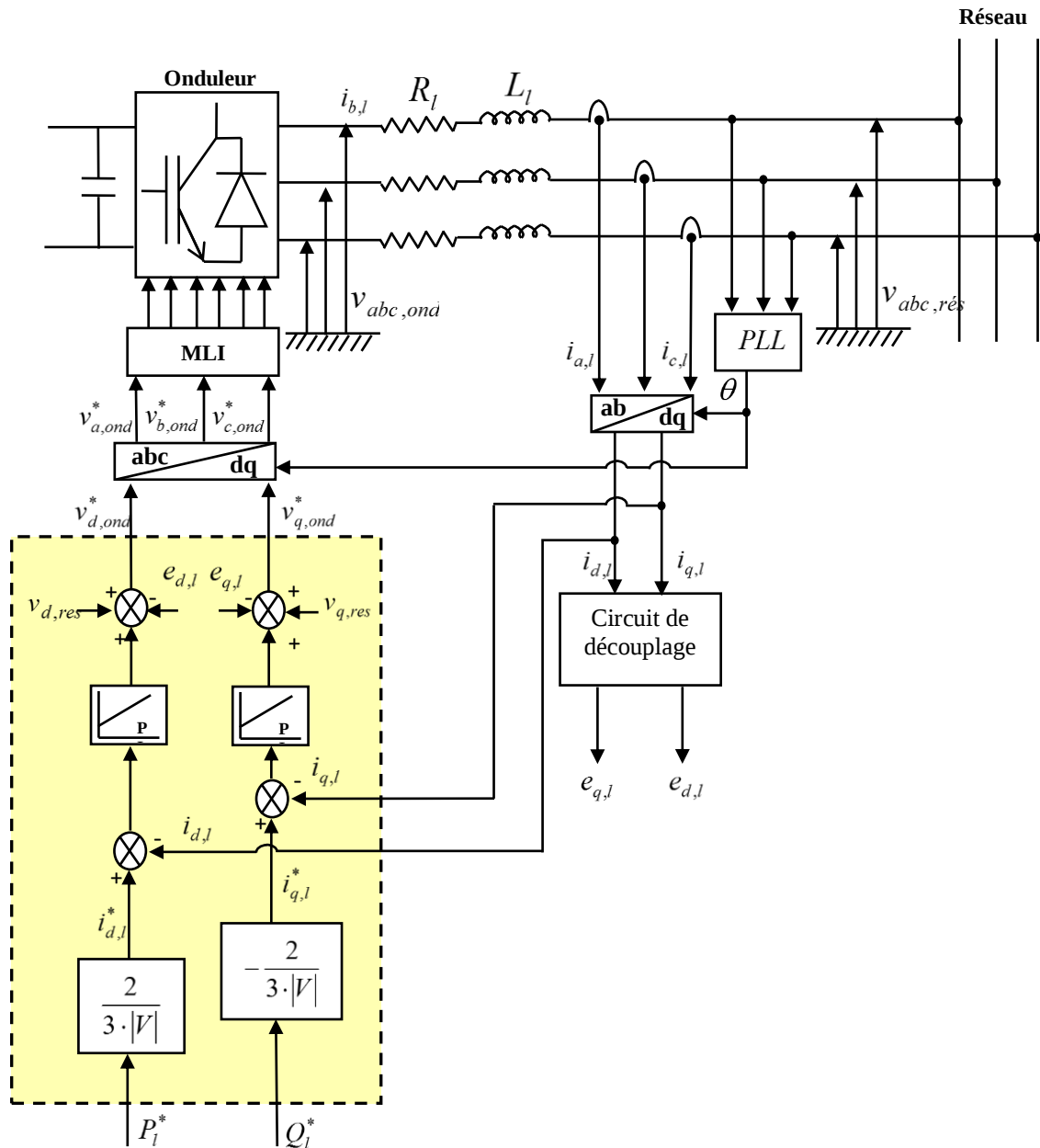


Figure (3-11) : Schéma bloc de contrôle de la liaison au réseau électrique.

III.3.5. Simulation sur Matlab/Simulink de contrôle des puissances de la liaison au réseau électrique son régulation de puissance active

III.3.5.1. Bloc de simulation

Nous avons supposé que $P_l^* = 4000W$

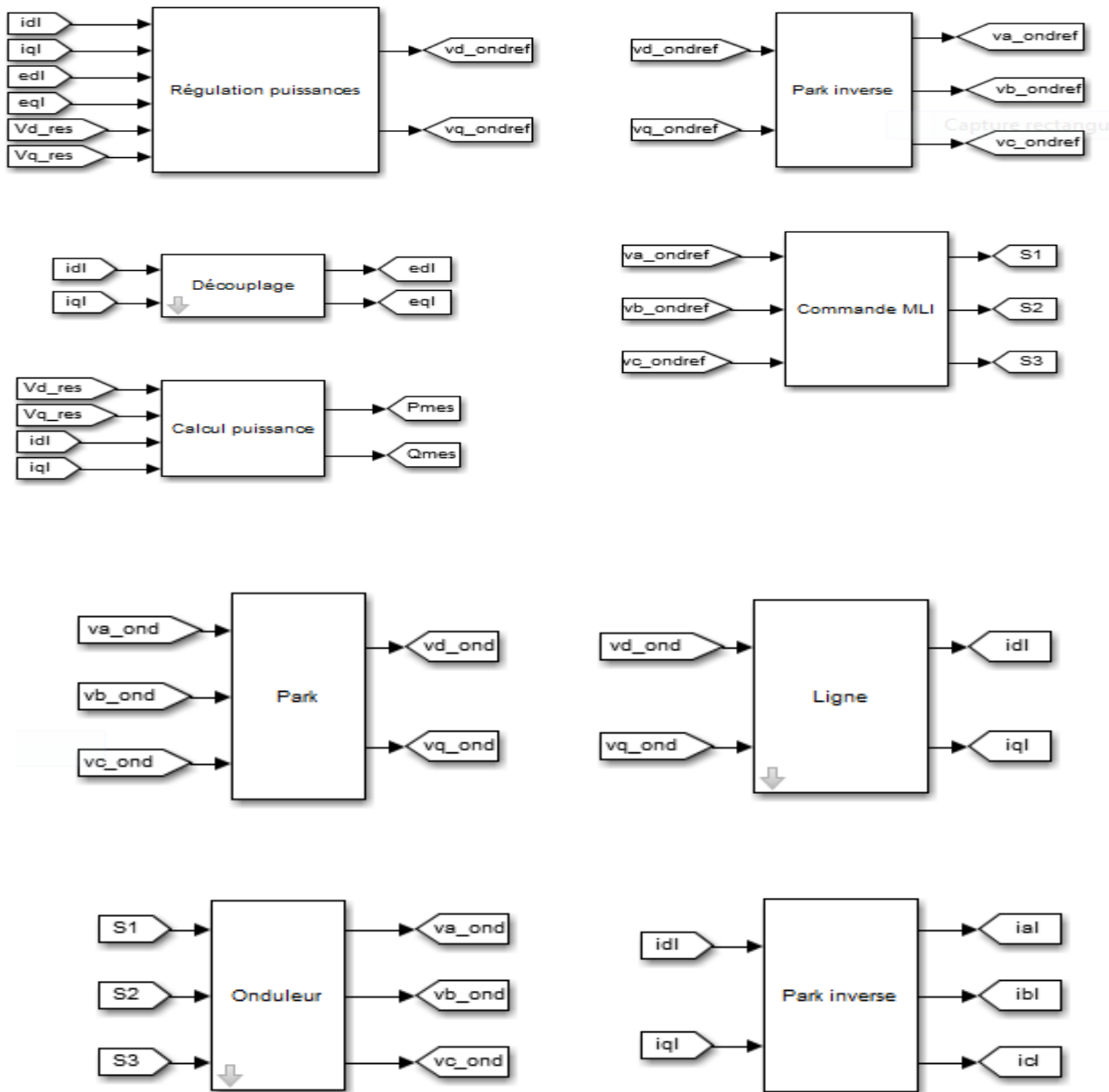


Figure (3-12) : Schéma bloc de simulation de contrôle des puissances de la liaison au réseau électrique son régulation de puissance active.

III.3.5.2. Résultats de simulation

Les résultats de simulation de contrôle des puissances de la liaison au réseau électrique, ont été implantés sous MATLAB/Simulink.

Dans cette section, on est amené à représenter les figures de simulation des puissances active et réactive injecté au réseau électrique, qui nous permettent d'évaluer les performances apportées son système de régulation.

1. Évolution des puissances injectées au réseau électrique :

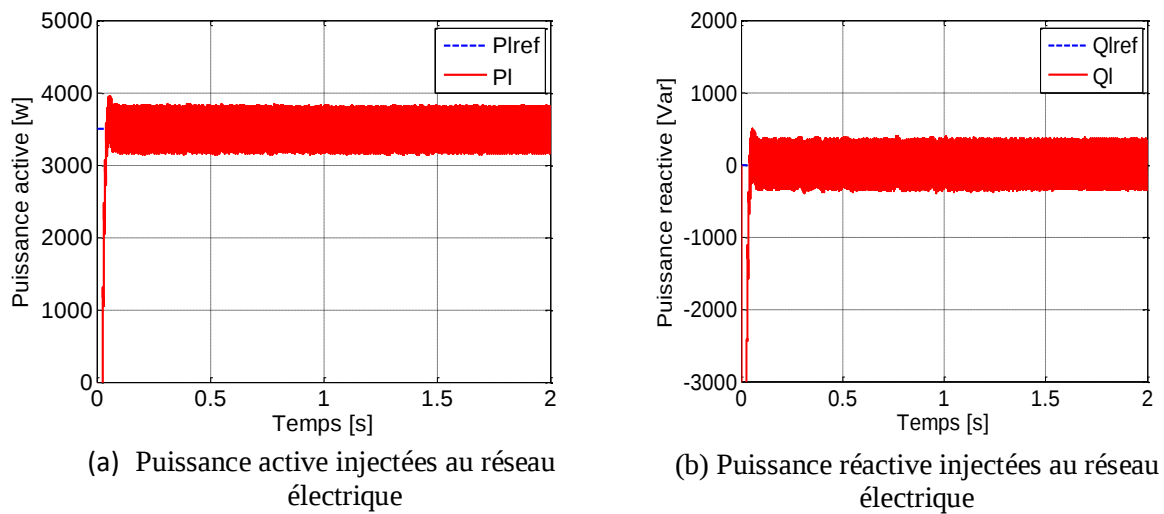
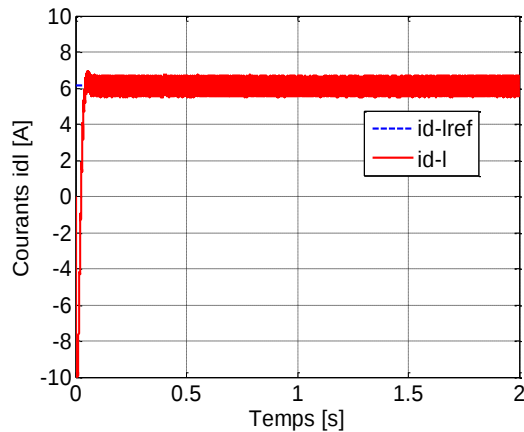


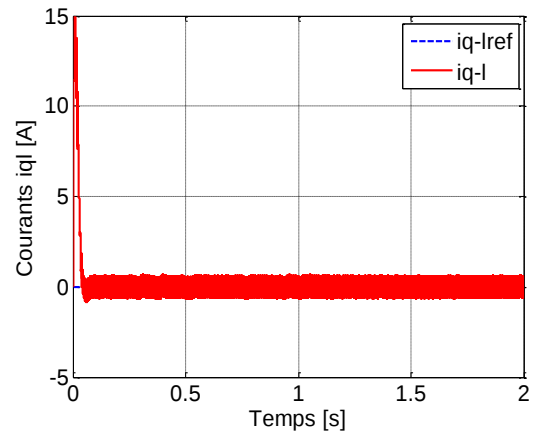
Figure (3-13): Puissance active et réactive injectées au réseau électrique.

La simulation de cette régulation sur MATLAB a donné de bons résultats en termes de dynamique et de réponse aux échelons pour la puissance réactive, comme on peut le voir sur la figure (3-13).

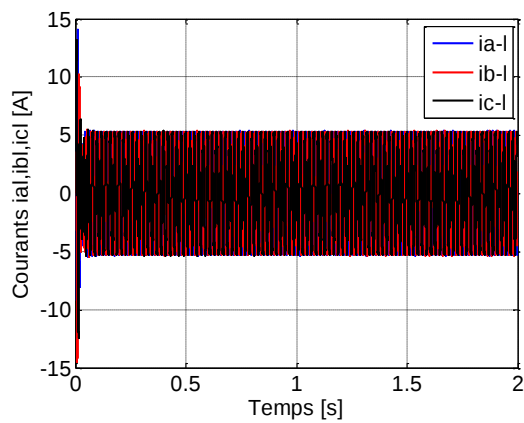
2.Évolution des courants injectés au réseau électrique :



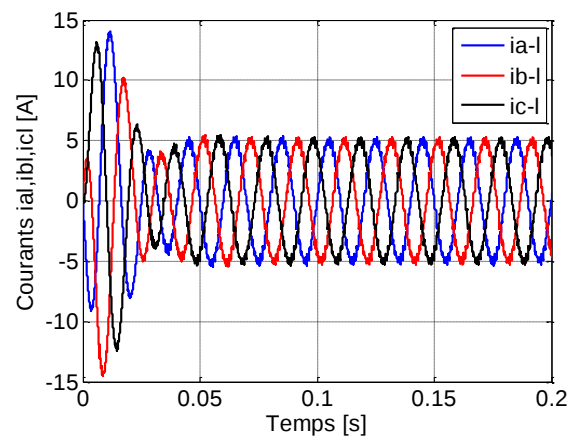
(c) Courants direct injectés au réseau électrique



(d) Courants en quadrature injectés au réseau électrique



(e) Courant réel injecté au réseau électrique



(f) Zoom sur courant réel injecté au réseau électrique

Figure (3-14) : courants direct et en quadrature injectés au réseau électrique, et Courant réel injecté au réseau électrique.

La figure (3-14) représente l'allure des courants directs et en quadrature injectés au réseau électrique, Le courant $i_{d,l}$ est maintenu à la valeur (6A), tandis que le courant $i_{q,l}$ prend une valeur nulle.

III.3.6. Relation entre les puissances de référence et la tension de bus continu

La puissance active à la sortie du redresseur à MLI peut être calculée par l'expression suivante :

$$P_{bus_continu} = I_{DC} \cdot V_{DC} \quad (3.17)$$

Si on néglige les pertes du redresseur à MLI et de la ligne de connexion devant la puissance mise en jeu, on peut écrire :

$$P_l = P_{bus_continu} \quad (3.18)$$

Donc :

$$P_l = \frac{3}{2} \cdot |V| \cdot i_{d,l} = I_{DC} \cdot V_{DC} \quad (3.19)$$

D'après les références bibliographiques [28], [29], la relation entre la puissance active de référence et la tension de bus continu s'exprime par le schéma bloc suivant :

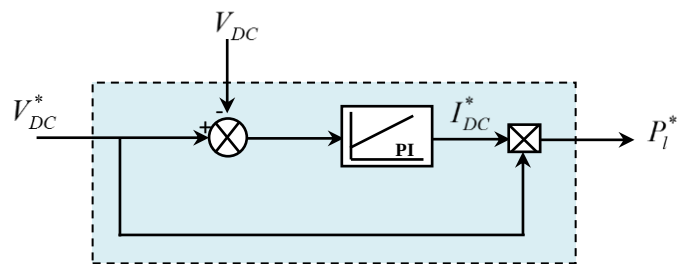


Figure (3-15) : Schéma bloc présente la relation entre la puissance active de référence et la tension de bus continu.

▪ **Correcteur de puissance P_l^***

	K_{p_PI}	K_{i_PI}
Correcteur PI	0.4000	100

Tableau 3.3 : Paramètres du correcteur PI de puissance P_l^* .

La puissance réactive de référence est choisie selon un système fonctionne à facteur de puissance unitaire, c'est-à-dire $Q_l^* = 0$.

Enfin, le schéma global de simulation est donné par la figure (3-16)

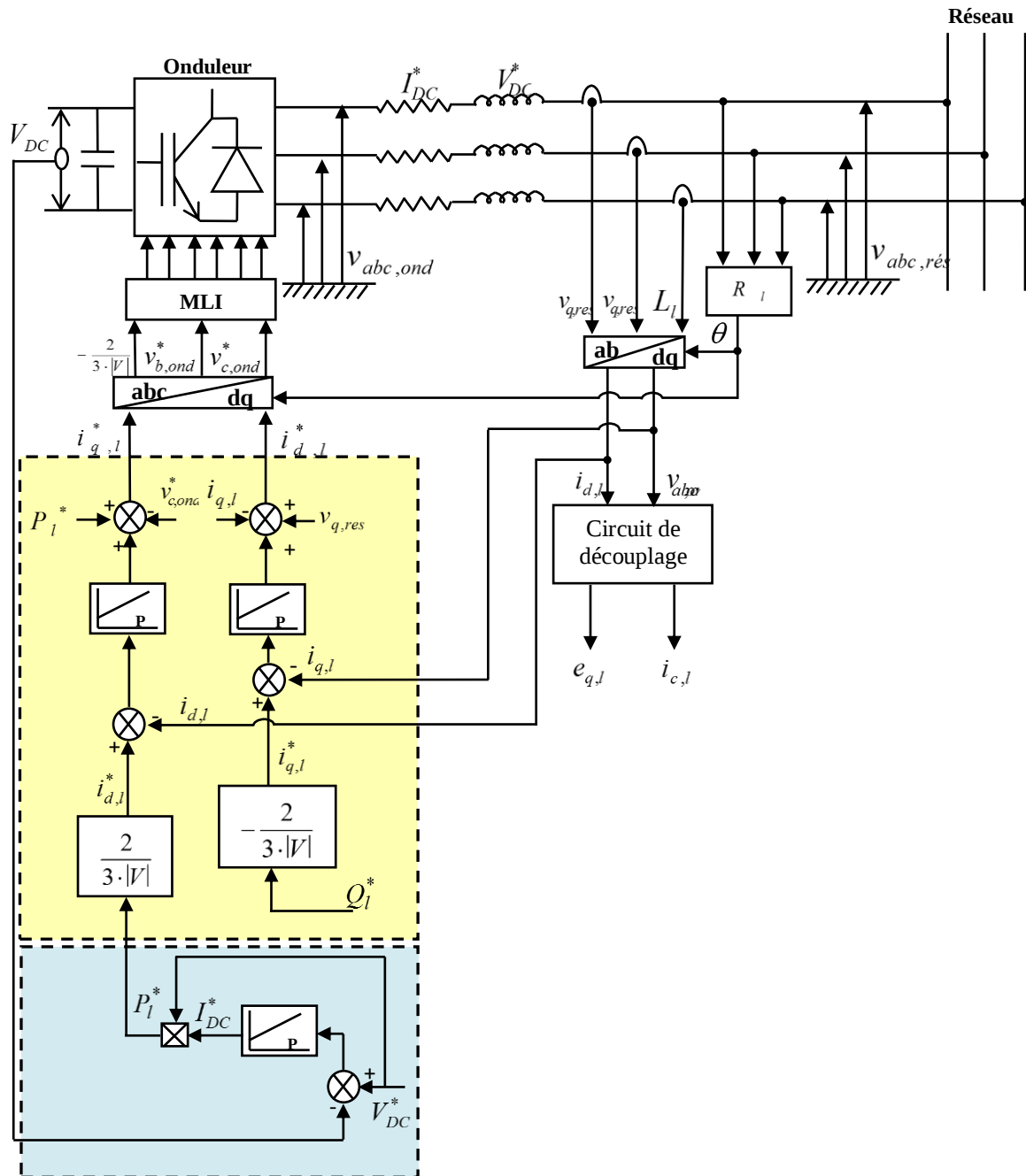


Figure (3-16) : Le schéma bloc de contrôle des puissances de la liaison au réseau électrique.

III.3.7.Simulation sur Matlab/Simulink de contrôle des puissances de la liaison au réseau électrique

III.3.7.1.Bloc de simulation

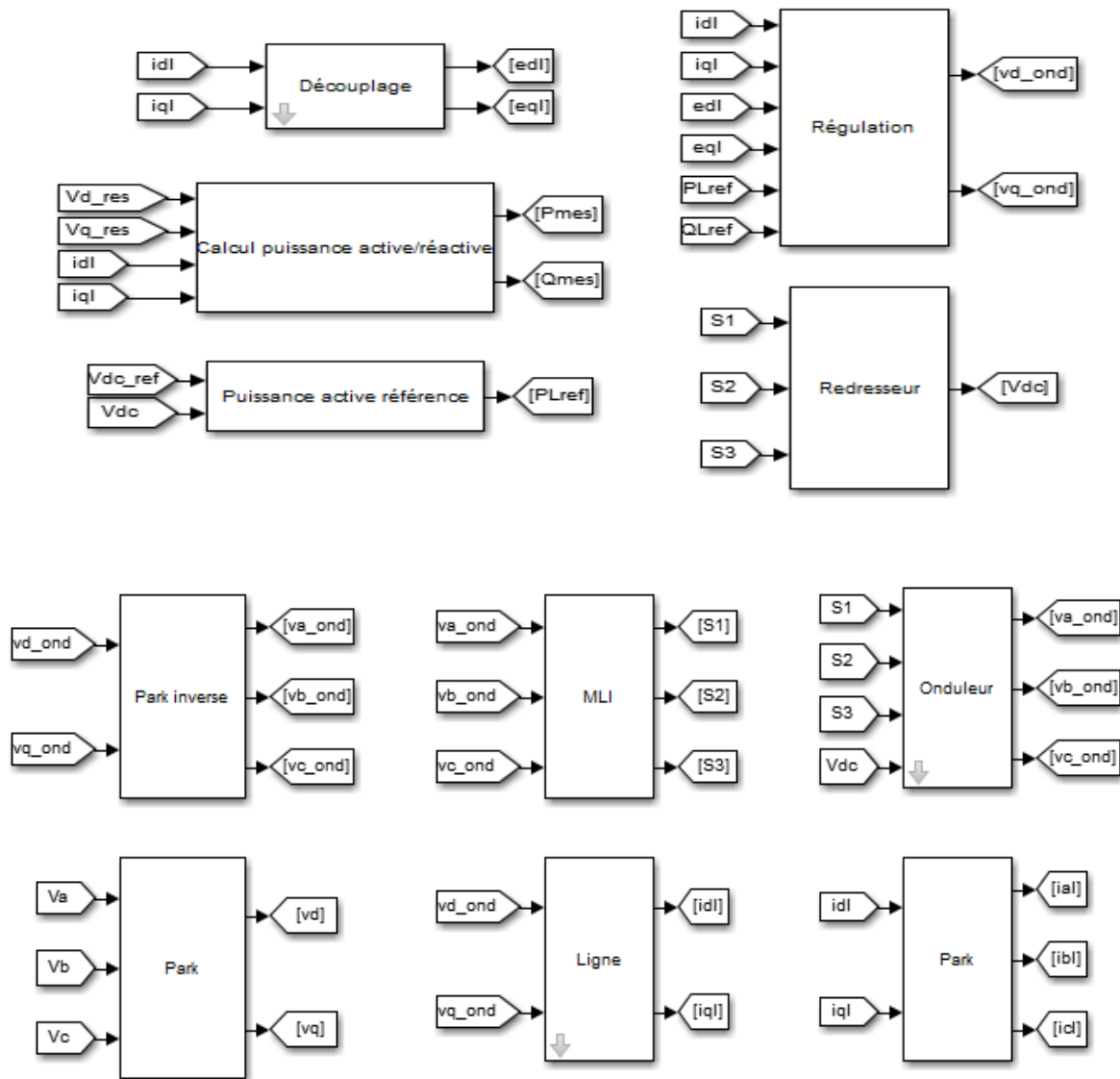


Figure (3-17) : Schéma bloc de simulation de contrôle des puissances de la liaison au réseau électrique.

III.3.7.2.Résultats de simulation

Dans cette section, on est amené à représenter les figures de simulation des puissances active et réactive injecté au réseau électrique, qui nous permettent d'évaluer les performances apportées par le système de régulation de puissance active.

1.Évolution des puissances injectées au réseau électrique :

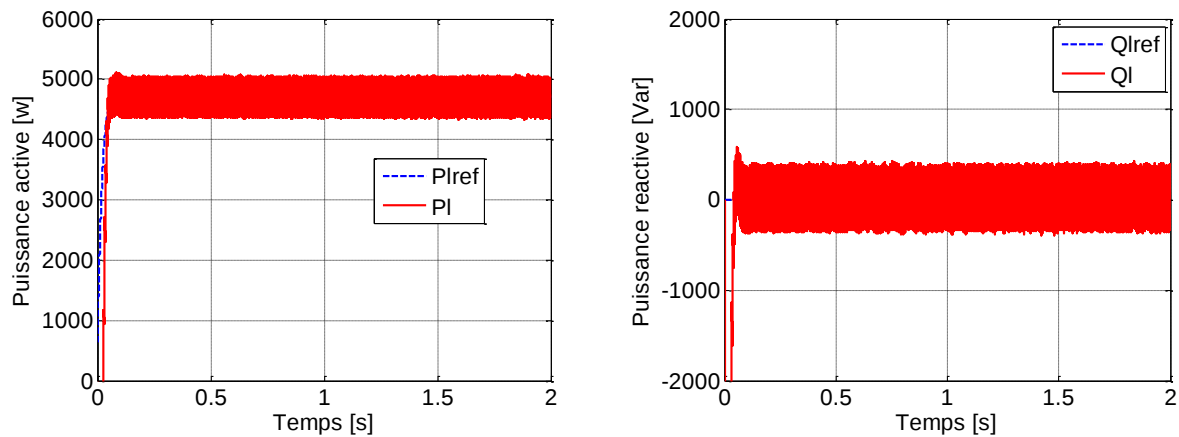


Figure (3-18) : Puissance active et réactive injectées au réseau électrique.

2.Évolution des courants injectés au réseau électrique :

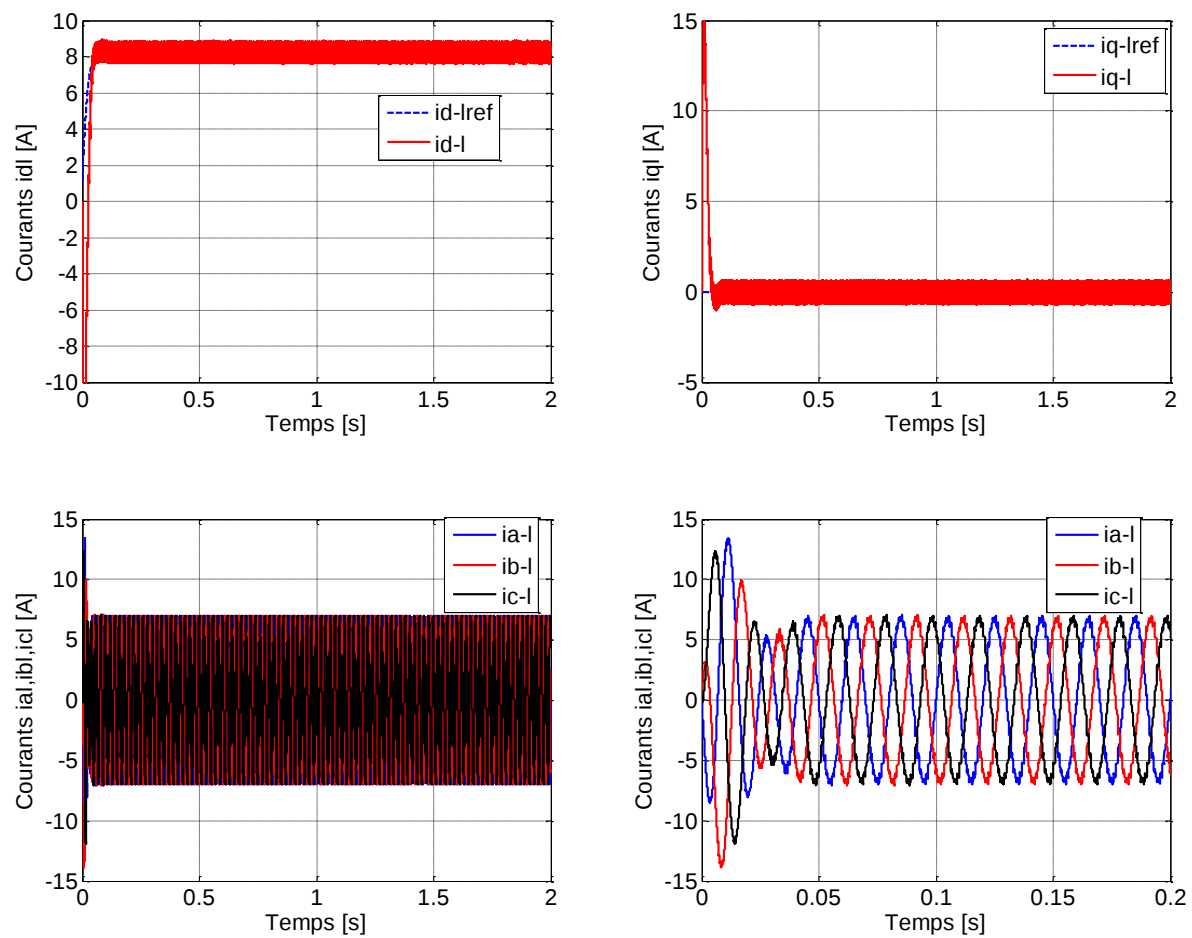


Figure (3-19) : Courant réel injecté au réseau électrique.

La simulation de cette régulation sur MATLAB a donné de bons résultats en termes de dynamique et de réponse aux échelons pour la puissance réactive, comme on peut le voir sur la figure (3-18).

La figure (3.19) représente l'allure des courants direct et en quadrature injectés au réseau électrique, Le courant $i_{d,l}$ est maintenu à la valeur (8 A), tandis que le courant $i_{q,l}$ prend une valeur nulle.

Les courants réels injectés au réseau électrique prennent sa forme naturelle alternative sinusoïdale.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que cette méthode de régulations utilisant des correcteurs PI présente un bon découplage et un réglage des puissances active et réactive au niveau de la liaison au réseau électrique et une bonne poursuite des valeurs de références imposées.

III.4.Conclusion

La stratégie de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la GSAP basée sur l'aspect de découplage des axes d et q. Nous avons développé deux méthodes de contrôle des puissances de la machine à savoir : le contrôle direct et le contrôle indirect.

Dans ce chapitre, nous avons établi le schéma de commande des puissances basé sur un régulateur PI, afin de permettre le contrôle de celles-ci selon les objectifs recherchés.

Les résultats de simulation ont montré la possibilité d'extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent, de réguler les courants statorique de la génératrice, et de contrôler les puissances active et réactive échangées avec le réseau.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons abordé un sujet important et en plein développement, c'est le contrôle et la régulation d'un système éolien à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents pour la production d'énergie électrique. L'objectif principal de ce mémoire concerne, l'étude, la modélisation et la simulation de la chaîne complète du système éolien.

Au début, nous avons présenté une généralité sur l'énergie éolienne en rendant compte de l'état actuel de l'exploitation mondiale de ce créneau énergétique. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Une comparaison entre les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe nous a permis de choisir un système à vitesse variable. Puis la comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir de porter notre étude sur un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents MSAP.

La génératrice synchrone à aimants permanents est destinée à la production d'énergie dans le domaine éolien. 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. L'écriture de ces équations dans le repère de Park a été exploitée pour effectuer la commande vectorielle qui permet d'assimiler la MSAP à une machine à courant continu à excitation séparée afin de faciliter son étude et notamment sa simulation sous Matlab-Simulink.

La commande vectorielle élaborée dans le cadre de la liaison du convertisseur AC/DC à la génératrice est utilisée pour le réglage des courants électriques au niveau statorique et de la tension du bus continu. Dans la partie de la liaison du convertisseur DC/AC à MLI au réseau électrique, nous avons présenté l'étude théorique de la régulation des puissances active et réactive injectées au réseau. Le rôle du convertisseur DC/AC à MLI est de régler les puissances active et réactive quel que soit la variation de la tension de bus continu, en générant un courant nécessaire pour la régulation de ces puissances.

Le bon suivi des consignes pour les deux puissances active et réactive par les puissances injectées au réseau électrique a montré l'efficacité de la commande appliquée.

A l'égard du travail que nous venons de présenter, des perspectives pouvant être envisagés pour l'amélioration de la chaîne turbine éolienne - GSAP - réseau. Parmi les quels nous pouvons citer :

- ✓ L'étude et l'application d'autres convertisseurs au niveau de la liaison du convertisseur AC/DC à la génératrice pour obtenir une tension de bus continu constante et parfaitement stable.
- ✓ La réalisation pratique puis une implantation en site isolé de ce système éolien à base d'une GSAP.

Bibliographie

Bibliographie

- [01] : **O.Bouhali**, « Contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et Ecole Centrale de Lille, 17 Avril 2007.
- [02] : **F.Poitier**, « Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne – Machine asynchrone à cage autonome – Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [03] : **O.Gergoud**, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », > Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Ecole Normale supérieure de Cachan, 2002.
- [04] : **Riolete E**, « Le mini-éolien » © Groupe Eyrolles, 2007.
- [05] : **Hau E**, « Wind turbines, Fundamentals, Technologies, Applications, Economics », Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [06] : **Arnaud G**, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I- 2010.
- [07] : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne
- [08] : **Kh. Belgacem** « Optimisation des performances des systèmes énergétiques dans la production d'énergie éolienne à vitesse variable », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université DJILLALI Liabes, Sidi-Bel-Abbès (Algérie), 2014.
- [09] : **Kasbadji Merzouk N**, « Evaluation du Gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profile vertical de la vitesse de vent en Algérie » thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, 2006.
- [10] : **Guerri O**, « L'Énergie éolienne en Algérie : Un bref aperçu » Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 Centre de Développement des Energies Renouvelables Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique 2011

- [11] : **Ghennam Tarak**, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger 2011
- [12] : **P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI**, « Éoliennes » ; Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Mécanique, pp. BM 4 640 1 -BM 4 640 21.
- [13] : **J. MARTIN**, « Énergies éoliennes » ; Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Énergétique pp. B 8585 1- B 8 585 21.
- [14] : **F. POITIERS**, « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [15] : **D.youcef**, «Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien », Mémoire du diplôme de magister, université Djilali liabes de sidi bel-abbés Soutenu le : 13-12-2009.
- [16] : **Diop A. D**, « Contribution au Développement d'un Simulateur Electromécanique D'Aérogénérateurs : Simulation et Commande en Temps Réel d'une Turbine de Puissance Moyenne à Angle de Calage Variable », Thèse de doctorat, Université du Havre, 8 juillet 1999.
- [17] : **Fraisse J. L**, « Le raccordement de la production décentralisée en HTA et BT », Revue REE, n°7, Juillet 2002.
- [18] : **Francois B, B. Robyns, E. De Jaeger, F. Minne**, « Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension », Revue REE, no. 5, pp 65-74, Mai 2005.
- [19] : **H.Samira, BOUREKACHE**, « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents», Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Soutenu le: 25/06/2013
- [20] : **S. Elaimani**« Modélisation de Différentes Technologies d'Éoliennes Intégrées dans un réseau de Moyenne Tension »,Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Université des Sciences et Technologies de Lille (France), 2004.
- [21] : **B.Mansour**, « Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister Soutenu le 04/02 /2015

- [22] : **S.Youcef, A.Abdelhamid**, « Modélisation et contrôle d'un système éolien à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents », Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master Université Dr. Tahar Moulay de Saïda Soutenu le 21/06/2016.
- [23] : **Z. Chen, E. Spooner**, « Wind turbine converters : A comparative study », Power Electronics and Variable S Deed Drives, 21-23 September 1998, Conference Publication No. 456 © IEE 1998
- [24] : **L.H. Hansen, P.H. Madsen**, F.Blaabjerg, H.C. Christensen, U.Lindhard, K.Eskilsen, « Generators and power electronics technology for wind turbines », IECON'01: The 27th annual conference of the IEEE industrial electronic society. 0-7803-7108-9/01/\$10.10©2001 IEEE
- [25] : **Boukhezzar**, « Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable >>, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Paris XI ORSAY, 2006.
- [26] : **M. Mayouf** «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants Permanents », Thèse de magistère, Université d'Al Hadj Lakhdar – Batna(Algérie), 2007.
- [27] : **M. E. Haque,K. Mutaqi,M. Negnevitsky** «Control of a stand-alone variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator», IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-8, 2008
- [28] : **A. Rached** «Modeling and Optimization of Wind Turbine Driving Permanent Magnet Synchronous Generator», Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering, vol.5,issue 6, pp. 489-494, 2011.
- [29] : **Ch.wang, W.Lin, X.Khoale** « Modelling of a PMSG Wind Turbine with Autonomous Control», Research article, Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, pp. 01-09, 2014.
- [30] : **F.kendouli, K.Nabti, K.abed, H,Benalla** « modélisation , simulation et contrôle d'une turbine éolienne a vitesse variable basse sur la génératrice a double alimentation» faculté des sciences de l'ingénieur université mentouri , Constantine, Alegria reçu le 30 janvier 2011-accepte le 25 mars 2011

Annexes

Annexe A

Grandeurs nominales et paramètres du système éolien [22]

1. Grandeurs nominales de la machine synchrone à aimants permanents :

Puissance nominale	7.5 kW
Nombre de paires de pôles	$P = 2$
Vitesse nominale	$N_n = 3000 \text{ tr / m}$
Tension nominale (composée)	$U_{eff} = 380 \text{ V}$
Fréquence	$f = 50 \text{ Hz}$

2. Paramètres électriques de la machine synchrone à aimants permanents :

Résistance statorique	$R_s = 0,895 \Omega$
Inductance statorique	$L_s = 0,012 \text{ H}$
Inductance statorique selon l'axe d	$L_d = 0,012 \text{ H}$
Inductance statorique selon l'axe q	$L_q = 0,012 \text{ H}$
Flux des aimants permanents	$\phi_f = 0,9 \text{ wb}$

3. Paramètres de ligne de connexion au réseau électrique :

Résistance de la ligne	$R_l = 5 \Omega$
Inductance de la ligne	$L_l = 0.1 \text{ H}$
Fréquence de la ligne	$f_l = 50 \text{ Hz}$
Tension nominal de la ligne	$V_l = 220 \text{ V}$

4. Paramètres de filtre RC :

Résistance de filtre	$R_{filtre} = 1 \Omega$
Capacité de filtre	$C_{filtre} = 0.01 \text{ F}$

5. Grandeurs de contrôle de la liaison convertisseur au réseau électrique :

Tension de référence	$V_{dc}^* = 400 \text{ V}$
Puissance réactive de référence	$Q_l^* = 0 \text{ VAR}$

Annexe B

Méthode de synthèse des correcteurs

Soit un système du premier ordre, défini par la fonction de transfert suivante :

$$\frac{x(s)}{v(s)} = \frac{A}{1 + T \cdot p} \quad \text{B-1}$$

Ce système peut être représenté par la figure (B-1). C'est la représentation du système en boucle ouverte.

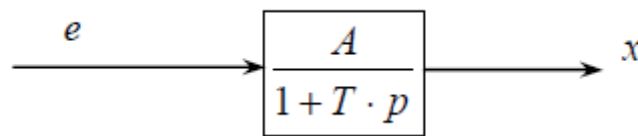


Figure B-1 : Schéma bloc d'un système en boucle ouverte.

La boucle de régulation de la variable x est représentée par la figure (B-2) :

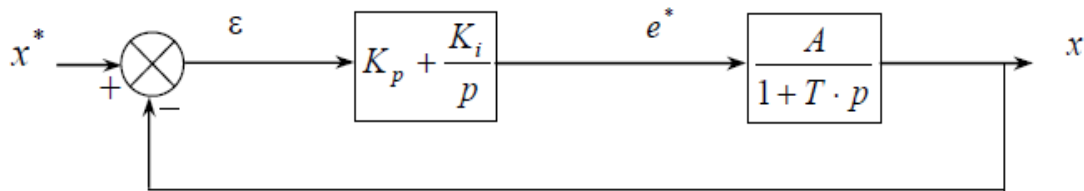


Figure B-2 : Schéma bloc de régulation de la variable x .

Le correcteur PI fournit l'entrée e^* nécessaire pour maintenir la variable x à sa valeur de référence x^* .

Suivant la figure (B-1), la fonction de transfert $\frac{x}{e}$ est donnée par :

$$\frac{x}{e} = \frac{A}{1 + T \cdot p} \quad \text{(B-2)}$$

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

$$\frac{x}{x^*} = \frac{\frac{A}{T}(K_p * P + K_i)}{P^2 + P\left(\frac{1 + A * K_p}{T}\right) + \frac{A * K_i}{T}} \quad (\text{B-3})$$

Pour notre étude, le dimensionnement du correcteur se fait à l'aide du principe d'imposition des pôles. Comme le polynôme caractéristique de l'équation (B.3) est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles à partie réelle négative. On identifie le dénominateur de cette fonction à celui de la fonction suivante :

$$D(s) = P^2 + 2\xi\omega_0 P + \omega_0^2 \quad (\text{B-4})$$

Ainsi, nous obtenons les paramètres du correcteur, en fonction de l'amortissement ξ et la pulsation propre ω_0 .

$$K_p = (2 \cdot T \cdot \xi \cdot \omega_0 - 1) / A \quad (\text{B-5})$$

$$K_i = T \cdot \omega_0^2 / A$$

$$K_p = (2 \cdot T \cdot \xi \cdot \omega_0 - 1) / A$$

$$K_i = T \cdot \omega_0^2 / A$$

Annexe C

Réponse d'un système du second ordre en fonction de son coefficient d'amortissement.

Pour la plus part des systèmes de commande, les performances dynamiques désirées en boucle fermée sont spécifiées à partir de la fonction de transfert suivante, du modèle du second ordre :

$$H(s) = \frac{K \cdot w_0^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot s + w_0^2}$$

en fonction de son gain K , de sa pulsation propre w_0 et de son coefficient d'amortissement ξ

Les réponses d'un tel système du second ordre, en fonction de son coefficient d'amortissement ξ ,sont représentées sur la figure (C-1).

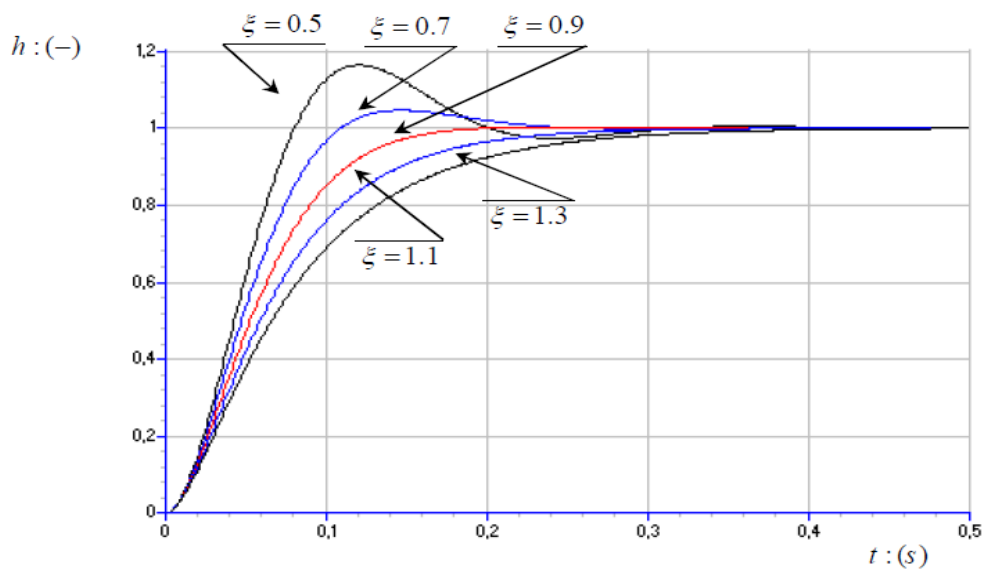


Figure C-1 : Réponse temporelle d'un système du second ordre, en fonction de son amortissement (exemple simulé pour $w_0 = 30 \text{rd / s}$ et $K = 1$)

Résumé

Pour obtenir des hautes performances et une meilleure exécution de la génératrice synchrone à aimants permanents, il faut concevoir une commande robuste adéquate, qui rende le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques. Il existe différentes stratégies dans littérature pour résoudre le problème de la commande de la génératrice synchrone à aimants permanents. Dans notre cas nous nous intéressons aux réglages des puissances active et réactive développées par la GSAP en utilisant un régulateur PI afin d'évaluer les performances apportées par ce type de réglage par la simulation sous l'environnement Matlab/Simulink .

Mots clés : | Générateur synchrone à aimants permanent (GSAP), énergie éolienne, la commande vectorielle, Régulateur PI

Abstract

To obtain high performance and best performance from the permanent magnet synchronous generator, it is necessary to design a suitable robust control, which makes the system insensitive to external disturbances and parametric variations. There are different strategies in literature to solve the problem of controlling the synchronous generator with permanent magnets. In our case, we are interested in the active and reactive power settings developed by the GSAP using a PI regulator in order to evaluate the performance provided by this type of regulation by the simulation under the Matlab / Simulink environment.

Keywords : | Permanent Magnet Synchronous Generator (GSAP), Wind Power, Vector Control, PI Regulator.