

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE MAGISTER

en Electrotechnique
Option **Entraînements Electriques**

Présenté par

ARAB NAIMA

Etude et Modélisation de L'Entrainement Electrique d'un Système Eolien à base de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

Devant le jury d'examen composé de :

M^r Mohellebi. Hassane	Professeur à l'UMMTO	Président
M^r Fellag Sid-Ali	Maître de conférences classe A à l'UMMTO	Rapporteur
M^{me} Boukhelifa Akkila	Maître de conférences classe A à l'USTHB	Examinatrice
M^r Maida Ahmed	Maître de conférences classe B à l'UMMTO	Examineur
M^r Mecheri Yacine	Maître de conférences classe B à l'UMMTO	Invité

Soutenu le :12 12 2010

REMERCIEMENTS

Je tiens à témoigner toute ma gratitude, mes respects et mes remerciements les plus sincères à Mr. FELLAG SID-ALI Maître de conférences au Département d'Electrotechnique de l'Université de Tizi-Ouzou pour son aide et ses conseils qu'il m'a prodigués et sa totale disponibilité.

Je remercie de même Monsieur MOHELLEBI HASSENE, Professeur au Département d'Electrotechnique de l'Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Madame BOUKHELIFA AKKILA, Maître de conférences au Département d'Electrotechnique de L'USTHB pour m'avoir fait l'honneur d'être examinatrice et membre du jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur MAIDI AHMED, Maître de conférences au Département d'Automatique de l'Université de Tizi-Ouzou, pour m'avoir fait l'honneur en acceptant d'être examinateur et membre du jury.

J'adresse mes remerciements à Monsieur MECHERI YACINE, Maître de conférences au Département d'Electrotechnique de l'Université de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'examineur.

Je remercie Monsieur B. BOUKAIS, Maître-assistant chargé de Cours au Département d'Electrotechnique de l'Université de Tizi-Ouzou, pour son aide et ses conseils qui ont été très importants. Qu'il trouve ici l'expression de mon plus grand respect

Je tiens à remercier aussi mes parents, mes frères et sœurs qui ont toujours été à coté de moi au besoin.

Je voudrais remercier aussi tous mes amies collègues

NOTATION

<i>MSAP</i>	Machine synchrone à aimants permanents
<i>GSAP</i>	Génératrice synchrone à aimants permanents
(d, q)	Indice du repère de Park lié au rotor
R_s	Résistance statorique
L_s	Inductance statorique directe
(v_s, v_s)	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
L_q	Inductance statorique quadratique
ϕ_f	Le flux d'excitation des aimants permanents
(ϕ_d, ϕ_q)	Composantes du flux statorique dans le repère de Park
(I_d, I_q)	Composantes du courant statorique
C_m	Couple électromagnétique
C_r	Couple résistant
P	Nombre de paire de pôles
J	Moment d'inertie totale de la machine
f	Coefficient de frottement visqueux
ω	Pulsation électrique statorique
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique du rotor
F	Vecteur force exercée sur les pales d'une éolienne à incidence variable
V	Vitesses du vent
ρ	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C)
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en une(1) seconde
P_m	Puissance extraite par le rotor éolien
$C_{p,max}$	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio

B	Champ d'induction magnétique
θ	Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal
τ	Couple aérodynamique
C_{aer}	Rayon de la pale
R	Vitesse angulaire de la turbine
$\Omega_{turbine}$	Couple résistant (issu du multiplicateur)
C_g	Vitesse mécanique de la génératrice
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de référence
Ω_{ref}	Force de poussée appliquée à la pale j
T_{bj} avec $J \in \{1,2,3\}$	Vitesse d'orientation de la pale
β_J avec $J \in \{1,2,3\}$	Inertie de la pale
J_{pale}	Coefficient de frottement de la pale par rapport à l'air
db	Elasticité de la pale
Kb	Coefficient de frottement de la pale par rapport au support de l'éolienne
f_{pale}	Inertie de l'arbre
J_h	Elasticité de l'arbre
k_h	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur
D_h	Gain du multiplicateur
G	Coefficient de frottement de la génératrice
dg	Couple d'entraînement de la génératrice
C_g	Puissance de l'éolienne
P_v	Inertie de la turbine
$J_{turbine}$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
C_{mec}	Puissance électrique générée par l'éolienne
$Pelec$	Puissance nominale de l'éolienne
P_{nom}	Maximum Power Point tracking
$M.P.P.T$	Couple électromagnétique de référence
$Cem-ref$	Vitesse angulaire de référence de la turbine
$\Omega_{turbine-ref}$	Vitesse mécanique de référence de la génératrice
Ω_{ref}	Coefficient de puissance de la turbine
C_p	

C_{pmax}	Coefficient de puissance optimal de la turbine
C_{ass}	Régulateur pour l'asservissement de la vitesse mécanique
ζ	Coefficient d'amortissement
ω_n	Pulsation naturelle
DC / AC	Continu / Alternatif
$IGBT$	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de largeur d'impulsions
V_{dc}	Tension aux bornes du condensateur
V_{dc-ref}	Tension de référence du condensateur
C	Capacité totale du condensateur
R_f	Résistance du filtre
L_f	Inductance du filtre
θ	Angle entre le repère statorique et le repère rotorique
V_{abc}	Tensions aux phases a, b et c du stator
i_{abc}	Courants aux enroulements a, b et c du stator
\underline{v}_s	Vecteur tension statorique triphasée
\underline{i}_s	Vecteur courant statorique triphasé
T_i, D_i avec $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$	Transistor IGBT et la diode en anti-paral
f_{ic} avec $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$	Fonction de connexion de l'interrupteur i de la cellule
m_i avec $i \in \{1, 2, 3\}$	Fonction de conversion du convertisseur
NPC	Neutral Point Clamped Converter
n	Nombre de niveau

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes éoliens

Introduction.....	5
1. Génération d'énergie renouvelable.....	5
1. 1 Génération de la chaleur	5
1.1.1 Thermo solaire	5
1.1.2 Géothermie	5
1.1.3 Biomasse	6
1. 2 Génération d'électricité.....	6
1.2.1. Photovoltaïque.....	7
1.2.2 Hydraulique.....	7
1.2.3 Energie de la mer	7
1.2.4 Production éolienne	8
1.3. Energie éolien	9
1.3.1 Historique de l'énergie éolienne	9
1.3.2 Applications des éoliennes	10
1.3.3 Constitution d'une éolienne	11
a) Principe	11
b) Constitution	11
1.3.3.1 Rotor	12
1.3.3.2 Nacelle.....	12
1.3.3.3 Tour	13
1.3.4 Notions théoriques sur l'éolien	13
1.3.4.1 Loi de Betz	13
1.3.5 Caractéristiques des turbines.....	14
1.3.5.1 Turbines à axe vertical	15
a) Le rotor Savonius	16
b) Le rotor Darrieus	17

1.3.5.2 Turbines à axe horizontal	17
1.3.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	19
1.3.7 Principes de contrôle de la puissance	19
1.3.8 Intérêt de la vitesse variable	20
1.4 Chaînes de conversion électromécanique	20
1.4.1 Systèmes couplés au réseau alternatif	21
1.4.1.1 Génératrices asynchrones à cage	21
1.4.1.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)	22
1.4.1.3 Génératrices synchrones	23
1.4.2 Systèmes non couplés au réseau alternatif	25
Conclusion	26

Chapitre 2 : Modélisation et commande de la turbine éolienne

Introduction	27
2. 1 Modélisation d'une turbine éolienne	27
2. 1.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	27
2.1.2 Modélisation de la vitesse du vent	30
2. 1.3 Modélisation de la turbine éolienne	30
2.1.3 Modèle du multiplicateur	33
2.1.4 Equation mécanique de l'arbre	33
2.2 Stratégie de maximisation de la puissance	34
2.2.1 Algorithme de maximisation de la puissance	34
2.2.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse	36
2.2.3 Correcteur de la vitesse de la turbine	37
2.3 Résultats obtenus	39
Conclusion	40

Chapitre 3 : La commande vectorielle de la machine Synchrones à aimants permanents

Introduction	41
3.1. Types et caractéristiques des aimants permanents.....	42
3.2. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents.....	44
3.3. Différentes structures de la machine synchrone à aimants	45
3.3.1. Structure à aimants en surface (déposés)	45
3.3.1. Structure à aimants insérés.....	45
3.4. Avantages et inconvénients de la machine synchrone à aimants Permanents	46
3.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	47
3.5.1 Les équations électriques de la machine synchrone à aimants permanents	47
3.6 Modélisation dans le repère de Park de la machine synchrone à aimant Permanents	48
3.7. Simulation et interprétation	50
3.8 Redresseur triphasé à contrôle vectoriel par MLI.....	53
3.8.1 La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par Compensation	54
Conclusion	61

Chapitre 4 : Modélisation et simulation de la chaîne de conversion éolienne

Introduction	62
4.1 Modèles du convertisseur de puissance	63
4.1.1 Modèle du convertisseur de puissance dans le repère naturel	63
4.1.1.1 Modélisation de l'onduleur	63
4.1.1.2 Commande M.L.I	66
4.1.1.2.1 Commande à M.L.I sinus-triangulaire.....	67
4.1.2 Model continu équivalent de convertisseur de puissance.....	69

4.1. 3	Modélisation de la liaison au réseau	70
4.1 .3. 1	Modélisation du bus continu	70
4.1.3.2	Modélisation du filtre dans le repère naturel.....	71
4.2.	Model mathématique et stratégie de contrôle de l'onduleur connecté au réseau	72
4.2.1.	Model de réseau	72
4.2.2	Stratégie de contrôle de l'onduleur connecté au réseau.....	75
4.3	Modèle complet de la chaine de conversion éolienne à base de la machine synchrone à aimants permanents.....	79
Conclusion	83

Chapitre 5 : Modélisation et simulation de l'onduleur à cinq niveaux associé au système éolien

Introduction.....	84
5. 1. Modélisation et commande de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC	84
5. 1.1. Structure	84
5.1. 2 Modélisation aux valeurs instantanées de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC	85
5.1.2.1 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à cinq Niveaux.....	86
5.2.2.3 Modèle de connaissance de l'onduleur à cinq niveaux en vue de la commande.....	91
a)Fonction de connexion	91
5.1.2.3 Les stratégies de commandes de l'onduleur à cinq niveaux	93
5.2.3.1 La triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses bipolaires	94
5.3 Association de l'onduleur à cinq niveaux au système de conversion éolien	96
5.3.1 Onduleur à deux niveaux.....	97
5.3.2 Onduleur à cinq niveaux.....	98
Conclusion.....	99

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes

Introduction

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18^{ème} siècle. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables. De façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités [1, 2].

Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coût de production. Il est entrain de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre, mais on peut se demander, comme c'est le cas avec les barrages, si des concentratives importantes d'éolienne ne vont pas également être des sources perturbatrices. Quoi qu'il en soit, la part importante de l'aréogénération est attendue des grandes fermes offshores qui resteront des systèmes centralisés avec leurs avantages et inconvénients [3].

L'énergie éolienne connaît, depuis le début des années 90, un fort regain d'intérêt, particulièrement dans l'union européenne, où sa croissance annuelle est de l'ordre de 20%. A cet effet, l'association européenne de l'énergie éolienne (EWFA) prévoit une puissance installée d'environ 180 GW. A l'horizon 2020 des programmes ambitieux de fermes offshores sont annoncés, en particulière au Danemark. Au plan mondial, les Etats-Unis se situent seulement en troisième position, après l'Allemagne et l'Espagne, avec une production de 6740 MW en 2004 [4].

La majorité des éoliennes installées étaient à vitesse fixe. Ces éoliennes 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[4].

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 formes d'énergie cinétique dans les grandes masses tournantes [4]. Ainsi, la production annuelle d'énergie d'une éolienne à vitesse variable est accrue de 5% à 10% par rapport à une éolienne à vitesse fixe [5].

Parmi différents types de structures éoliennes, la génératrice synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, rend les systèmes de conversion éolienne à vitesses variables plus attractifs que ceux à vitesses fixes, ce type de machine permet d'extraire le maximum d'énergie ainsi qu'il réduit les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur mécanique ; ce qui améliore la fiabilité du système ; et de la réduction des frais d'entretien. Contrairement à la machine asynchrone à double alimentation qui ne peut pas être utilisée à attaque directe, mais nécessite la présence d'un multiplicateur mécanique [6]. La machine synchrone à aimants permanents est caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible, et de faibles inductances. Toutes ces caractéristiques offrent à la génératrice des performances élevées, un rendement important, et une meilleure contrôlabilité; ce qui rend cette machine comme un concurrent de la génératrice asynchrone [6].

Dans notre travail nous nous intéressons à l'étude de la chaîne globale de conversion basée sur une machine synchrone à aimants permanents à attaque directe. Des stratégies de contrôles permettant à la fois d'optimiser la puissance produite, de régler la tension du bus continu, et de contrôler les puissances transmises au réseau seront présentées.

Dans le premier chapitre, un état de l'art de l'énergie éolienne qui donne un aperçu sur les différents types d'éoliennes (à axe vertical, horizontal), leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation et de protection, ainsi que les différents types de génératrices utilisées dans l'éolienne ont été présentés. Ce chapitre est élaboré par la présentation des différentes applications de capteurs éoliennes.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la modélisation et le contrôle de la turbine éolienne. Nous allons utiliser une stratégie de commande avec asservissement de la vitesse de rotation qui permet de maximiser la puissance extraite.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation et la présentation de la machine synchrone à aimants permanents. Nous présentons par la suite la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents dans le but d'avoir les tensions de références qui seront utilisées comme entrée de redresseur triphasé. Les résultats de simulations de l'ensemble (turbine, machine) sont donnés.

Le quatrième chapitre porte sur la modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur une machine synchrone à aimants permanents qui comporte un redresseur MLI, un bus continu, l'ensemble est relié au réseau via un onduleur à deux niveaux de tension, par la suite nous allons modéliser la liaison au réseau électrique. Le contrôle de convertisseur connecté au réseau sera décrit ainsi que le contrôle de bus continu

Le dernier chapitre est consacré à la modélisation et la commande de l'onduleur à cinq niveaux de tension à structure NPC, nous présentons le système de conversion éolien associé à l'onduleur à cinq niveaux qui débite sur une charge RL, un asservissement du modèle globale est fait, ainsi que une comparaison des résultats de simulation obtenus par l'utilisation des onduleurs à deux et à cinq niveaux.

Introduction

Le développement des énergies renouvelables en général et de l'énergie éolienne en particulier s'inscrit dans le cadre de la préservation de l'environnement de notre planète. S'il y a une trentaine d'années, elles étaient développées pour économiser le pétrole, aujourd'hui, ce développement, combiné à la maîtrise des consommations d'énergie, a pour objet premier la réduction des émissions de gaz à effet de serre [8]. Ces sources d'énergies renouvelables participent également à la sécurité d'approvisionnement et au développement local. De plus, elles s'inscrivent doublement dans le développement durable : d'une part, en permettant aux générations futures d'économiser des ressources fossiles épuisables et d'autre part en ne produisant ni gaz ni déchets susceptibles d'affecter le développement des générations actuelles et futures.

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La figure 1.1 montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible [9].

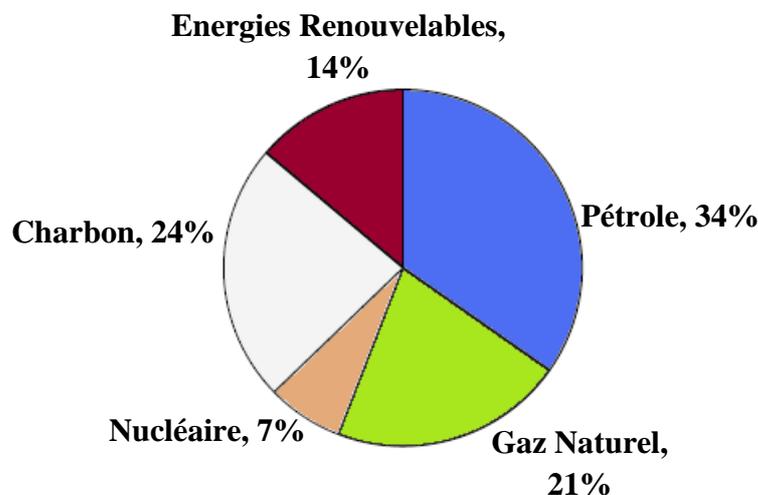


Figure 1.1 Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde [9]

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres [9].

1. Génération d'énergie renouvelable

1. 1 Génération de la chaleur

Cette énergie est dans la plus part du temps obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, du gaz ou du pétrole. Il existe des moyens pour remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables [9].

1.1.1 Thermosolaire

Les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80° C. Ce système est totalement écologique, moins cher et la durée de vie des capteurs sont élevée. L'inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance, cette source est donc à utilisation locale [9].

La technologie thermosolaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir des températures très élevées du fluide chauffé.

1.1.2 Géothermie

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. La température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Classiquement trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- La géothermie à haute énergie : qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où l'eau est injectée sous pression dans la roche. Ce type de géothermie est surtout utilisé pour produire de l'électricité.

- La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100°C. La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.
- La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs dont les niveaux de température compris entre 10 et 30°C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle.

Par rapport à d'autres types d'énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 50 ans en moyenne). La géothermie est la source d'énergie principale de l'Islande. Il y existe trois centrales électriques importantes qui fournissent environ 17% (en 2004) de la production d'électricité du pays. De plus, la chaleur géothermique fournit le chauffage et l'eau chaude d'environ 87% des habitants de l'île [10]. En 1995 la puissance installée dans le monde était de l'ordre de 7000 MW (il s'agit de production de l'électricité donc de la géothermie grande et moyenne énergie).

En 2004 ce chiffre est passé à près de 8500 MW. En Europe, les installations utilisant les pompes à chaleur permettent d'extraire théoriquement environ 1000MW de puissance sous forme de la chaleur. Ce chiffre augmente chaque année d'environ 50MW installés [10].

1.1.3 Biomasse

La biomasse est une énergie d'origine végétale ou animale. Les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse [9]. Il ya différentes types de cette énergie: le bois, les biocarburants et le biogaz.

Actuellement 0,8% de ce potentiel est déjà exploité. L'incinération des déchets, qui pourrait couvrir 1,3% de la production totale d'électricité, constitue une manière intéressante de se débarrasser des ordures ménagères en produisant de l'électricité. En se basant sur la production classique actuelle (80TWh pour une puissance installée de 15000 MW), on peut estimer que cette production par biomasse correspond à une puissance installée de l'ordre de 750MW au maximum, soit 3,8% de la puissance installée en 2020 [11].

1.2 Génération d'électricité

Il ya une autre sorte d'énergie renouvelable qui est sous forme électrique. La puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution à l'aide des panneaux solaires ou des génératrices hydraulique et éolienne.

1.2.1. Photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Le potentiel théorique est élevé, en principe 3000 TWh /an avec des cellules à 10% de rendement compte tenu de la superficie de la Belgique. Le photovoltaïque pourrait assurer jusqu'à 20% de la production en 2020. Toutefois, le coût de la production d'électricité par effet photovoltaïque est actuellement tellement élevé qu'il devrait être réduit fortement pour avoir une pénétration significative. Avec une production estimée à 0,5%. La puissance installée serait alors de l'ordre de 500 MW, soit 2,5% du parc de production [9, 11].

1.2.2 Hydraulique

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et stockable [9]. L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 Gigawatts (GW), soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. On discerne la petite hydraulique (inférieure à 10 MW) et la grande hydraulique (supérieure à 10 MW) [10].

1.2.3 Energie de la mer

L'énergie des vagues est une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créent par le vent à la surface des mers et des océans

transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [9].

1.2.4 Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an.

La puissance totale d'énergie éolienne installée au niveau mondial est plus de 39.234 GW et peut atteindre 110 GW en 2012. L'Europe est toujours leader du marché mais l'Amérique du Nord et surtout l'Asie sont maintenant en plus fort développement [12,13].

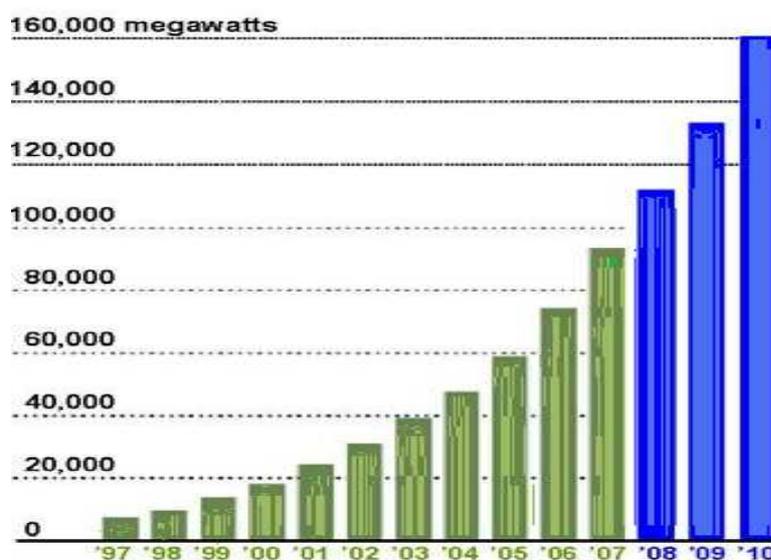


Figure 1.2 Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW.

Plusieurs facteurs d'ordres scientifiques et techniques contribuent à cet essor :

- L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable. Il constitue donc une véritable ressource renouvelable ;
- L'énergie éolienne est propre : les éoliennes n'engendrent pas de pollution. Elles ne rejettent pas de substances dangereuses dans l'environnement et ne produisent pas de déchets. Elles contribuent donc à une réduction substantielle des émissions de gaz à effet de serre ;
- L'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emplois au niveau de la fabrication et de l'installation [13].

Cependant, l'un des facteurs essentiels reste encore la volonté politique affichée par plusieurs gouvernements pour favoriser les implantations en rassurant les investisseurs par des mesures incitatives [13].

L'énergie éolienne est en fonction de la vitesse du vent, ce qui en fait une énergie intermittente et difficilement prévisible. Son insertion dans les réseaux électriques entraîne des problèmes et contraintes spécifiques qui doivent être pris en compte par les opérateurs de réseaux

1.3 Energie éolienne

1.3.1 Historique de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a déjà été utilisée par Hammourabi (fondateur de Babylone) afin d'irriguer la Mésopotamie vers l'an 2000 avant J-C. Les chinois ont également exploité la puissance du vent pour des systèmes de pompage de l'eau [8,9].

En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du moyen âge. Utilisé tout d'abord pour moulin le grain, ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés [9]. La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin de XIXème siècle. Parmi les pionniers, on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950, Johanner Juul devint aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif.

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grand échelle au début des années 1980 en passant de 7 MW en 1981 à 386MW en 1985[2,14].

1.3.2 Applications des éoliennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle récupère l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation comme il est montré sur la figure 1.3. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières [8] :

- soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau ;
- soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :

- l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure ;
- l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau.

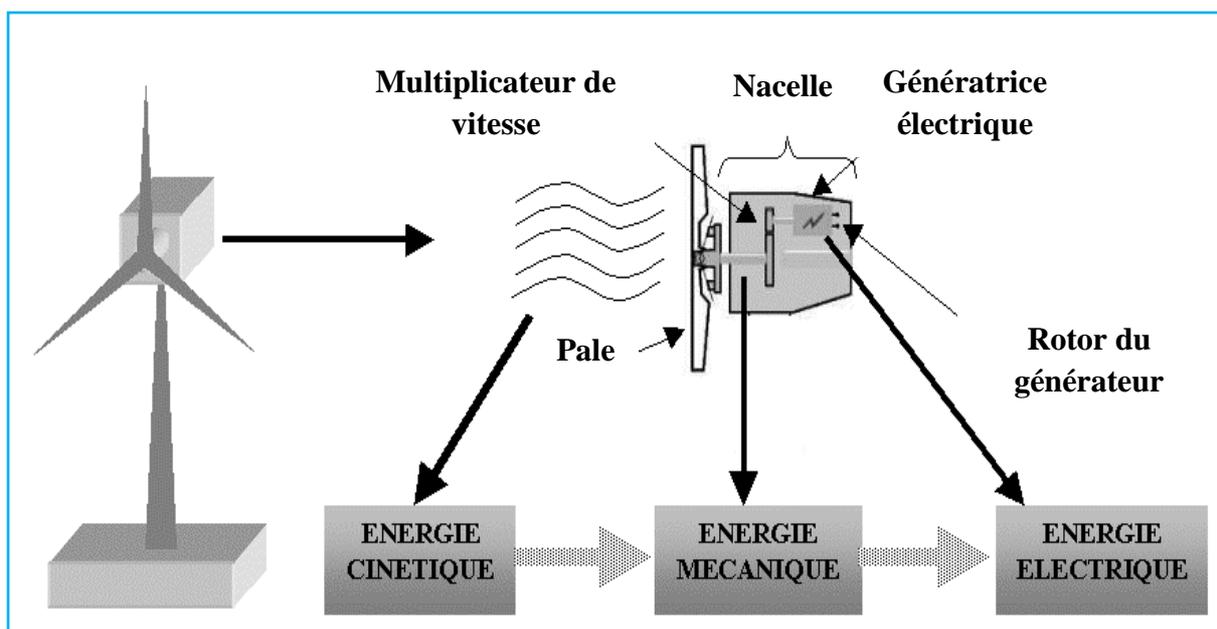


Figure 1.3 Conversion de l'énergie cinétique du vent.

1.3.3 Constitution d'une éolienne

a) Principe

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

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique ;
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulière de l'énergie, la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine [8,13].

b) Constitution

Une éolienne rapide est constituée principalement de trois parties : les pales, la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

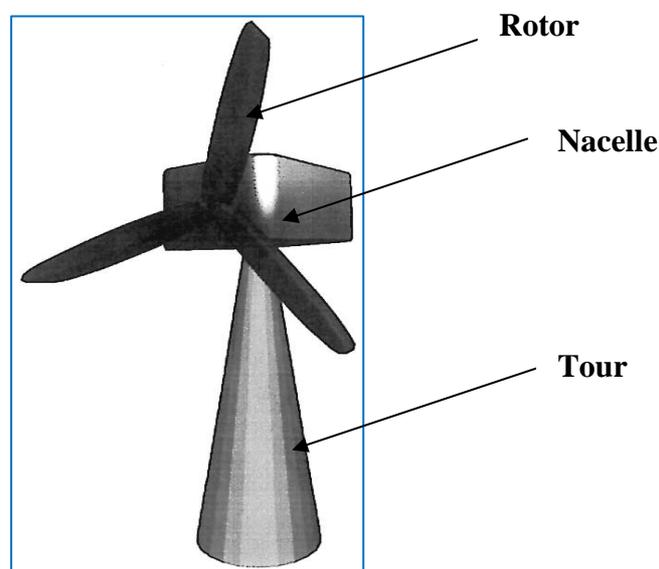


Figure 1.4 Composantes d'une éolienne

1.3.3.1 Rotor : C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu [8,13].

1.3.3.2 Nacelle : Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure 1.5 présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants [8,13] :

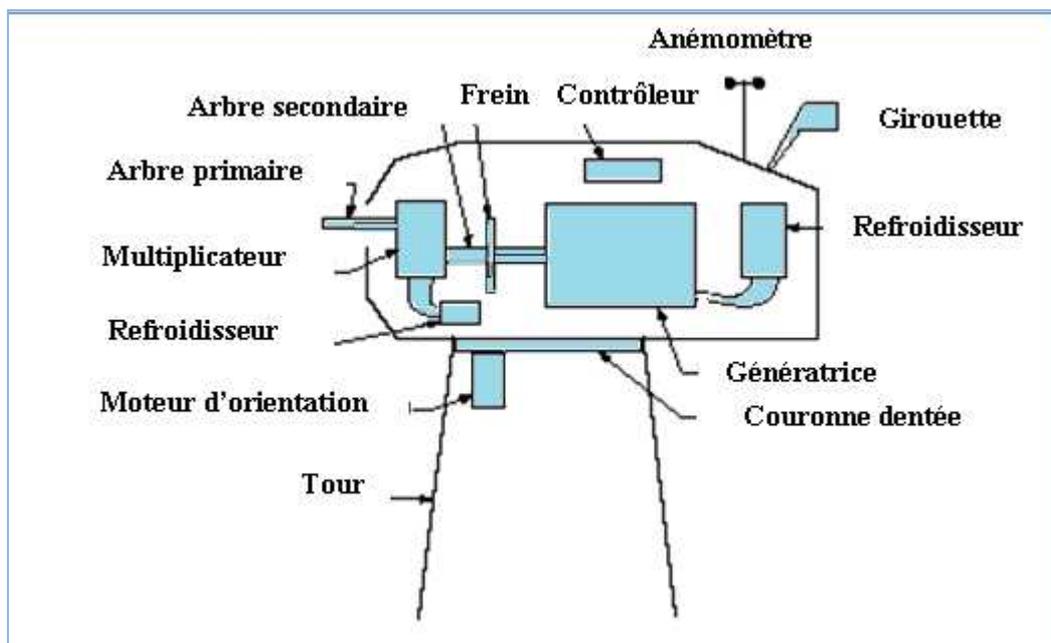


Figure 1.5 Éléments d'une nacelle

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques ;
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine ;
- La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble (rotor + nacelle) face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir [8, 13].
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile ;
- Un groupe hydraulique et ses servitudes si nécessaire ;
- Le dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée [8,13].

1.3.3.3 Tour : Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (rotor, nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation [8,13].

1.3.4 Notions théoriques sur l'éolien

1.3.4.1 Loi de Betz

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par [9,14,16] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \quad (1.1)$$

ρ : masse volumique d'air (kg m^{-3})

S : surface active de la voilure (m^2).

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{\max} = 0,59 \cdot P_{\text{vent}} \quad (1.2)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{\text{opt}} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{vent}}} = 0,59 \quad (1.3)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite λ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout des pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{\text{turbine}}}{v_{\text{vent}}} \quad (1.4)$$

R : rayon des pales (m)

Ω : vitesse de la turbine (rad/s)

λ : vitesse relative de la turbine.

1.3.5 Caractéristiques des turbines

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

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

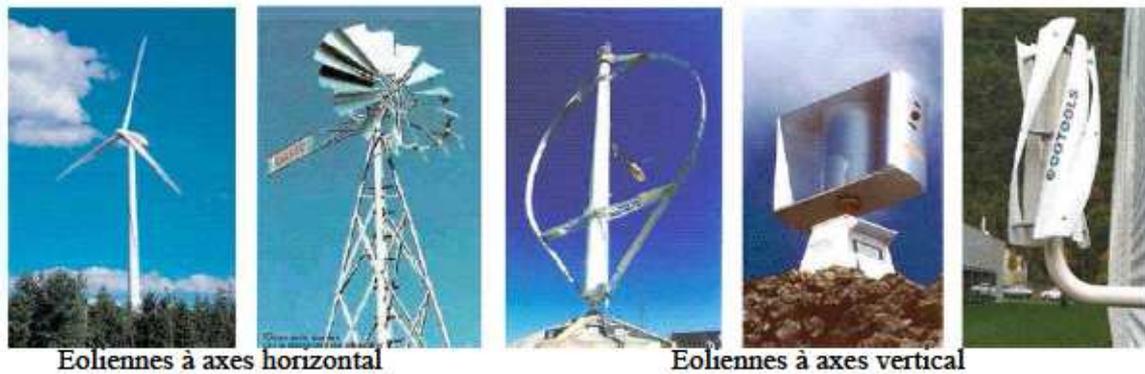


Figure 1.6 Technologies éoliennes

1.3.5.1 Turbines à axe vertical

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol [14,15].

De part son axe vertical, il ya symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production.

En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. Les câbles des haubans doivent passer au dessus des pales et cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole par exemple. Le seul modèle construit de manière industrielle fut l'éolienne de Darrieus [15].

On trouve des éoliennes à axes verticaux développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont des machines de faible puissance de 100 W à 25 KW [15].

Elles présentent certains avantages : machinerie au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, construction souvent simple. Elles tournent à faible vitesse et sont de ce fait peu bruyantes. Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage mécanique, le palier bas devant supporter le poids de l'ensemble de la turbine.

Ces principes peuvent être associés à un contrôle de la vitesse de rotation de la turbine. L'intérêt de ce contrôle apparaît en observant les caractéristiques qui présentent la puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent.

Il ya 3 grandes familles des turbines à axe verticale [2,8] :

- Les turbines Darrieus classique;
- Les turbines Darrieus à pales droite (type-H);
- Les turbines Savonius.



Turbine Darrieus



Turbine Darrieus de type H



Turbine Savonius

Figure 1.7 Eolienne à axe verticale

a) Le rotor de Savonius

Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de la "traînée différentielle": les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (figure 1.8.a) [2,9].

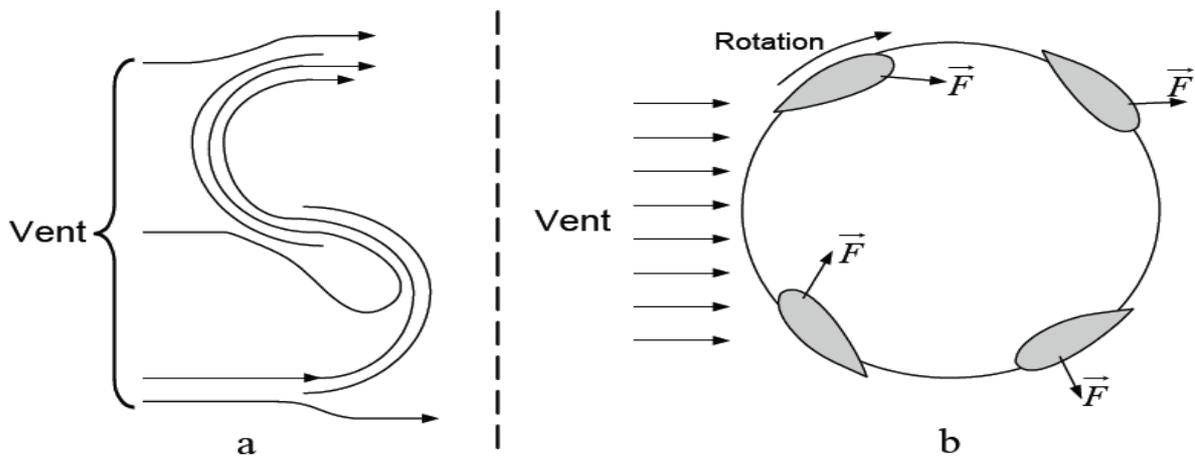


Figure 1.8 Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.

b) Le rotor Darrieus

Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles Figure (1.8.b) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur) [2,9]. Ce type de machines susceptibles de concurrencer les turbines bi-ou tripales à axe horizontal. Mais, ces machines difficiles à maîtriser malgré leurs avantages ont été abandonnées [2,9].

1.3.5.2 Turbines à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau on peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent « hélice au vent », (figure 1.9.a) et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent » (figure 1.9.b) [2, 9, 15,16].

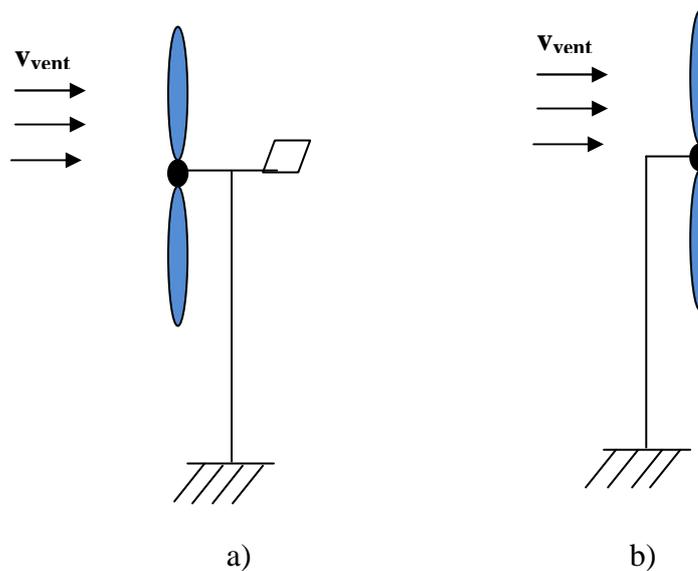


Figure 1.9 Turbine à axe horizontal

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines selon leurs coefficients aérodynamiques de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ [2, 9].

On peut noter ainsi que :

- Les courbes $C_p(\lambda)$ montrent l'avantage intrinsèque des turbines à axe horizontal en terme de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...) ;

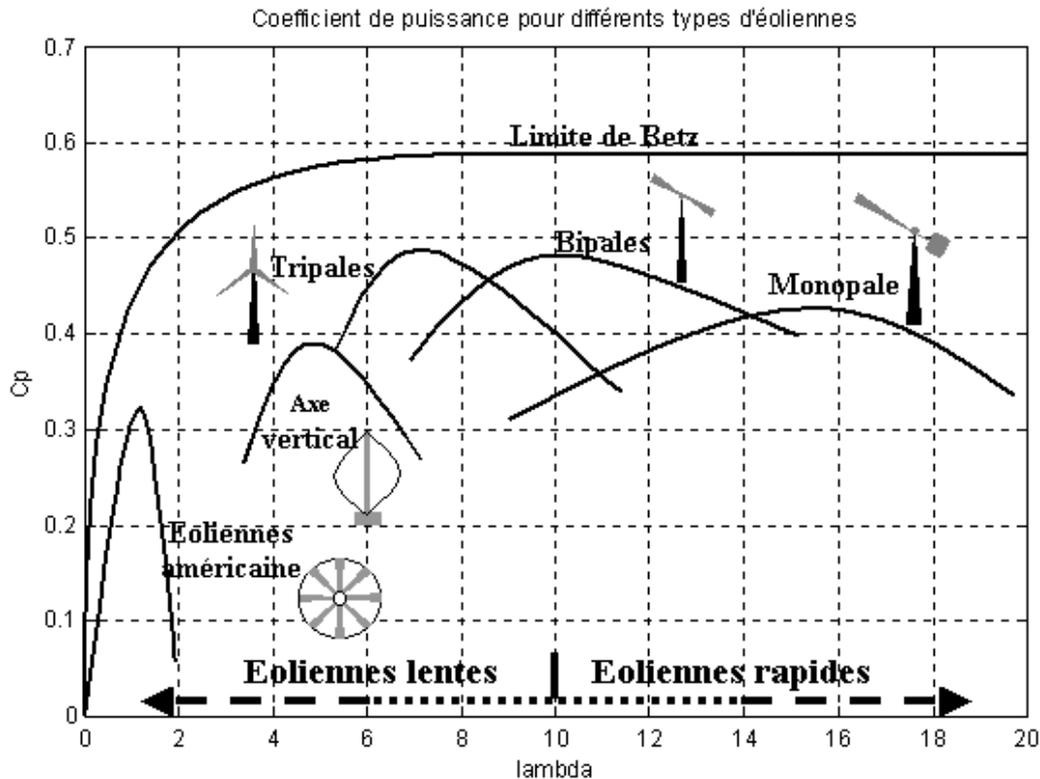


Figure 1. 10 Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales [2].

- Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les « axes horizontaux » à faible nombre de pales (1, 2,3) par rapport aux « axes verticaux » ou aux multipales. Elles sont donc moins sensibles aux variations de λ autour de λ_{opt} .

1.3.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Le dimensionnement en puissance de l'ensemble de la turbine, du générateur et de toute la mécanique de structure (nacelle, mât) associée est défini pour une vitesse du vent nominale au-delà de laquelle il est nécessaire d'écarter la puissance. Ainsi, la courbe idéale et typique d'un aérogénérateur a l'allure de celle présentée à la figure 1.11 [2, 14,15, 17].

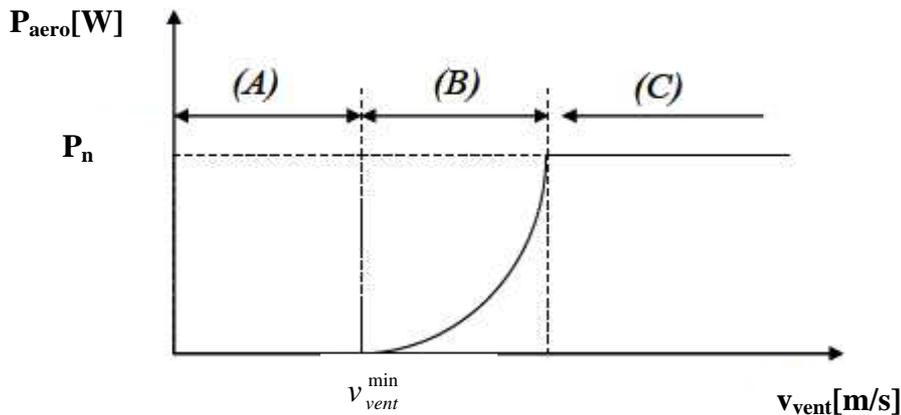


Figure 1.11 Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent.

La caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte trois zones distinctes :

- la zone A, où $P_{turbine} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- la zone B, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v_{vent} ;
- la zone C, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance $P_{turbine}$ fournie reste sensiblement égale à P_n [2,10, 14, 16,17].

1.3.7 Principes de contrôle de la puissance

Il existe deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite de la turbine à la valeur de la puissance nominale de la génératrice [2, 10, 14,17] :

- système « pitch » ou « à pas variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone C de vitesse.
- système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse du vent, mais la courbe de puissance chute plus vite : il s'agit donc d'une solution passive.

1.3.8 Intérêt de la vitesse variable

Si on considère les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de

type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent [9, 14].

L'électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique, la figure 1.12 montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques.

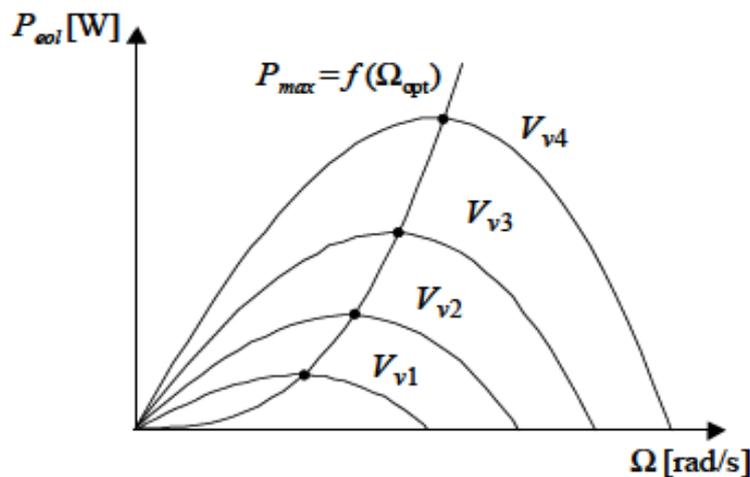


Figure 1.12 Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

1.4 Chaînes de conversion électromécanique

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne vers l'énergie électrique comprend plusieurs organes de conversion. Elles peuvent être très différentes selon que l'on est en forte ou en petite puissance, en fonctionnement à vitesse fixe ou variable. On peut les classer selon leur couplage ou non au réseau.

1.4.1 Systèmes couplés au réseau alternatif

1.4.1.1 Génératrices asynchrones à cage

Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt [2, 9, 14].

Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau [13].

Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce qui nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse comme le montre la figure 1.13 [9,13, 14].

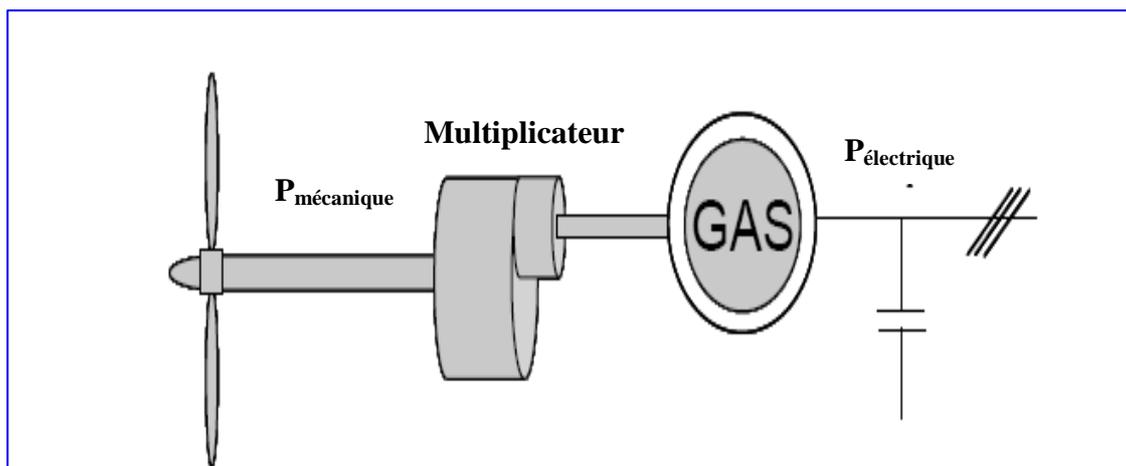


Figure 1.13 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée [9,14].

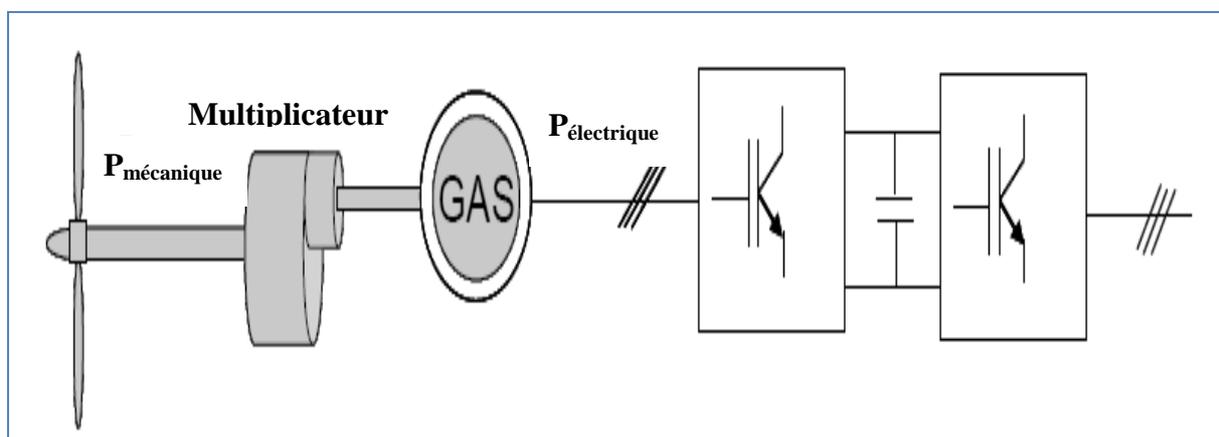


Figure 1.14 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

1.4.1.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hyposynchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixe au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit [9, 10, 14,15].

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa...) utilisent ce type de machine [9, 10, 14,15].

Une des solutions très intéressantes et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux convertisseurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau figure 1.15. En général, le dimensionnement de la chaîne rotorique se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation de 30% de la plage de vitesse. Ceci constitue le principal avantage de cette structure. Par contre son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau.

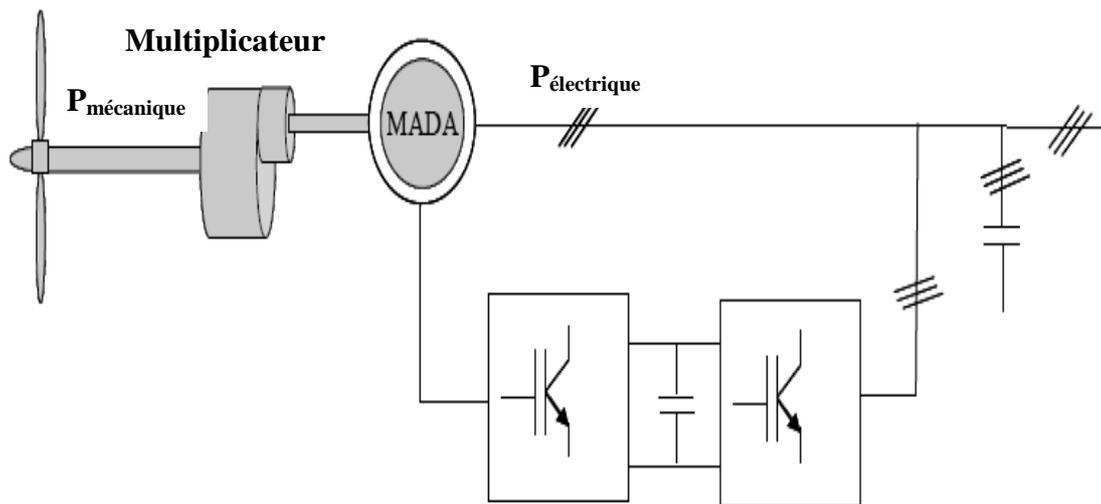


Figure 1.15 Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation- régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation

1.4.1.3 Génératrices synchrones

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles. Leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable [9, 10, 14,15].

Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses. Le principal fabricant est Enercon (plusieurs milliers de machines de 300 kW, 600 kW, 1 MW et 1.8 MW sont déjà en service). L'inducteur (rotor) est bobiné nécessite un système bagues - balais ou un système à diodes tournantes sans contact (comme dans les « alternateurs classiques » de production) pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI [9, 10, 14,15].

Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années voire (figure 1.16).

On trouve également des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, comme chez le constructeur Made (gamme au-delà de 800 kW). Ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel elles sont connectées comme le montre la figure 1.17.

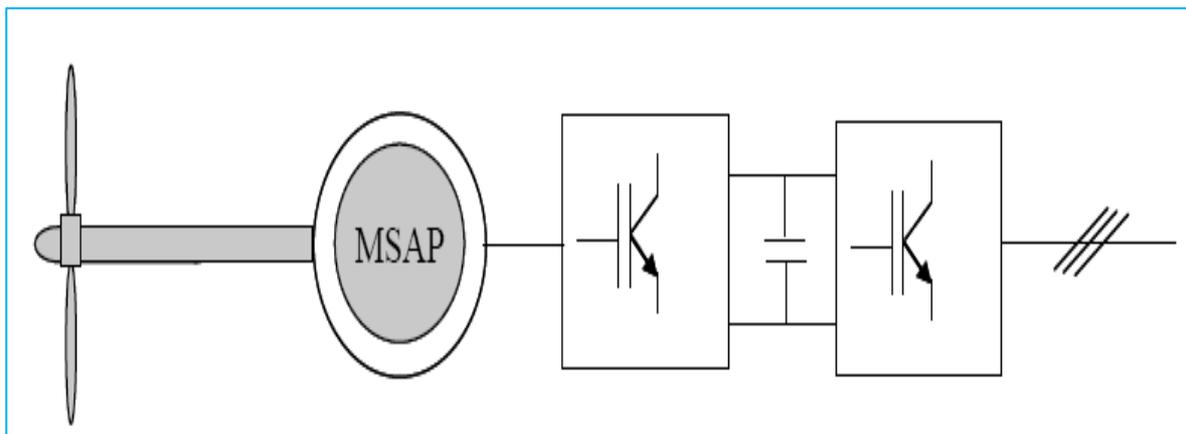


Figure 1.16 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

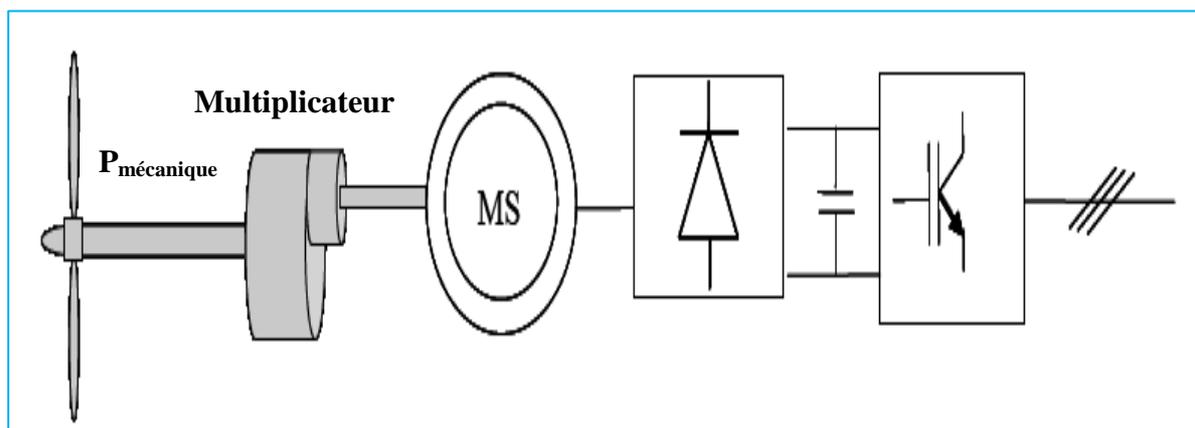


Figure 1.17 Système basé sur la machine synchrone et redresseur à diodes

De nos jours, dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne, l'intérêt se porte sur l'utilisation des génératrices électriques tournant à basse vitesse sans multiplicateur. Celui-ci est en effet une source de bruit et de pannes fréquentes.

1.4.2 Systèmes non couplés au réseau alternatif

Pour les réseaux de petites puissances en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage est autoamorcée par condensateurs. Pour éviter des démarrages trop fréquents du groupe électrogène, ou pour assurer les transitions, des batteries électrochimiques, voire des accumulateurs inertiels, peuvent également être associés via un convertisseur électronique. Les inconvénients principaux de ce type de chaîne sont dus à la rigidité (vitesse faiblement variable par glissement de la GAS), l'absence d'optimisation de puissance et la nécessité d'un multiplicateur de vitesse [14].

Une autre solution couramment employée consiste à utiliser un bus continu intermédiaire avant de transformer l'énergie en courant alternatif. Dans le cas des très petites puissances, l'énergie est directement consommée en courant continu. Le bus continu présente l'avantage d'interconnecter plus aisément divers systèmes de production (éolien, photovoltaïque, pile à combustible...) et des batteries électrochimiques qui peuvent se trouver directement en tampon sur de tels bus. La figure 1.18 montre une solution originale et de faible coût pour associer un aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique. Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à l'inductance d'induit de la machine synchrone de forte valeur que les courants restent proches des formes sinusoïdales et que les rendements de conversion sont corrects. En cas de surcharge de la batterie (trop de tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation [14].

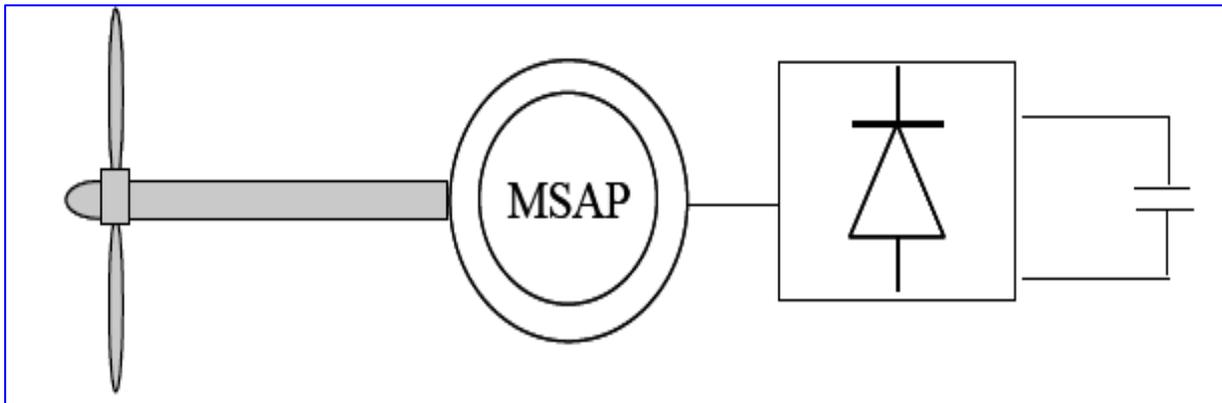


Figure 1.18 Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu

Conclusion

La première partie de ce chapitre présente une vue générale sur les perspectives d'offre d'énergie, la génération des énergies renouvelables et particulièrement l'énergie éolienne.

La deuxième partie est consacrée à la description de la turbine éolienne, ces éléments constitutifs, ces différents types, et les stratégies de fonctionnement (vitesse fixe, vitesse variable).

Enfin nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique comportant les différents types de machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion. Différentes stratégies de commande ont été développées selon la caractéristique puissance-vitesse pour extraire une puissance maximale.

Dans ce chapitre on s'intéresse essentiellement à la modélisation et le contrôle de la turbine éolienne. Pour cela nous proposons une stratégie de commande de la turbine pour maximiser la puissance extraite du vent, cette dernière consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de la puissance générée.

2. 1 Modélisation d'une turbine éolienne

2. 1. 1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R . les pales sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{mec} qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique [17].

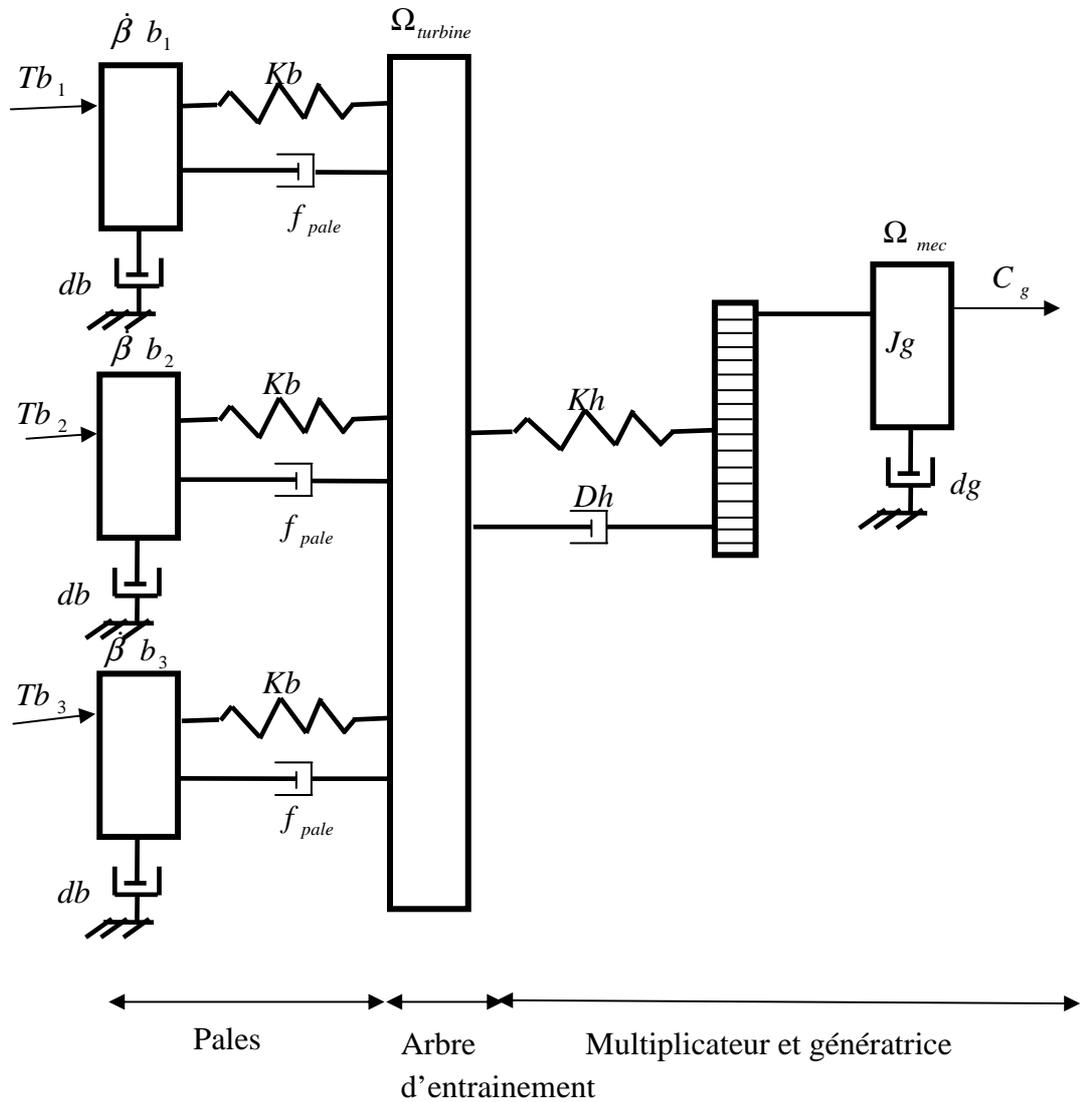


Figure 2.1 Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- La même inertie J_{pale}
- La même élasticité K_b
- Le même coefficient de frottement par rapport à l'air db

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement f_{pale} par rapport au support. Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées

$\dot{B}b_1, \dot{B}b_2, \dot{B}b_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse du vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- Son inertie J_h
- Son élasticité Kh
- Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- Une inertie J_g
- Un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple (C_g) entraînant à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} . Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$). Alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la source de toutes les caractéristiques mécaniques. Le coefficient de frottement par rapport à l'air db est très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure 2.2).

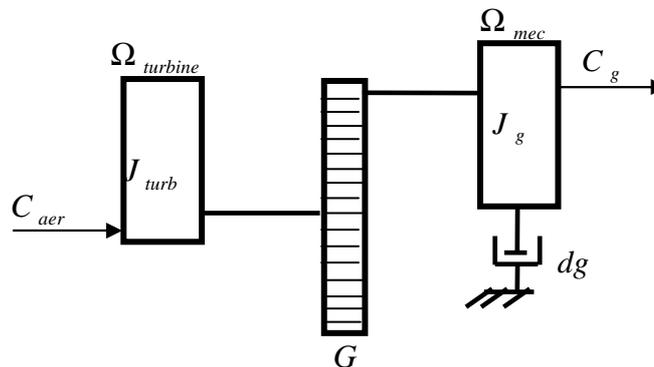


Figure 2.2 Modèle mécanique simplifié de la turbine.

2.1.2 Modélisation de la vitesse du vent

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent sera modélisée par une somme de plusieurs harmoniques [8, 18,19].

$$v_{vent}(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k \cdot t) \quad (2.1)$$

a_k : Amplitude des harmoniques.

ω_k : Fréquence des harmoniques.

La simulation d'un profil du vent est présentée sur la figure suivante :

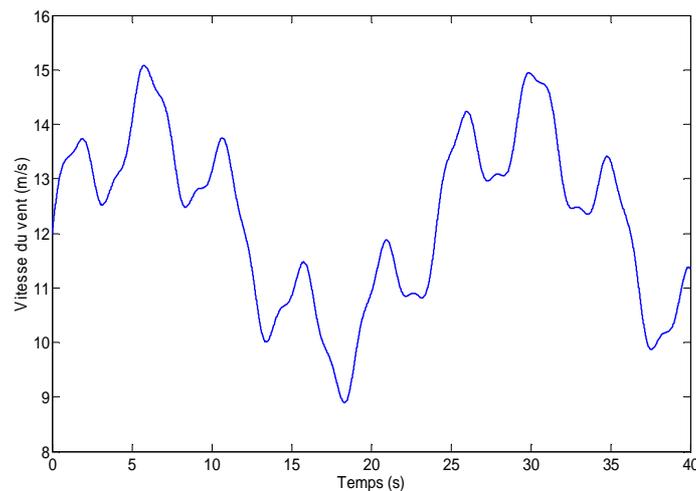


Figure 2.3 Profil du vent appliqué.

2. 1. 3 Modélisation de la turbine éolienne

Pour une vitesse du vent v_{vent} traversant la turbine nous permet d'avoir la puissance aérodynamique suivante :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_{vent}^3 \quad (2.2)$$

La vitesse relative est définie comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [20] :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v_{vent}} \quad (2.3)$$

$\Omega_{turbine}$: La vitesse de la turbine

Nous allons modéliser une éolienne de 2MW. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 41m. L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. L'expression du coefficient de puissance à été approchée par ce type de turbine, par l'équation suivante [20,21] :

$$C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\Gamma} - 0,4\beta - 5 \right) \exp \frac{12,5}{\Gamma} \quad (2.4)$$

β : L'angle de calage de la turbine

Telle que Γ est donnée par l'expression suivante :

$$\Gamma = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}}$$

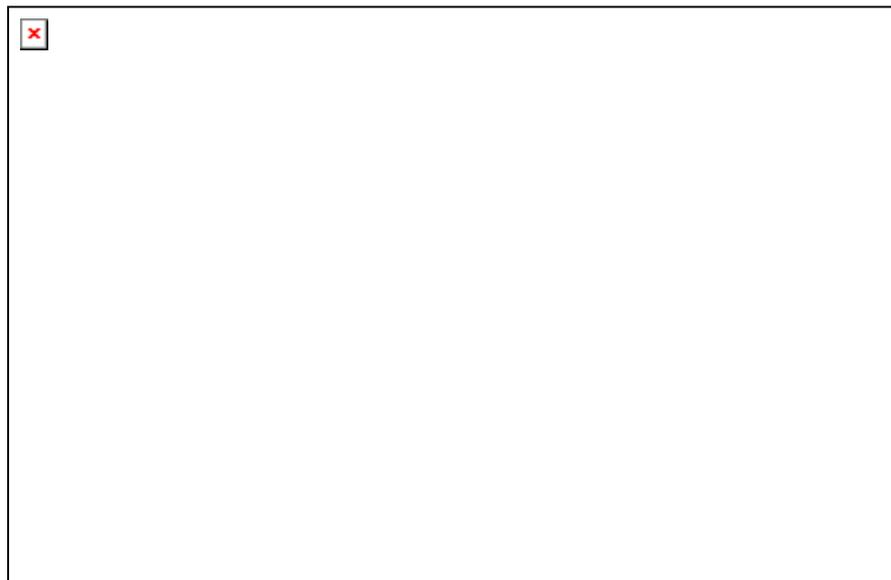


Figure 2.4 Evolution de coefficient de puissance avec variation de la vitesse relative.

Comme il est illustré par la figure 2.4, il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_p = 0.43$) est atteint pour une valeur du ratio de vitesse ($\lambda = 7.5$). Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement.

La valeur du coefficient de puissance (C_p) dépend de celle de la vitesse relative de l'éolienne λ et de l'angle de l'orientation de pale β comme il est illustré par la figure 2.5.

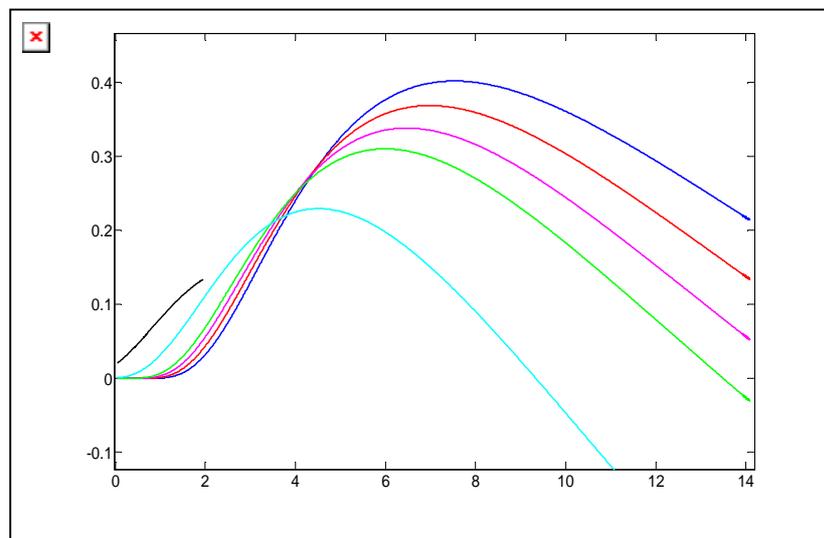


Figure 2.5 Coefficient aérodynamique en fonction de la vitesse relative de la turbine.

L'expression du couple aérodynamique peut être déduite de l'expression de la puissance et de la vitesse [22].

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_{vent}^3}{\Omega_{turbine}} \quad (2.5)$$

2.1.3 Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (rapide) il est mathématiquement modélisé par les équations suivantes [17,22] :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.6)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.7)$$

2.1.4 Equation mécanique de l'arbre

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constitué de l'inertie de la turbine ramenée sur le rotor de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2.8)$$

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.9)$$

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (2.10)$$

C_{em} : Couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.11)$$

f : Coefficient de frottement

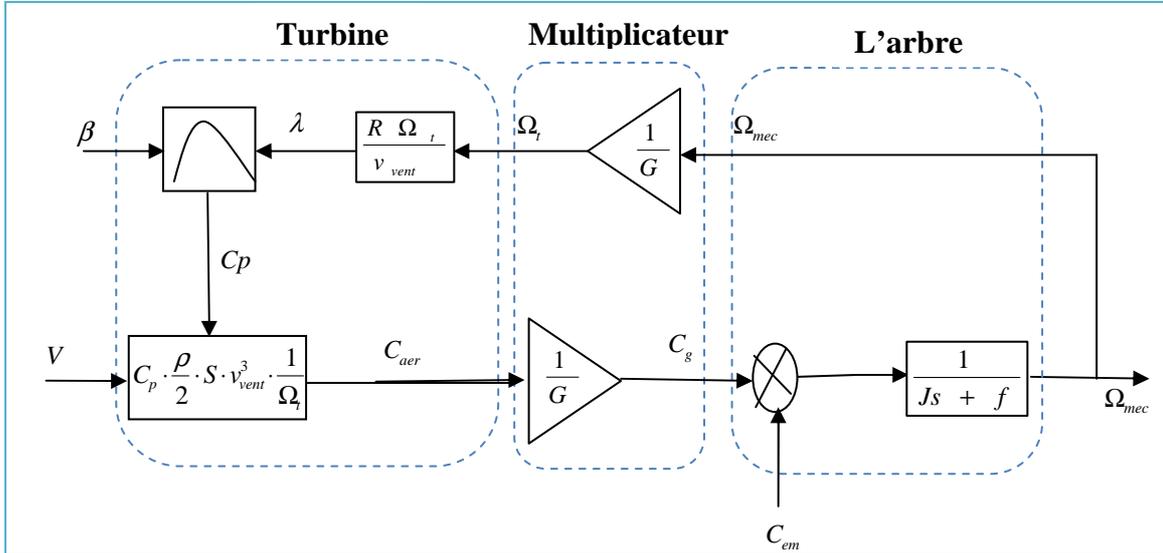


Figure 2.6 Schéma bloc du modèle de la turbine.

2.2 Stratégies de maximisation de la puissance

2.2.1 Algorithme de maximisation de la puissance

L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser la puissance capturée par la turbine. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa vitesse de référence quelque soit la vitesse du vent. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (MPPT) qui correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne (figure 2.7) [17].

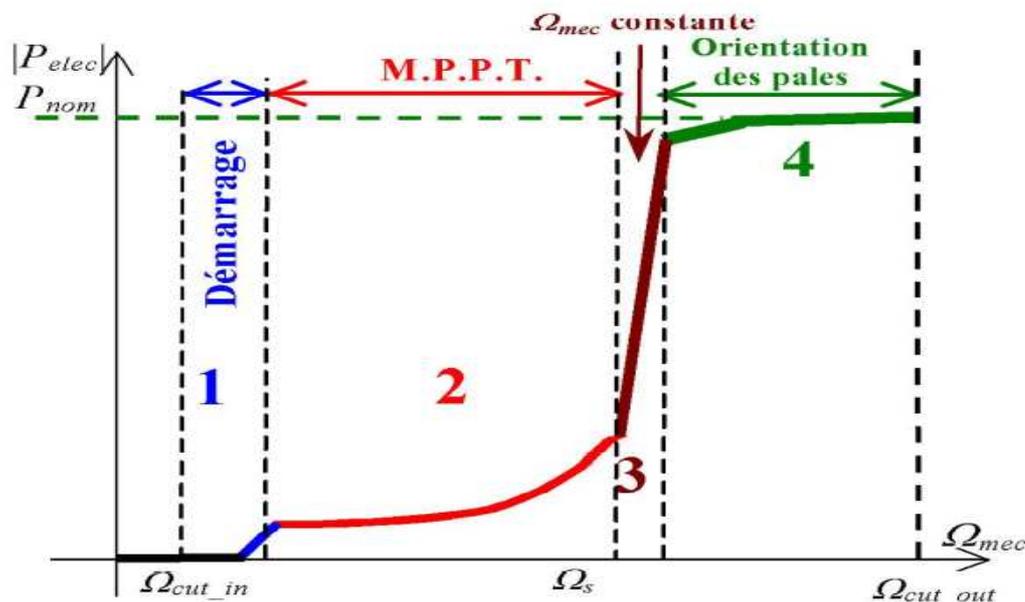


Figure 2.7 Caractéristique puissance-vitesse de l'éolienne

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones :

- **Zone1** : A partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne commence à tourner ;
- **Zone2** : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice, un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance ;
- **Zone3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90% de sa valeur nominale ;
- **Zone4** : Arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le «**Pitch Control**».

Nous distinguons deux familles de structure de commande pour la maximisation de la puissance extraite :

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

Dans notre travail on s'intéresse à la maximisation de puissance avec asservissement de vitesse de rotation.

2.2.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne elle crée donc des variations de la puissance.

Nous supposons que la génératrice et son variateur sont idéaux :

$$C_{em} = C_{em_ref} \quad (2.12)$$

D'après les relations (2.9, 2.10, 2.11)

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - f \Omega_{mec} - C_{em})$$

La première stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, on va utiliser un asservissement de vitesse.

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em_ref} = C_{ass} (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (2.13)$$

C_{ass} : C'est le régulateur de vitesse.

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{turbine_ref} \quad (2.14)$$

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

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondante à la valeur optimale de la vitesse relative (nous fixons l'angle de calage β à 2°).

$$\Omega_{turbine_ref} = \frac{\lambda_{cp\ max} \cdot v_{vent}}{R} \tag{2.15}$$

Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

La représentation simplifiée sous forme de schéma blocs est donnée comme suit :

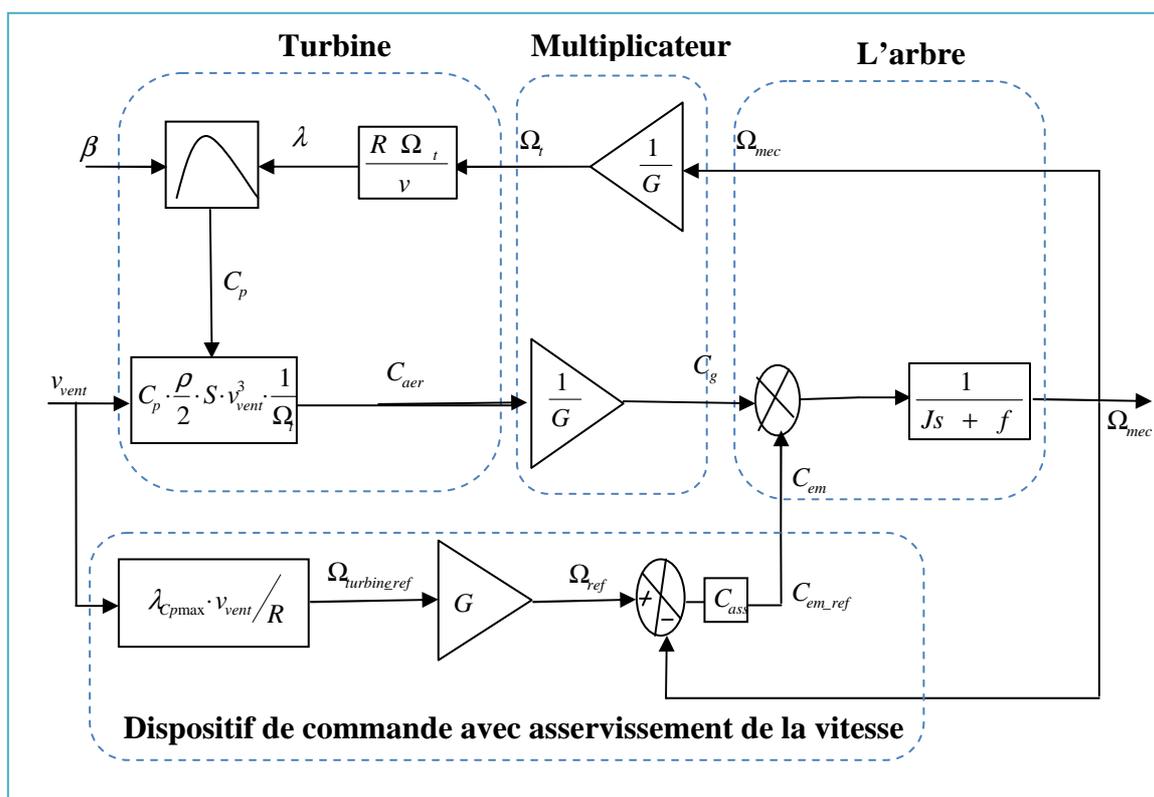


Figure 2.8 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

2.2.3 Correcteur de la vitesse de la turbine

On considère un correcteur proportionnel intégral (PI) :

$$C_{em_ref} = (b_1 + \frac{b_0}{s}) \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \tag{2.16}$$

b_1 :

Gain proportionnel

b_0 : Gain intégral

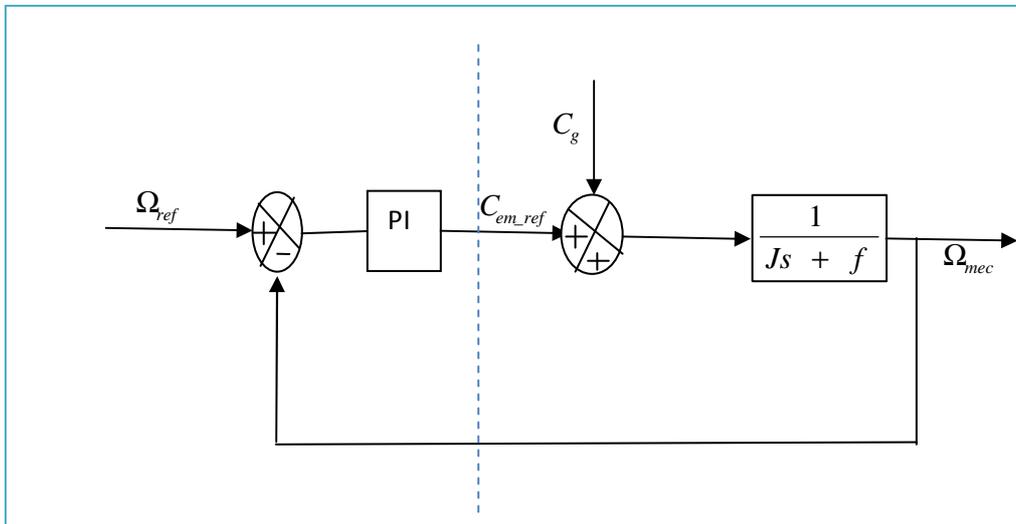


Figure 2.9 Schéma bloc du correcteur PI.

La fonction de transfert en boucle fermée se met sous la forme mathématique suivante :

$$\Omega_{mec} = F(s) \cdot \Omega_{ref} + P(s) \cdot C_g \quad (2.17)$$

$F(s)$: La fonction de transfert de la référence sur la vitesse.

$$F(s) = \frac{b_1 + b_0}{J s^2 + (f + b_1) s + b_0}$$

$$P(s) = \frac{s}{J s^2 + (f + b_1) s + b_0}$$

Il est donc nécessaire d'augmenter le paramètre b_0 pour atténuer l'action du couple éolien (C_g).

La pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont déterminés par :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{b_0}{J}} \quad \xi = \frac{f + J + b_1}{b_0} \cdot \frac{\omega_n}{2}$$

Pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement donné, on a :

$$b_0 = \omega_n^2 \cdot J$$

$$b_1 = \frac{2b_0 \cdot \xi}{\omega_n} - f - J$$

2.3 Résultats obtenus

Nous avons simulé la structure de commande en considérant un profil du vent moyen. Les résultats obtenus sont donnés par les figures suivantes :

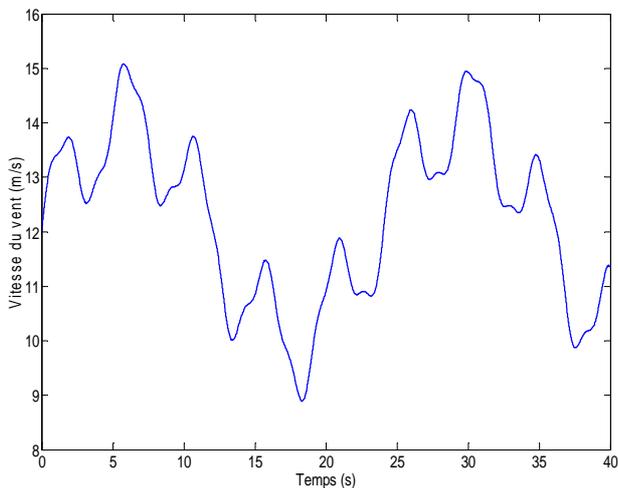


Figure 2.9 Profil du vent appliqué.

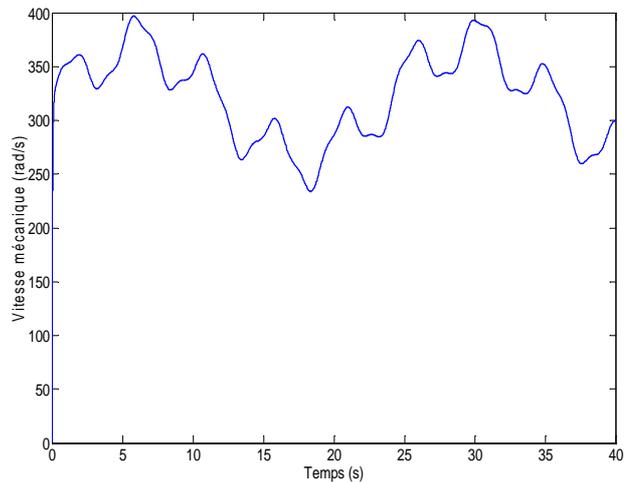


Figure 2.10 Vitesse mécanique.

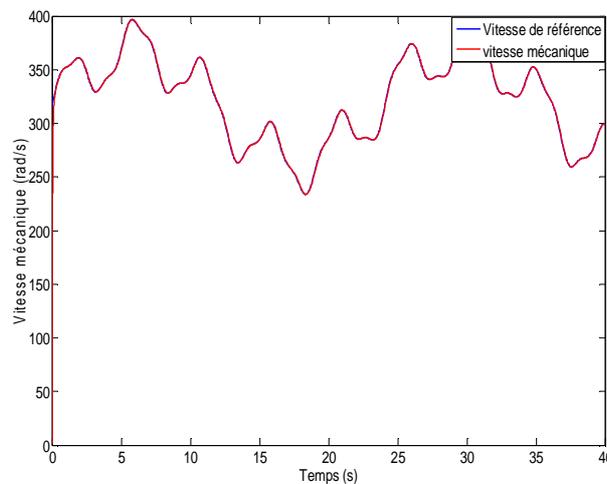


Figure 2.11 Vitesse mécanique et sa vitesse de référence.

En négligeant les pertes d'origines électrique, la puissance électrique devient égale à la puissance électromagnétique défini par : $\Omega_{mec} \cdot C_{em}$

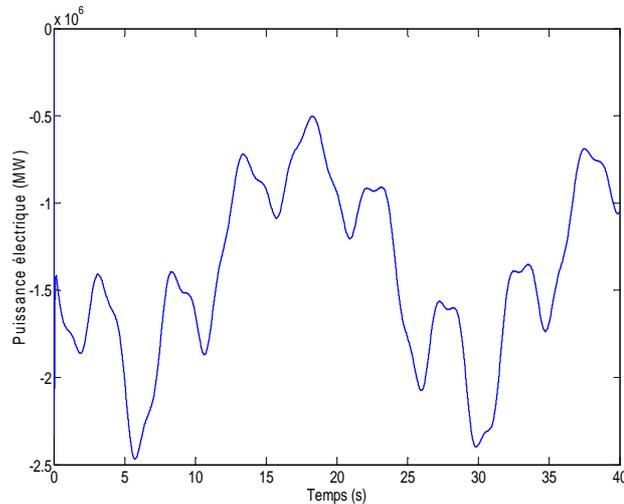


Figure 2.12 Puissance électrique.

Les résultats de simulation obtenus avec la structure de commande avec asservissement de vitesse sont montrés sur les figures (2.9) à (2.12). La vitesse mécanique, la puissance électrique et la superposition de la vitesse mécanique avec la vitesse mécanique de référence sont montrées sur les figures (2.10), (2.12) et (2.11) respectivement. Les résultats obtenus montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu.

Conclusion

Dans cette partie nous avons modélisé la turbine éolienne et l'arbre mécanique ainsi que le multiplicateur mécanique. Nous avons étudié les deux stratégies de commande utilisée pour la maximisation de puissance, avec asservissement de vitesse et sans asservissement de vitesse de rotation. Nous avons utilisé la méthode de maximisation de puissance avec asservissement de vitesse, les résultats montrent qu'un meilleur contrôle de la vitesse est obtenu en régime permanent. Dans le chapitre suivant nous allons présenter la machine synchrone à aimants permanents ainsi que sa commande vectorielle et par la suite nous donnons quelques résultats de simulation.

Introduction

Le progrès des performances globales des entraînements industriels à vitesses variables est essentiellement dû aux innovations réalisées dans le domaine de l'électronique de puissance.

L'évolution de la technologie des aimants permanents qu'ils soient à base d'alliages ou à terres rares a permis aux machines synchrones à aimants permanents dont la puissance électrique peut dépasser 1 MW de s'imposer et de faire la concurrence aux machines asynchrones et à courant continu [23]. Cela est dû principalement à ses avantages multiples, relativement à ces deux types d'actionneurs. On cite principalement :

- Facteur de puissance et rendement élevé par rapport à ceux des machines asynchrones;
- Robustesse incontestée par rapport à la machine à courant continu;
- Puissance massique élevée et précision de sa commande;
- Développement de la technologie des composants de l'électronique de puissance, et l'apparition des processeurs numériques à fréquence élevée et à forte puissance de calcul, surmontant ainsi le problème de l'implantation d'algorithmes de commande de l'onduleur assurant l'autopilotage de la machine synchrones à aimants permanents;
- Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contacts bague-balais dans ces machines.

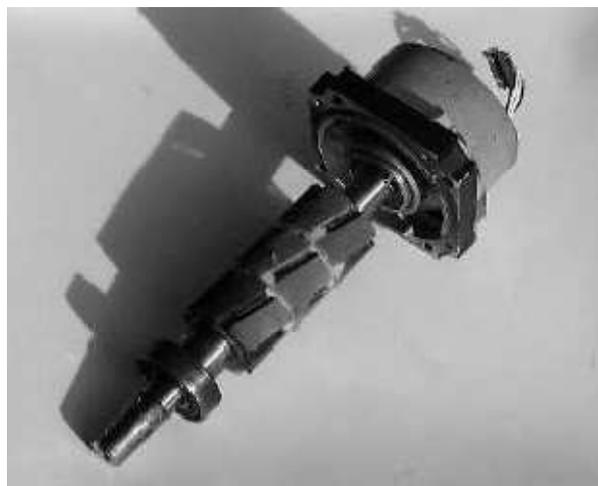


Figure 3.1 Rotor à aimants permanents

3.1 Types et caractéristiques des aimants permanents

Les aimants permanents sont utilisés de plus en plus, en particulier dans les machines tournantes. Ils ont été l'objet dans les années récentes de progrès importants liés à ceux des techniques des matériaux. On utilise actuellement trois principaux types d'aimants (les alnico, les ferrites et les alliages métaux-terres rares). Ce choix permet, de privilégier soit des performances magnétiques très élevées soit une stabilité en température [23].

Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation de deuxième quadrant du plan B-H. La figure 3.2 est caractérisée par :

- L'induction rémanente B_r , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé ;
- Le champ coercitif de l'induction H_{CB} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable ;
- Les valeurs H_m et B_m du point de fonctionnement optimal M correspondant à $(BH)_{max}$

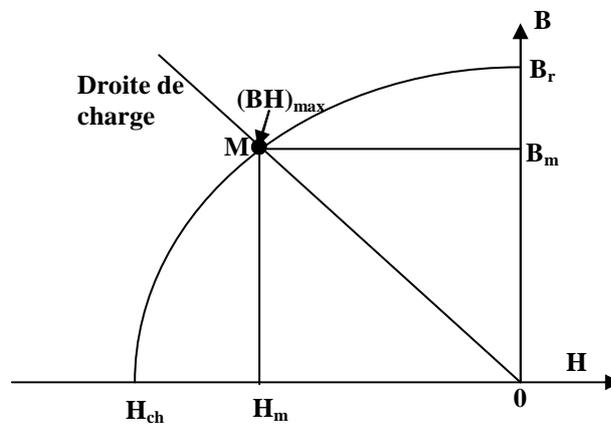


Figure 3.2 Courbe de désaimantation

Les trois grands types d'aimants permanents utilisés dans les machines tournantes sont :

- Les ferrites : les aimants permanents de type ferrite utilisent des matériaux de la famille des céramiques. Ils sont par conséquent électriquement non conducteurs, et quasiment non ferromagnétiques. Les caractéristiques essentielles sont : une faible induction rémanente et un champ coercitif élevé. Ils sont surtout intéressants pour leur bon rapport densité d'énergie-prix.
- Alnico : est un aimant permanent réalisé à partir d'un alliage de fer, d'aluminium et de nickel. Il est caractérisé par une induction rémanente élevée et un champ coercitif faible. Il est le siège de pertes fer. L'alnico est un aimant de faible qualité, il est surtout intéressant pour son prix.
- Les alliages métaux de transitions-terre rares : sont à l'heure actuel les aimants permanents les plus performants qui entrent dans la composition des inducteurs des machines synchrones. La version la plus courante est l'alliage Samarium-cobalt, tels que $S_mC_o^5$ et $S_m^2C_o^{17}$, qui est quasiment amagnétique et qui est caractérisé par une induction rémanente et champs coercitif élevés ($B_r \approx 1.25$ et $H_c \approx 1000 \text{ KA/m}$). La densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est trois fois plus importante que les Alnico, et six fois plus importante que pour les ferrites. On peut ainsi réduire le volume du rotor, donc augmenter le couple massique de la machine et réduire son inertie. Le seul inconvénient est lié au prix.

Les aimants sont caractérisés principalement par la valeur maximale de l'induction rémanente (B_r) et par la valeur de champ coercitif (H_c) associée. Le diagramme suivant permet de comparer les différentes caractéristiques des aimants cités précédemment.

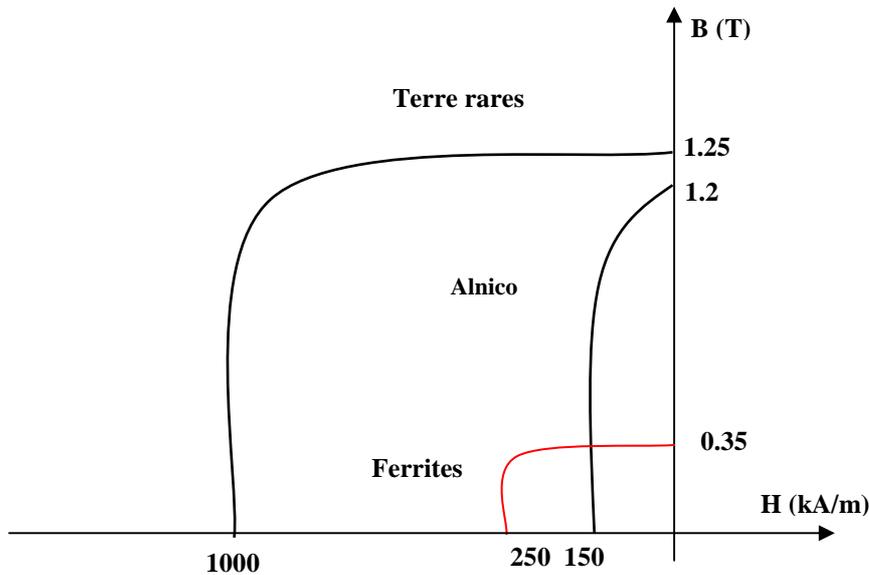


Figure 3.3 Caractéristiques des aimants permanents

3.2 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone classique comporte comme la machine asynchrone, un stator bobiné dont les enroulements sont placés dans des encoches. Chaque enroulement est réalisé de manière à créer une force magnétomotrice sinusoïdale dans l'entrefer. Les forces magnétomotrices ainsi créées par chacun des trois enroulements sont décalées deux à deux d'un angle de $2\pi/3$ rad électrique, tournant à la pulsation électrique ω_s . En alimentant l'enroulement triphasé statorique par des courants triphasés de pulsation électrique ω_s , déphasés par un angle de $2\pi/3$ rad électrique, on crée un champ tournant à la pulsation électrique ω_s .

Le rotor ou la roue polaire dont le nombre de pôles est égal à celui du stator, est excité par un bobinage parcouru par un courant continu afin de produire une force magnétomotrice dites d'excitation \vec{F}_f .

Dans le cas de la machine synchrone à aimants permanents, l'inducteur est remplacé par des aimants permanents. Ceci présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation.

3.3 Différentes structures de la machine synchrone à aimants

Suivant la disposition des aimants on distingue :

3.3.1 Structure à aimants en surface (déposés)

Appellée aussi machines à inducteurs lisses, où les aimants sont disposés au niveau de l'entrefer sur un noyau ferromagnétique lisse. L'induction B_e dans l'entrefer est celle des aimants, elle est de forme non sinusoidale, généralement de forme trapézoïdale. Ces derniers, qui sont composés de terres rares, peuvent créer ainsi une induction dans l'entrefer supérieur à 0.6 T [23]. L'aimantation dans ce type de structures est radiale ou bien combinée.



Figure 3.4 Moteur à aimants en surface

3.3.2 Structure à aimants insérés

Dans cette structure on trouve celle avec une aimantation tangentielle et celle avec une aimantation radiale.

Les aimants de la machine sont placés entre des pièces polaires. La répartition spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer peut être non sinusoidale, ce qui entraîne des pulsations sur le couple électromagnétique lors d'une alimentation en courant sinusoïdaux [23].

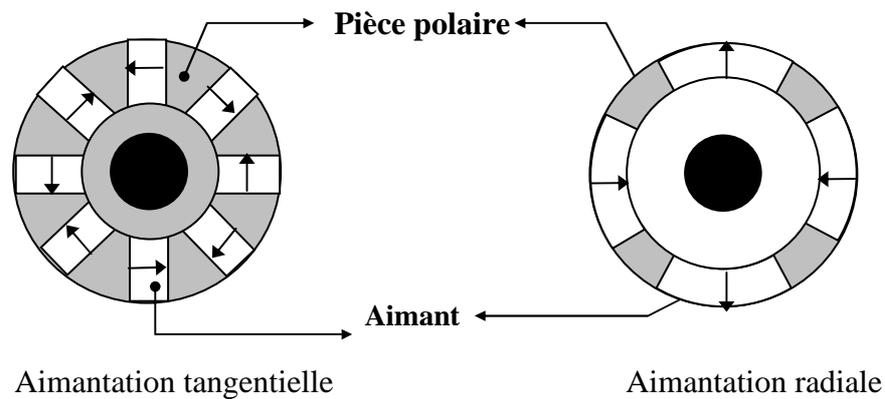


Figure 3.5 Moteur à aimants insérés

3.4 Avantages et inconvénients de la machine synchrone à aimants Permanents

La machine synchrone à aimants permanents présente un certain nombre d'avantages à savoir :

- Une dynamique de la vitesse ; faible inertie du rotor donc faible constante de temps mécanique.
- Suppression des contacts glissants et donc possibilité de travailler en air corrosif.
- Meilleures caractéristiques thermiques ; la localisation des pertes joules et des pertes fer au stator simplifie le refroidissement de la machine.
- Puissance massique et rendement importants.
- Robustesse incontestée par rapport au moteur à courant continu.

Ces avantages ont poussé son développement afin de répondre aux exigences grandissantes de positionnement et d'entraînements à performances élevées. Cependant l'inconvénient de ne pas avoir accès au réglage du courant inducteur rend difficile le fonctionnement en survitesse.

3.5 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

3.5.1 Les Hypothèses simplificatrices :

Afin de simplifier l'étude, la modélisation de la machine nécessite certaines hypothèses simplificatrices [23,24] :

- Le stator est connecté en étoile, avec neutre en l'air pour annuler la composante homopolaire du courant.
- La saturation du circuit magnétique est négligée pour exprimer les flux comme des fonctions linéaires du courant.
- La distribution de la F.m.m. dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont négligés.
- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligeables.
- L'effet de peau et celui de la température sur les résistances sont négligés.

3.5.2 Les équations électriques de la machine synchrone à aimants permanents

La machine à aimant possède trois enroulements statoriques fixes, a, b, c. Au rotor on trouve des aimants permanents.

Le flux créé par les aimants permanents est supposé à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer, les expressions des flux mutuelles inducteur-phases sont donnée par [23] :

$$\phi_a = \phi_f \cos(p\theta) \quad (3.2)$$

$$\phi_b = \phi_f \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.3)$$

$$\phi_c = \phi_f \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.4)$$

ϕ_f : est la valeur crête du flux créé par l'aimant permanent à travers les enroulements statorique.

Les équations électriques de la machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel triphasé sont :

$$[v_a] = [R_s] [i_a] + \frac{d\phi_a}{dt} \quad (3.5)$$

$$[v_b] = [R_s] [i_b] + \frac{d\phi_b}{dt} \quad (3.6)$$

$$[v_c] = [R_s] [i_c] + \frac{d\phi_c}{dt} \quad (3.7)$$

$[\phi_a \ \phi_b \ \phi_c]$: vecteurs des flux dans les enroulements statoriques.

$[R_s]$: Résistance d'une phase d'enroulement statorique.

3.6 Modélisation dans le repère de Park de la machine synchrone à aimants permanents

3.6.1 La transformation de Park

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système.

Dans la théorie de PARK, on utilise la transformation unique permettant le passage direct du système triphasé au système diphasé tournant, cette transformation est notée par $[P]$ d'où :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Nous appliquons donc le changement de variables défini par la matrice $P(\theta)$ aux équations des tensions, courant, et flux on obtient [25] :

$$[i_{dq}] = P(\theta) [i_{abc}] \quad (3.9)$$

$$[v_{dq}] = P(\theta) [v_{abc}] \quad (3.10)$$

$$[\phi_{dq}] = P(\theta) [\phi_{abc}] \quad (3.11)$$

La matrice inverse de park notée $P(\theta)^{-1}$, est donnée par la matrice suivante :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

- **Equation des tensions**

En transformant les équations statoriques en leurs nouvelles équations dans le repère (d, q) par l'application de la transformation de Park on obtient le système d'équation suivant [23, 25, 24]:

$$[v_{dq}] = [P(\theta)][v_{abc}] = [P(\theta)][R_s][i_{abc}] + [P(\theta)]\frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \quad (3.13)$$

Les composantes de la tension statorique sont données dans le repère de Park par :

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (3.14)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_f \quad (3.15)$$

Avec :

$$\phi_q = L_q i_q \quad (3.16)$$

$$\phi_d = L_d i_d + \phi_f \quad (3.17)$$

- **Expression de Couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante [26, 27] :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \{ (L_d - L_q) i_d i_q + \phi_f \cdot i_q \} \quad (3.18)$$

Où :

L_d, L_q : Inductance du stator ;

ϕ_f : Le flux de l'aimant permanent ;

p : Nombre de paire de pôles.

- **Equation mécanique**

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} = C_{em} - C_r \quad (3.19)$$

$$J = J_g + J_{turbine} \quad (3.20)$$

Avec :

J_g : L'inertie de la machine.

$J_{turbine}$: L'inertie de la turbine éolienne.

Ω_{mec} : La vitesse mécanique du rotor.

J : L'inertie totale du système (machine + turbine).

C_r : Le couple résistant.

f : Le coefficient de frottement visqueux.

C_{em} : Le couple électromagnétique.

3.7 Simulation et interprétation

La simulation numérique est bien connue aujourd'hui dans le domaine des machines électriques. Elle nous permet d'analyser et de simuler les systèmes avec beaucoup de précision.

De nos jours, il existe toute une série de logiciels, dans notre étude nous avons utilisé le logiciel « MATLAB/SIMULINK », afin de simuler la machine synchrone à aimants permanents.

Dans notre travail, nous avons utilisé une machine synchrone à aimants permanents à aimantation de type radial avec aimants montés en surface, le modèle de la machine sera donc équivalent à celui d'une machine à pôles lisse ($L_d=L_q=L_s$).

La machine à attaque directe, possède 80 paires de pôles et peut directement être couplée à la turbine éolienne.

Les puissances actives et réactives sont calculées par :

$$P = V_d i_d + V_q i_q \quad (3.21)$$

$$Q = V_q i_d - V_d i_q \quad (3.22)$$

Les résultats de simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents associé à la turbine éolienne sont donnés par les figures qui suivent :

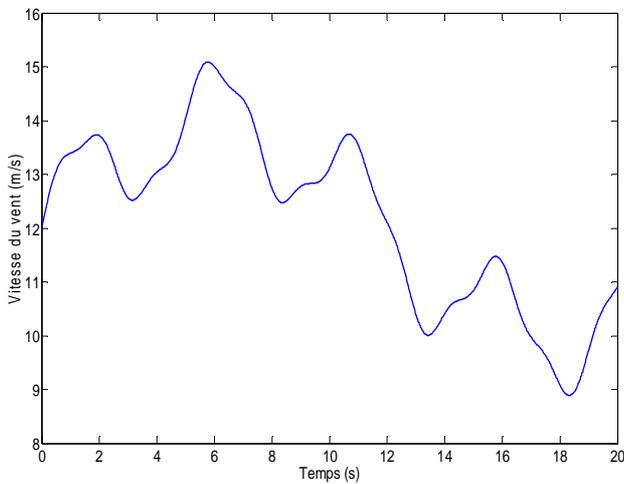


Figure 3.6 Profil du vent

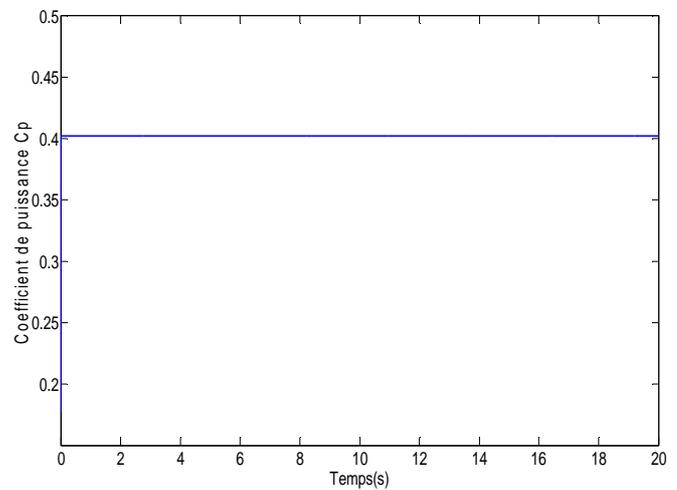


Figure 3.7 Coefficient de puissance

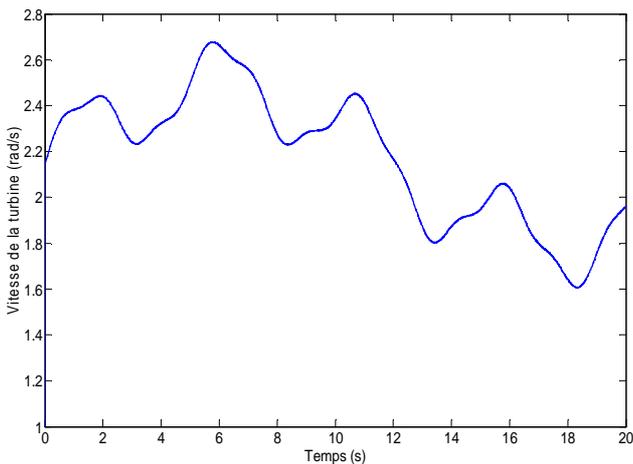


Figure 3.8 Vitesse de la turbine

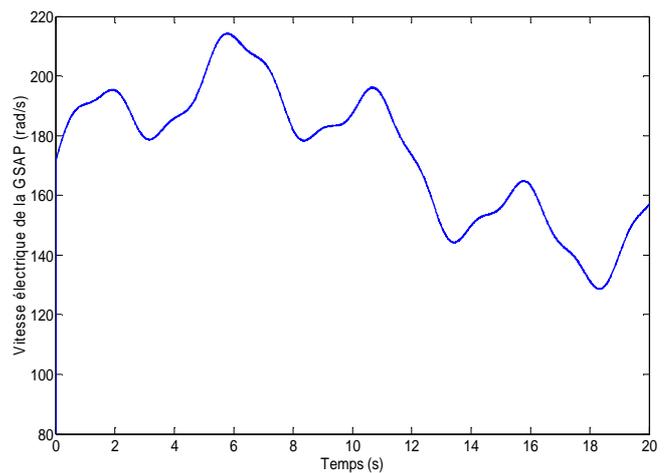
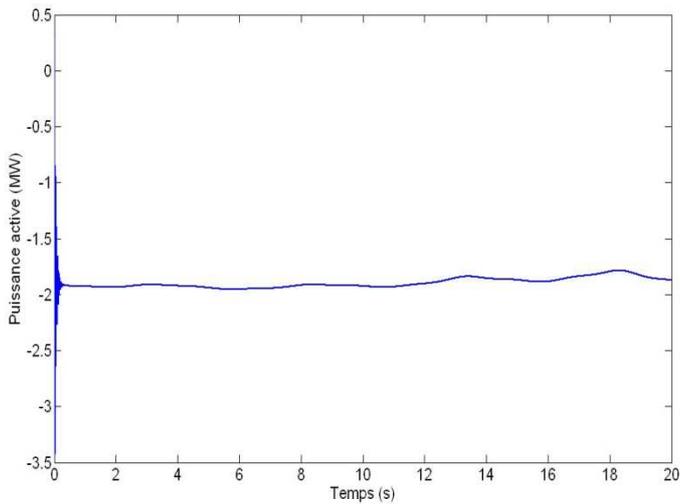
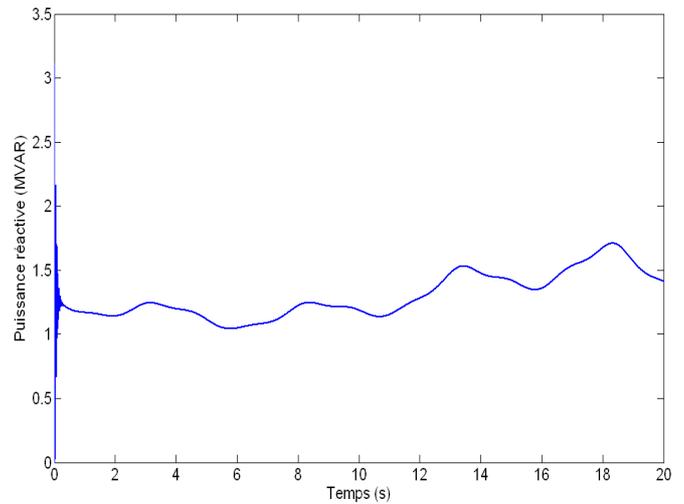
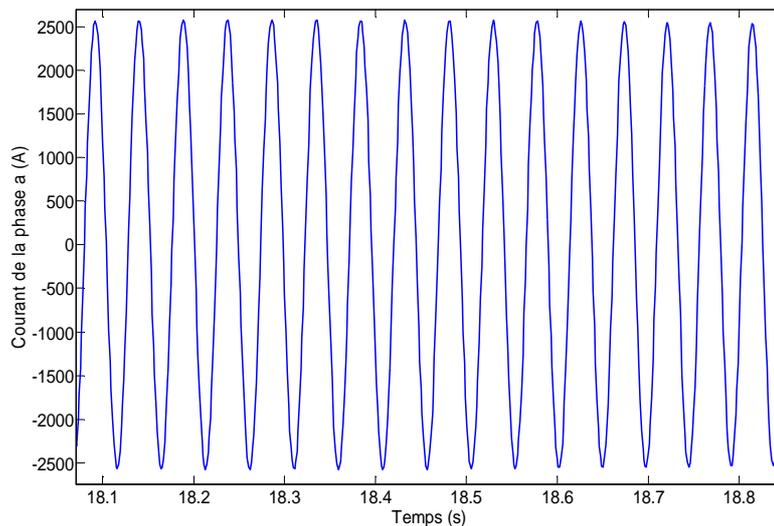


Figure 3.9 Vitesse électrique de la GSAP

**Figure 3.10** Puissance active**Figure 3.11** Puissance réactive**Figure 3.12** Courant de la phase a

Nous remarquons que les résultats prennent la forme du vent, le coefficient de puissance est de 0,4 (c'est la valeur maximal pour avoir un maximum de puissance extraite du vent). La puissance active est de l'ordre de 2MW. Mais notre système présent des fluctuations dues à la variation de la vitesse du vent pour cela le système nécessite une commande pour maintenir cette puissance à sa valeur nominale.

3.8 Redresseur triphasé à contrôle vectoriel par MLI

Parmi tous les convertisseurs AC-DC, la solution de référence est sûrement le redresseur triphasé à modulation de largeur des impulsions figure 3.13. Il permet un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée. Par un autopilotage de la machine synchrone, il peut contrôler les grandeurs électromécaniques tels que le couple C_{cem} ou la vitesse de rotation de la génératrice.

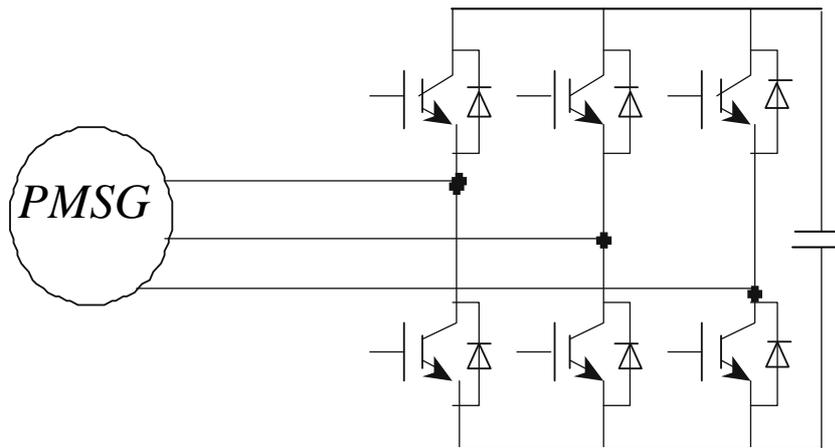


Figure 3.13 Redresseur MLI

La commande de la génératrice est basée sur un pilotage vectoriel classique avec capteur de position. Le champ magnétique d'excitation dans une machine synchrone est produit par le rotor. Ce champ magnétique tourne avec une vitesse angulaire égale à la vitesse de rotation électrique. Un autre champ magnétique tournant est produit par les enroulements de stator. Ce second champ est synchronisé par autopilotage sur la vitesse électrique. Ce champ est appelé la réaction de l'induit. La vitesse de rotation est liée à la pulsation du champ tournant par la relation :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (3.23)$$

Où :

p : nombre de paires de pôles de la machine.

La commande vectorielle consiste à orienter le flux de la réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par les aimants. Parmi les stratégies de commande vectorielle

appliquées à une machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant directe i_d à zéro est la plus répandue [28].

D'une manière générale, le couple électromagnétique développé par une machine synchrone à aimants permanents peut s'écrire dans le repère de Park (d, q) sous la forme suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p[(L_d - L_q) i_d i_q + \phi_f \cdot i_q] \quad (3.24)$$

Étant donné que le flux rotorique ϕ_f est fixé, la valeur du couple désirée peut être obtenue en contrôlant les composantes i_d et i_q . Puisque la machine est à pôles lisses, alors ($L_d=L_q=L_s$)

L'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \phi_f \cdot i_q \quad (3.25)$$

Le couple électromagnétique ne dépend que de la composante en quadrature (i_q). Dans ce cas le déphasage du courant par rapport à la f.e.m est nul ; le couple obtenu est alors proportionnel au courant d'alimentation de la machine comme dans le cas d'une machine à courant continu à excitation indépendants.

3.8.1 La commande vectorielle avec découplage de la régulation des courants par compensation

Pour simplifier l'algorithme de commande nous synthétisons la commande avec la régulation des deux courants dans les axes d et q.

Le model de la machine synchrone dans le repère de Park conduit à un système différentiels où les courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre, ils sont reliés par des termes ou des coefficients non linéaires.

En prenant compte des équations du modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents présentées par les équations (3.14) et (3.15), les transformées de Laplace sont obtenues :

$$v_d = R_s i_d + p L_d i_d - \omega_r \phi_q \quad (3.26)$$

$$v_q = R_s i_q + p L_q i_q + \omega_r \phi_d \quad (3.27)$$

$$e_q = \omega_r \cdot \phi_f \quad (3.28)$$

e_q : f.e.m de la machine sur l'axe q

Les termes de couplage en $E_{d,q} = \omega_r \cdot \phi_{d,q}$ sont considérés comme des perturbations mesurables. La fonction de transfert de la machine est sous forme :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (3.29)$$

$$G_s(p) = \frac{i_{d,q}(p)}{(v_{d,q}(p) + E_{d,q}(p))} \quad (3.30)$$

Avec la constante de temps électrique :

$$T_e = \frac{L_s}{R_s} \quad (3.31)$$

Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné sur la figure 3.14

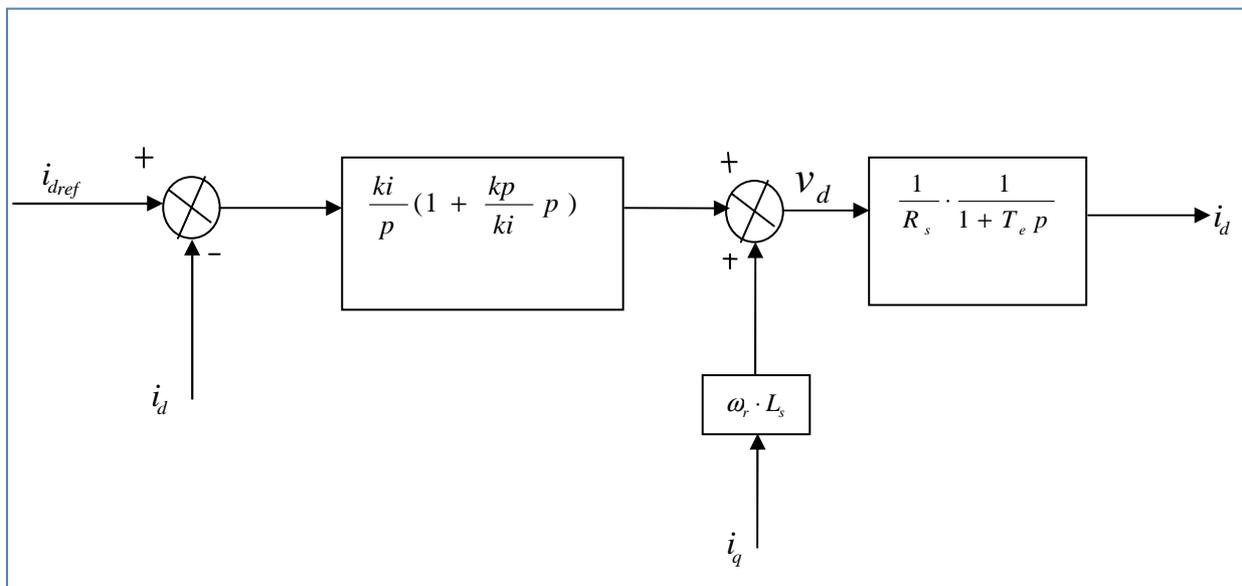


Figure 3.14. Boucle de régulation de courant i_d

En boucle ouverte la fonction de transfert est égale à :

$$G_0(p) = \frac{ki}{kp} \left(1 + \frac{kp}{ki} p\right) \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad (3.32)$$

Les paramètres du régulateur sont déterminés par la méthode de la compensation du pôle en boucle ouverte. Ainsi, les constantes de temps sont égales à :

$$T_0 = T_e = \frac{kp}{ki}. \quad (3.33)$$

En boucle fermée la fonction de transfert devient :

$$G(p) = \frac{G_0(p)}{1 + G_0(p)} = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{ki} p} = \frac{1}{1 + T_f p}. \quad (3.34)$$

En boucle fermée la constante de temps T_f est donc égale à :

$$T_f = \frac{R_s}{ki}. \quad (3.35)$$

Alors :

$$ki = \frac{R_s}{T_f}. \quad (3.36)$$

Le coefficient proportionnel kp du régulateur est calculé d'après l'expression (3.33):

$$kp = \frac{L_s}{T_f}. \quad (3.37)$$

Le schéma de la commande en couple est établie est présenté sur la figure 3.16.

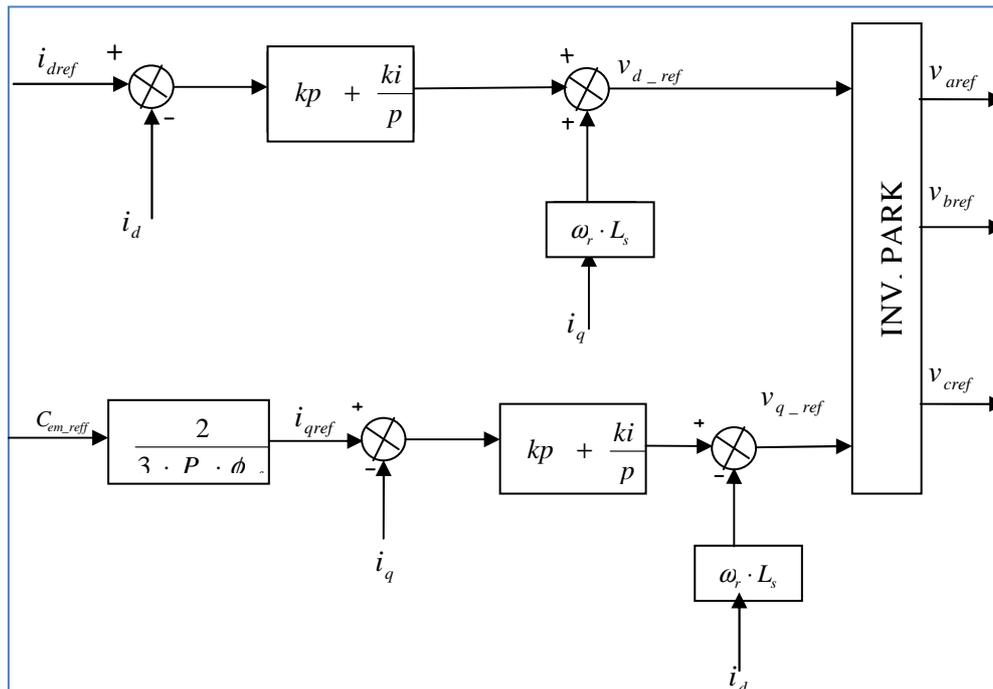


Figure 3.16 Stratégie de commande en couple.

Dans notre système deux boucles de régulation sont utilisées, une boucle pour contrôler le courant i_d tel que le courant de référence est fixé à zéro et l'autre pour contrôler la vitesse de rotation qui nous donne le couple de référence.

L'angle θ_e utilisé dans la transformation de repère abc vers le repère (d, q) est calculé à partir de la vitesse de rotation de PMSG.

La figure suivante représente le schéma complet de commande de la génératrice.

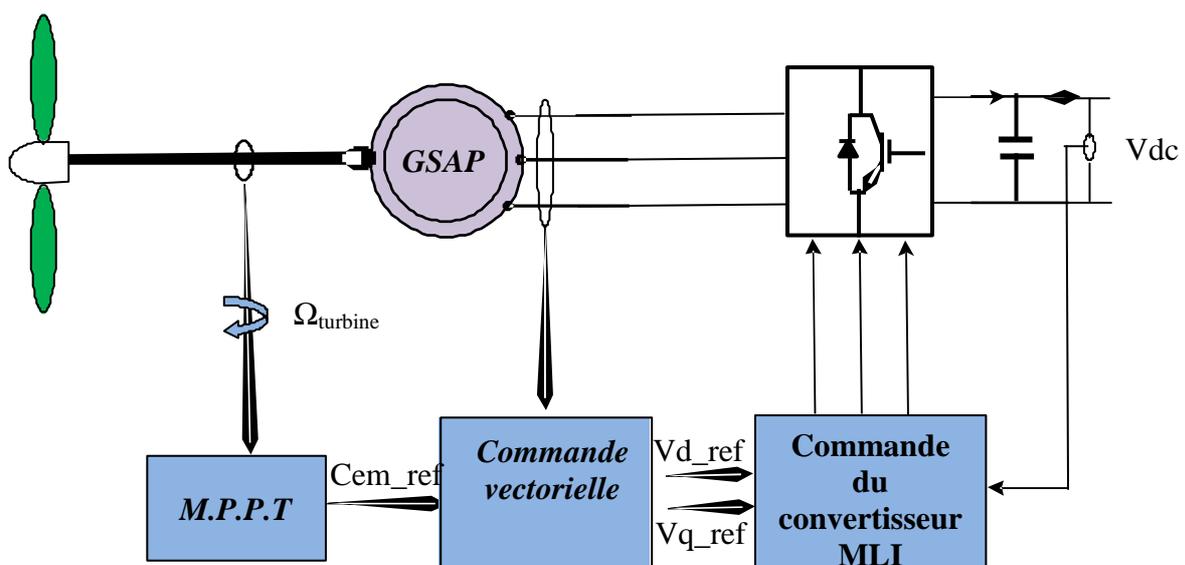


Figure 3.17 Commande de la génératrice synchrone à aimants permanents

Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes :

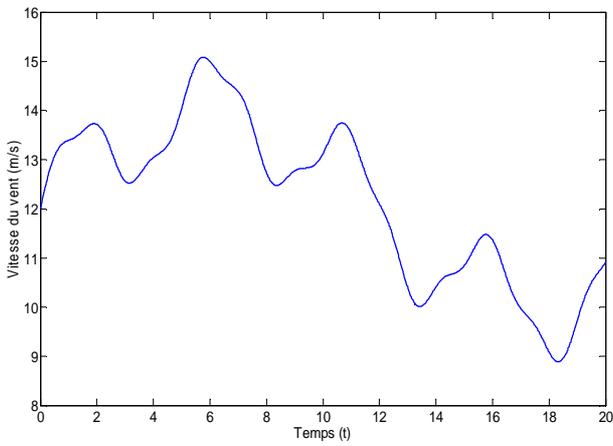


Figure 3.17 Profil du vent

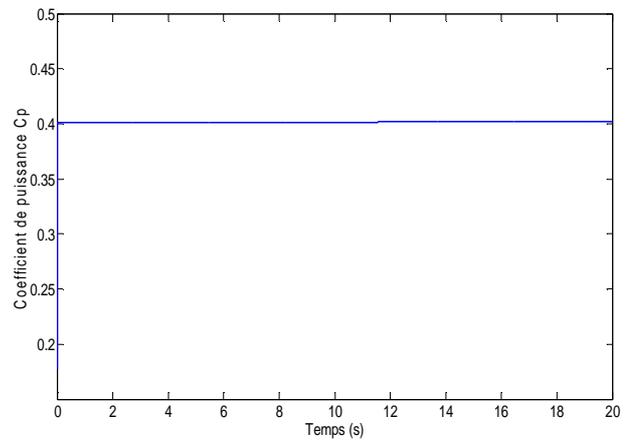


Figure 3.18 Coefficient de puissance

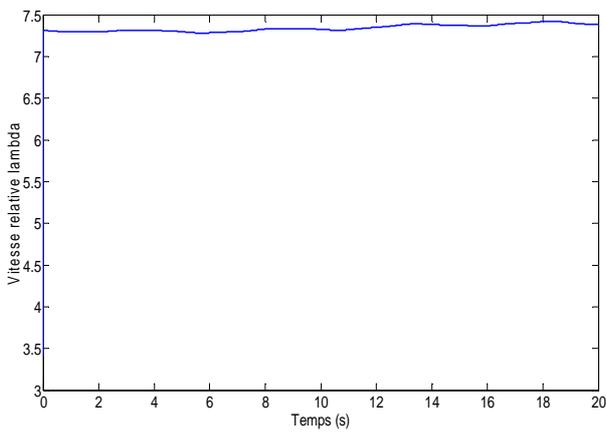


Figure 3.19 Vitesse relative de la turbine

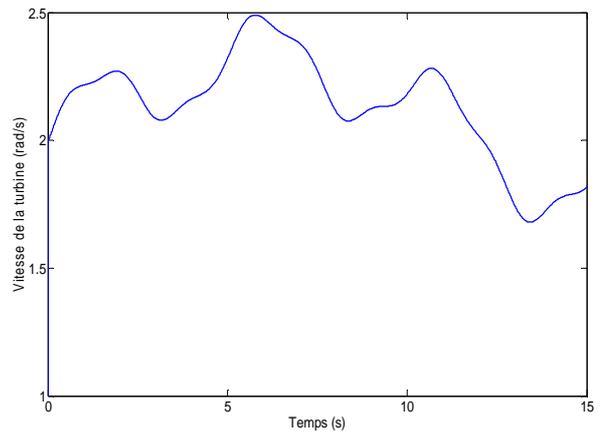


Figure 3.20 Vitesse de rotation de la turbine

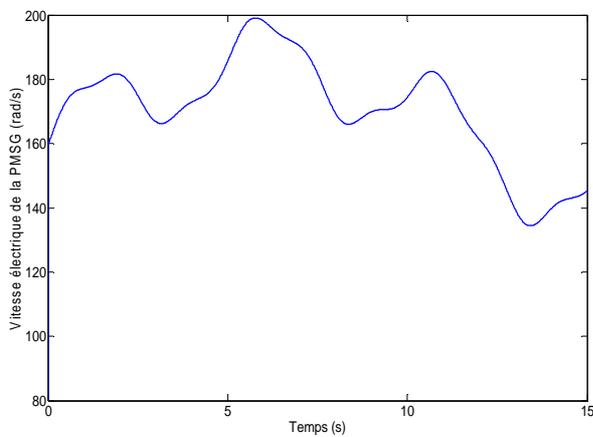


Figure 3.21 Vitesse électrique de la PMSG

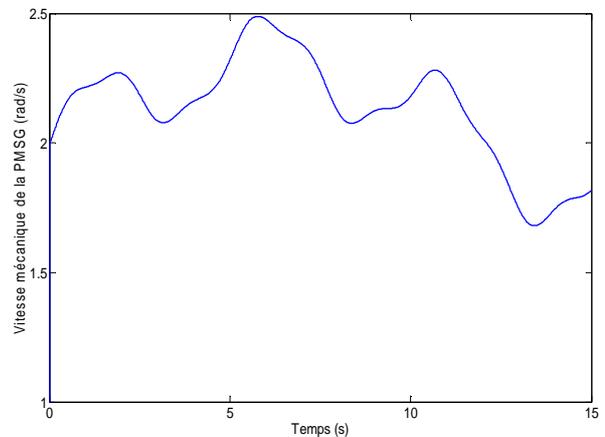


Figure 3.22 Vitesse mécanique de la PMSG

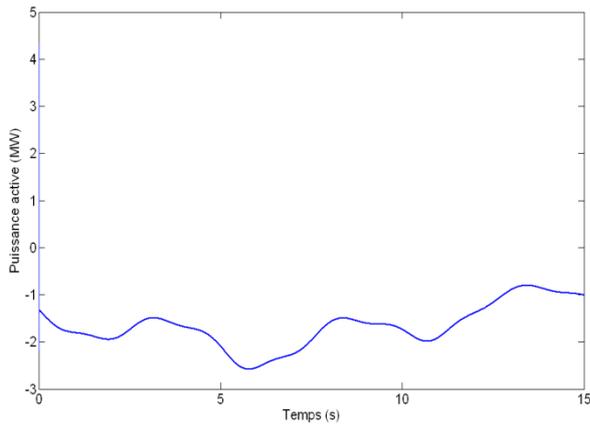


Figure 3.23 Puissance active de la PMSG

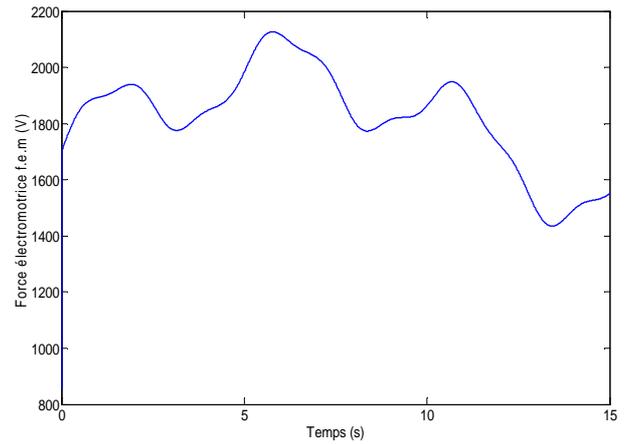


Figure 3.24 Force électromotrice de la PMSG

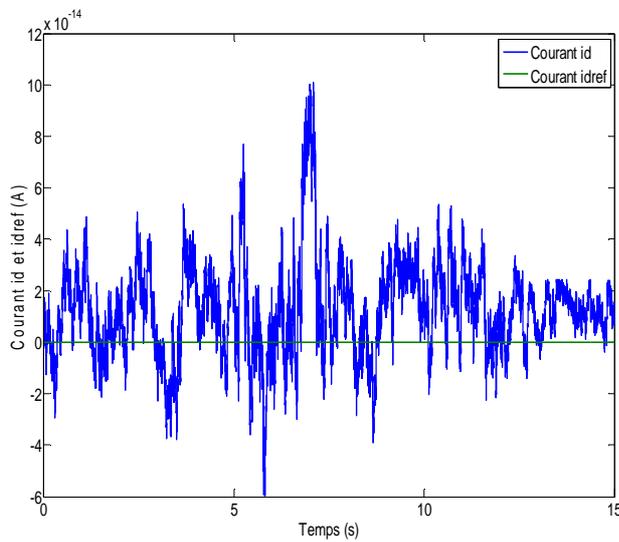


Figure 3.25 Courant id et idref

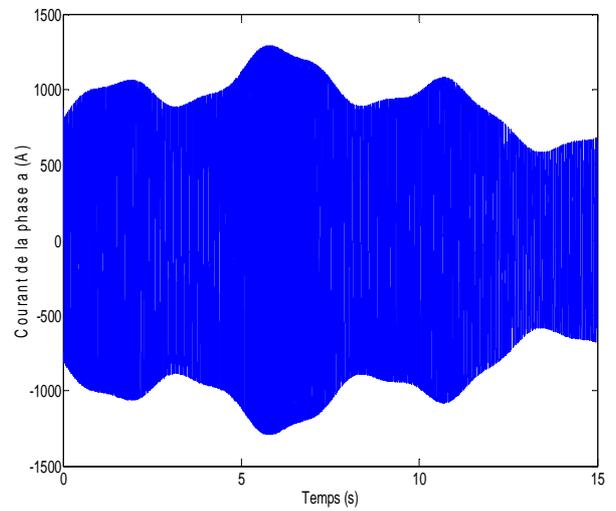


Figure 3.26 Courant de phase A

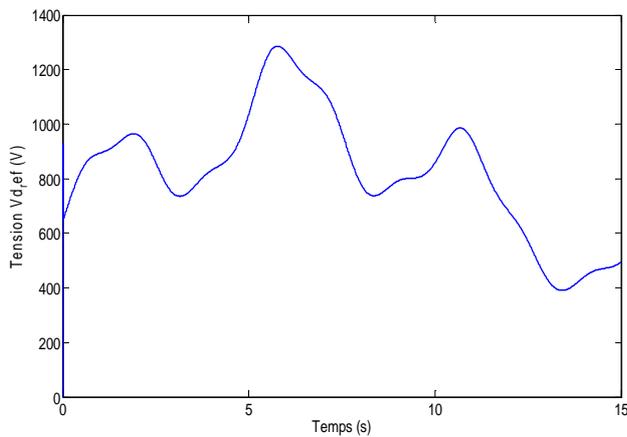


Figure 3.27 Tension de référence sur l'axe d

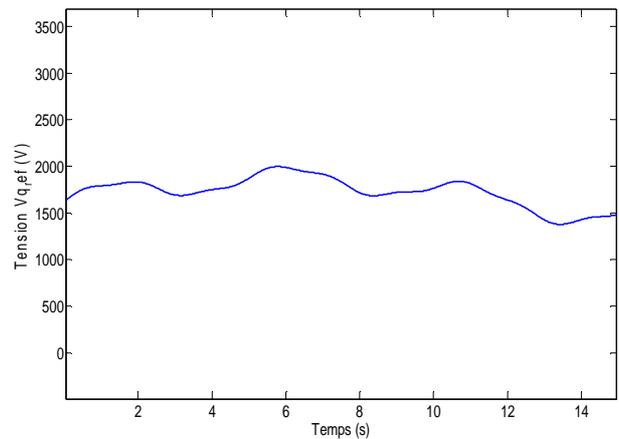


Figure 3.28 Tension de référence sur l'axe q

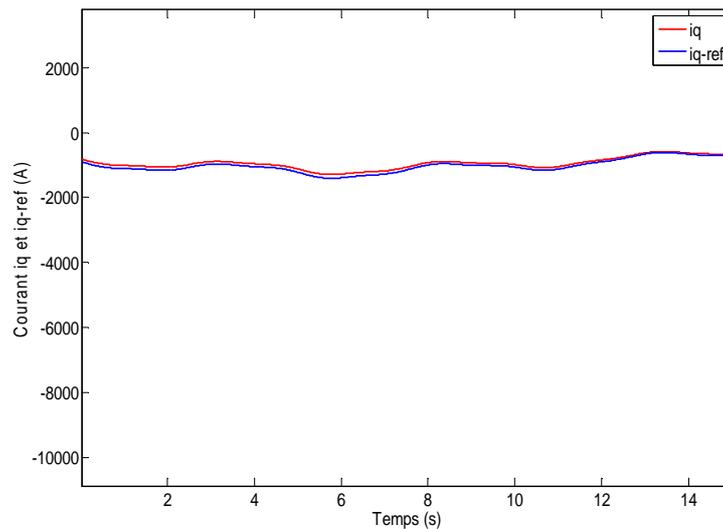


Figure 3.29 Variation de courant sur l'axe q

Les résultats présentent des fluctuations qui sont dues à la variation de la vitesse du vent (le courant de phase peut atteindre des valeurs supérieures à 1kA). Le coefficient de puissance C_p est maintenu à sa valeur maximale (0.4), la vitesse relative optimale est aussi maintenue à sa valeur (7.5) pour capté le maximum de puissance par la stratégie de maximisation de puissance (MPPT). Le but de la régulation précédemment établie étant la commande en puissance active et réactive de la GSAP, il devient impératif d'analyser le suivi des consignes imposées (figure 3.25 et 3.29). Les deux tensions de référence sur l'axe d et q sont données respectivement par les figures (3.27 et 3.28) qui sont utilisées comme entrée de redresseur MLI pour assurer le fonctionnement à vitesse variable.

Conclusion

Cette partie est consacrée à la modélisation et la présentation de la machine synchrone à aimants permanent, pour cela nous avons donné un bref aperçu sur la machine synchrone ; son principe de fonctionnement ainsi que les différentes structures des machines. Nous avons donné le modèle mathématique de la machine et une simulation numérique a été effectuée sous Matlab/Simulink. Les résultats de simulation de la PMSG avec association de la turbine éolienne sont présentés.

Dans la deuxième partie nous avons réalisé la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents afin d'avoir les tensions de référence qui seront utilisées comme entrées par le redresseur MLI triphasé. Par la suite, nous avons donné quelques résultats de simulation. Le but de cette étude c'est le fonctionnement à vitesse variable en utilisant des convertisseurs statiques pour envoyer le maximum de puissance extraite du vent au réseau électrique qui sera l'objet de prochain chapitre.

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la structure globale de la chaîne de conversion éolienne (figure 4.1) à base de la machine synchrone à aimants permanents avec une modélisation détaillée des différents éléments. Dans un premier temps nous présentons le modèle de la liaison au réseau, qui comporte le model de bus continu, le filtre et l'onduleur connecté au réseau. Pour le modèle de la machine, il a été présenté dans le chapitre 3. Le contrôle de convertisseur connecté au réseau sera décrit ainsi que le contrôle de bus continu. Le modèle complet de l'éolienne à vitesse variable est ensuite présenté. Enfin nous présentons les résultats de simulations du système global.

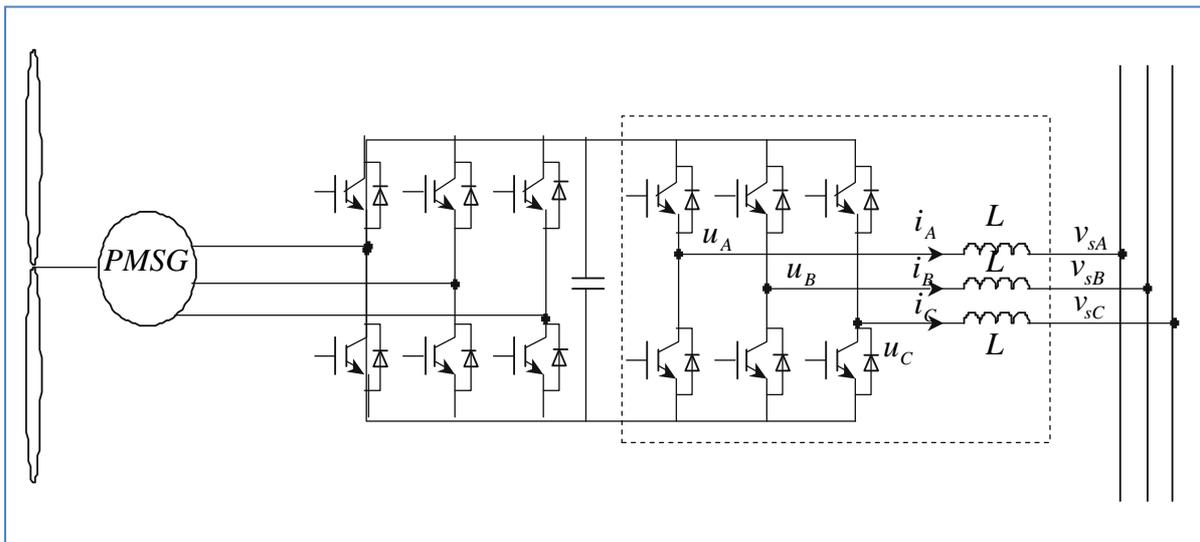


Figure 4.1 Exemple d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

4.1 Modèles du convertisseur de puissance

4.1.1 Modèle du convertisseur de puissance dans le repère naturel

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur de puissance dans le repère triphasé naturel. Puisque les deux convertisseurs utilisés dans la réalisation de la chaîne de conversion éolienne ont la même structure et la même technique de commande, donc nous allons modéliser le convertisseur connecté au réseau. La structure de l'ensemble de la liaison au réseau (figure 4.2) est constituée de :

- ❖ Un bus continu ;
- ❖ Un convertisseur MLI ;
- ❖ Un filtre.

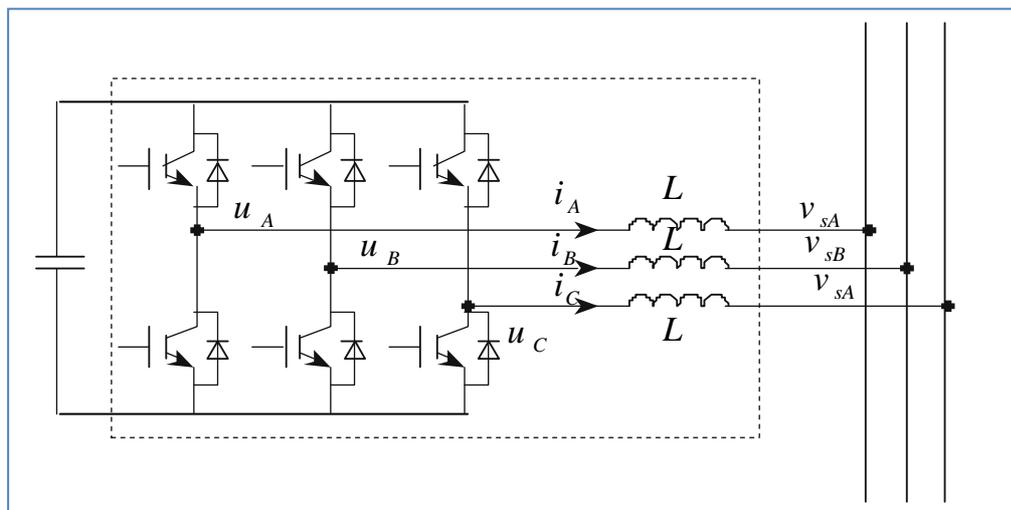


Figure 4.2 Schéma électrique de la liaison au réseau via un convertisseur MLI

4.1.1.1 Modélisation de l'onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion de l'énergie entre deux dipôles ; le générateur fonctionnant en continu et le récepteur fonctionnant en alternatif. Il est composé de six transistors ($T_1, \dots, T_3, T_1', \dots, T_3'$) shuntés en antiparallèle par des diodes de

récupération ($D_1, \dots, D_3, D_1', \dots, D_3'$) (figure 4.3) et il est le constituant principal de la plupart des variateurs de vitesse des moteurs à courant alternatif [29].

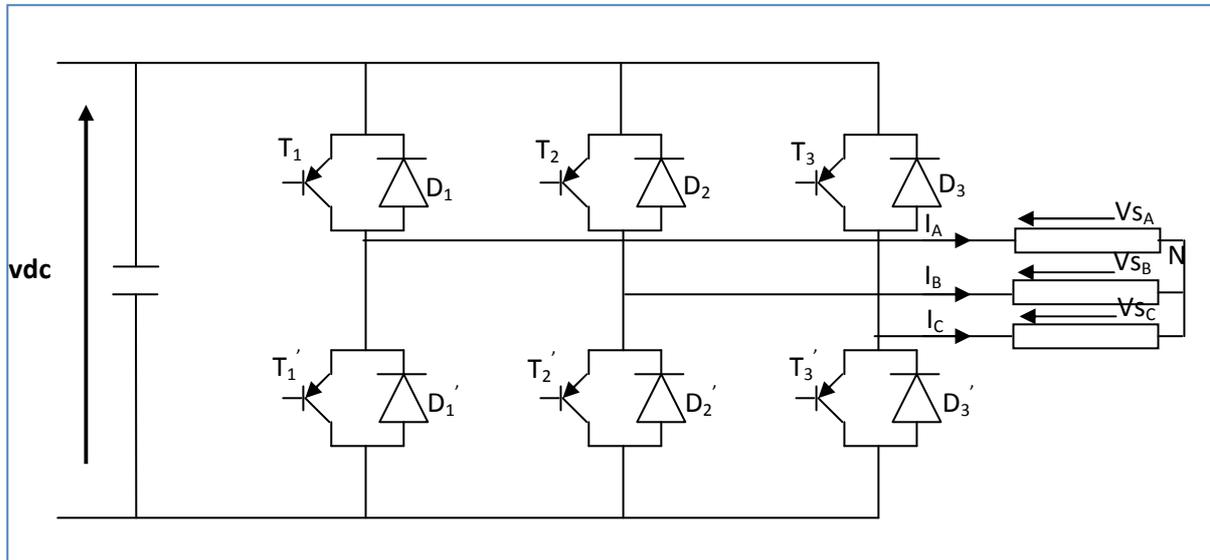


Figure 4.3 Schéma de principe d'un onduleur de tension triphasé.

Nous supposons un mode de fonctionnement continu, chaque ensemble transistor-diode peut être considéré comme un interrupteur idéal (bidirectionnel en courant, unidirectionnel en tension) comme il est montré sur la figure 4.4.

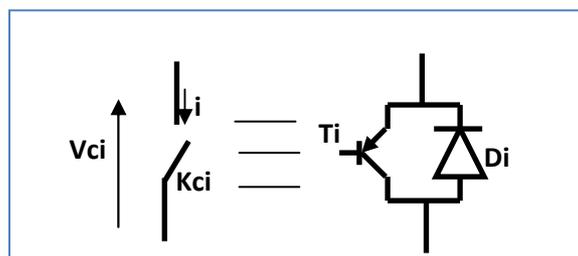


Figure 4.4 Interrupteur bidirectionnel en courant

Afin de simplifier l'étude, nous associons à chaque bras de l'onduleur, une fonction logique F_i ($i=1, 2,3$) qui est la sortie du modulateur M.L.I [29,30].

Les fonctions logiques sont définies ainsi :

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } K_i \text{ est fermé et } K'_i \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } K'_i \text{ est fermé et } K_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

Pour les trois phases de l'onduleur, on définit les fonctions de conversion m donnée comme suit :

$$m = [m_1 \ m_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Le schéma équivalent de l'onduleur avec son circuit de commande simplifié est représenté par la figure 4.5.

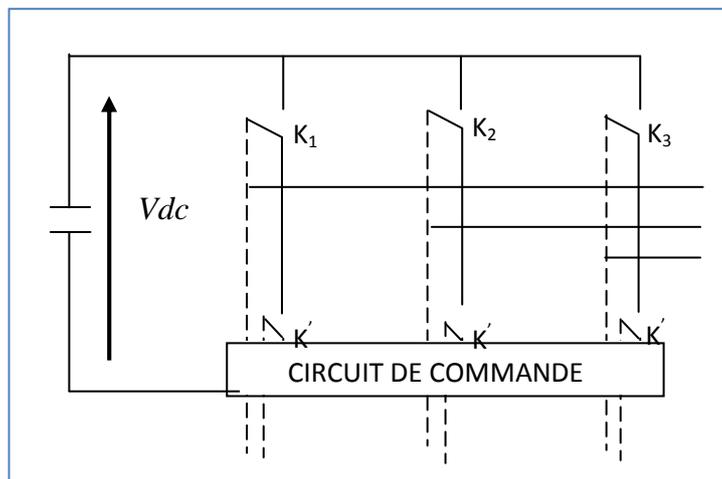


Figure 4.5 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

L'état de conduction des composants de l'onduleur peut être représenté par une matrice de connexion composée de trois cellules de commutation dont la commande des interrupteurs d'une même cellule étant complémentaire.

$$f_{i1} + f_{i2} = 1 \quad \forall i \in \{1,2,3\} \quad (4.2)$$

La loi des mailles permet d'en déduire les tensions composées entre phases :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{AB} = (F_1 - F_2) \\ U_{BC} = (F_2 - F_3) \\ U_{CA} = (F_3 - F_1) \end{array} \right. \quad (4.3)$$

(F_1, F_2, F_3) représentent les grandeurs de commande des interrupteurs.

Puisque la charge est équilibrée, les tensions simples forment aussi un système triphasé équilibré, tel que :

$$V_{sA} + V_{sB} + V_{sC} = 0 \quad (4.4)$$

En tenant compte des relations (4.4) et (4.3), on déduit les tensions simples :

$$\begin{bmatrix} V_{sA} \\ V_{sB} \\ V_{sC} \end{bmatrix} = \frac{vdc}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

4.1.1.2 Commande M.L.I :

La technique de modulation de largeur d'impulsion, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation).

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont : la naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis [29, 30,31].

Dans ce travail, nous choisissons la technique à échantillonnage naturel (sinus-triangulaire), qui est caractérisée par une facilité d'implantation dans les commandes.

4.1.1.2.1 Commande à M.L.I sinus-triangulaire :

Cette technique de modulation (figure 4.6) possède une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement. Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par l'intersection du signal modulant avec le signal triangulaire (appelé porteuse), lorsque la consigne est au dessus du triangle c'est l'interrupteur de haut qui est commandé et lorsque la consigne est au dessous du triangle c'est l'interrupteur du bas qui est commandé [29, 30,31]

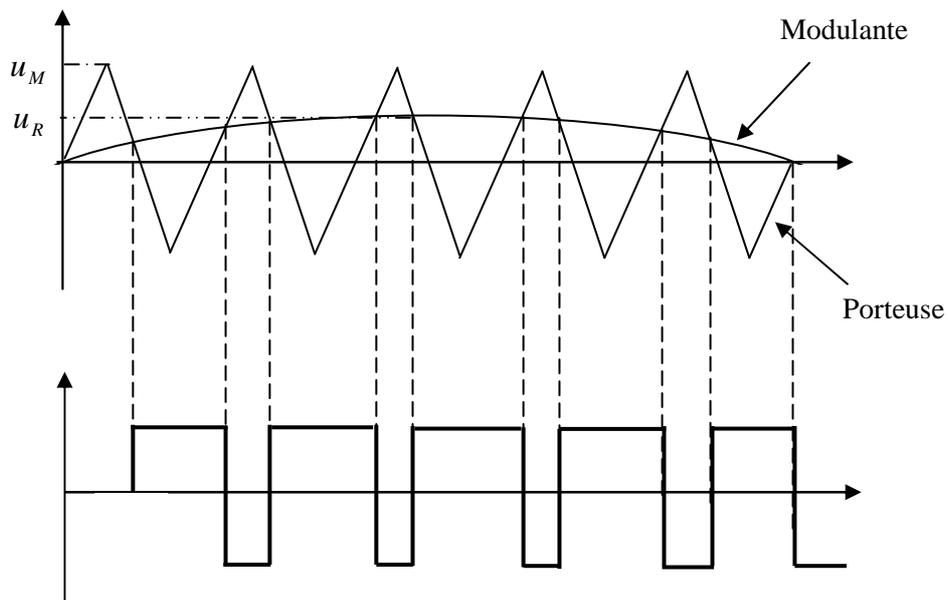


Figure 4.6 Principe de la MLI à échantillonnage naturel.

Les deux signaux de commande représentés sur la figure 4.7, sont appliqués aux deux entrées d'un comparateur qui détermine à travers une interface les états des commutateurs de l'onduleur.

- Une tension sinusoïdale $V_{ref}(t)$, de fréquence (f) et d'amplitude (u_R), est le signal de référence.
- La tension triangulaire $V_p(t)$, de fréquence ($f_p \gg f_r$) et d'amplitude $u_M \geq u_R$ est le signal de modulation.

Les entrées du comparateur sont choisies arbitrairement de façon à ce que $K_1=1$, lorsque

$$(u_R > u_M)$$

Les états des autres commutateurs se déduisent immédiatement de ceux de K_1 à partir de la relation [29] :

$$\overline{K_1}; \overline{K_2}; \overline{K_3}; K_1'; K_2'; K_3' \tag{4.6}$$

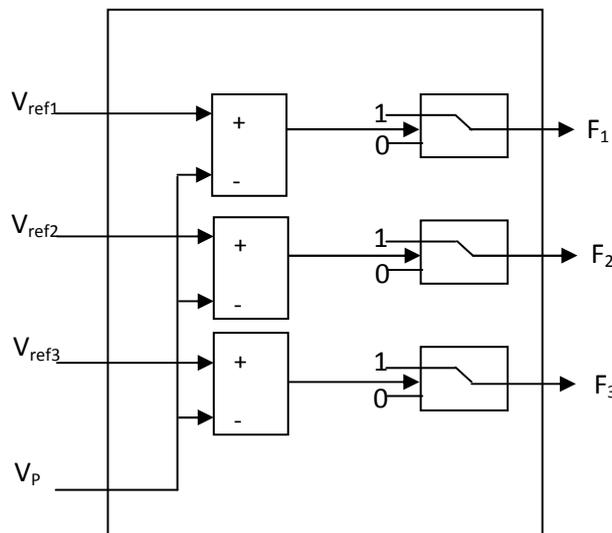


Figure 4.7 Principe de la commande M.L.I.

Les deux paramètres caractérisant la commande sont : [29, 30, 32]

- L'indice de modulation (m), donné par $m = \frac{f_p}{f_r}$

f_p : fréquence de la porteuse.

f_r : fréquence de la référence.

- Le coefficient de réglage en tension (r), qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à celle de la porteuse.

$$r = \frac{u_R}{u_M} \quad (4.7)$$

4.1.2 Modèle continu équivalent de convertisseur de puissance

Les générateurs et le réseau d'énergie sont des systèmes continus, tandis que les convertisseurs de puissance sont par nature des systèmes discrets [33]. Pour l'analyse du comportement dynamique d'un système complet de génération d'énergie et pour la synthèse des différents correcteurs, il est pratique d'adopter un modèle continu équivalent du système complet. La dynamique de système étudié est lente par rapport à la fréquence de commutation des convertisseurs MLI [33].

Les harmoniques générés par les convertisseurs ne sont pas pris en compte dans cette étude. Pour cela, il est nécessaire de développer un modèle continu équivalent des convertisseurs de puissance.

Les tensions simples modulées par les convertisseurs du côté du réseau dépendent des tensions de références :

$$\begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{Aref} \\ V_{Bref} \\ V_{Cref} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

En appliquant la transformation directe de Park à la relation (4.8), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{dref} \\ V_{qref} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

4.1.3 Modélisation de la liaison au réseau

4.1.3.1 Modélisation du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif [36] :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc} \quad (4.10)$$

Le schéma électrique du bus continu représenté sur la figure 4.8 nous montre que le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur [34] :

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \quad (4.11)$$

i_1 : courant redressé.

i_2 : courant ondulé.

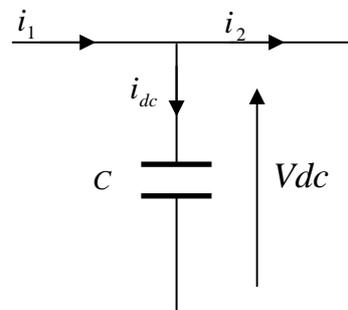


Figure 4.8 Schéma électrique du bus continu.

La tension V_{dc} est une fonction du courant i_{dc} :

$$i_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (4.12)$$

$$Vdc = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_{dc} dt + Vdc_0 \quad (4.13)$$

Avec :

Vdc_0 : est la valeur de la tension à l'instant initial $t = 0$.

C : La capacité du condensateur.

Le réglage de bus continu est alors composé d'une boucle de régulation, permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur proportionnel intégrale (noté C_{idc}) et générant la fréquence du courant à injecter dans le condensateur.

$$i_{dc_ref} = C_{i_{dc}} (vdc_{ref} - vdc)$$

4.1.3.2 Modélisation du filtre dans le repère naturel

Le rôle du filtre est d'atténuer l'amplitude des harmoniques d'ordre supérieur car celui-ci est passe bas [34,35].

D'après la figure 4.2 on a :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{sA} \\ v_{sB} \\ v_{sC} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

L'application de la transformation de Park sur le système d'équation nous donne :

$$\begin{aligned} v_d &= R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} - L \omega i_q + v_{sd} \\ v_q &= R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} + L \omega i_d + v_{sq} \end{aligned} \quad (4.15)$$

On considère les tensions de couplage suivantes :

$$e_q = -L \omega i_q \quad (4.16)$$

$$e_d = L \omega i_d$$

Les équations différentielles peuvent être simplifiées en :

$$\begin{aligned} v_d' &= R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} \\ v_q' &= R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (4.17)$$

Où les tensions aux bornes des bobines sont définis par :

$$\begin{aligned} v_d' &= v_d - e_q - v_{sd} \\ v_q' &= v_q - e_d - v_{sq} \end{aligned} \quad (4.18)$$

En appliquant la transformée de Laplace sur les équations précédentes on fait apparaitre deux fonctions de transfert identiques [17, 34] :

$$F(s) = \frac{i_d(s)}{v_d'(s)} = \frac{1}{R + L \cdot s} \quad (4.19)$$

$$F(s) = \frac{i_q(s)}{v_q'(s)} = \frac{1}{R + L \cdot s}$$

4.2. Modèle mathématique et stratégies de contrôle de l'onduleur connecté au réseau

4.2.1. Modèle de réseau

Dans cette partie nous allons définir le modèle de réseau. Le réseau est présenté comme une source de tension triphasée idéale [37] :

$$\begin{aligned} v_{sA} &= E \cos(\omega \cdot t) \\ v_{sB} &= E \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{sC} &= E \cos\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Avec :

E : L'amplitude de la tension de réseau.

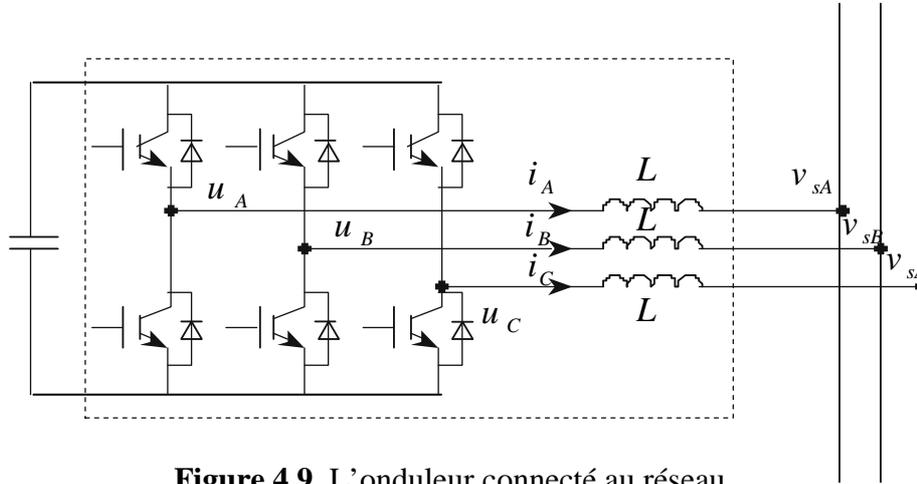


Figure 4.9 L'onduleur connecté au réseau

Les équations électriques dans le repère abc sont données par [37] :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_B}{dt} \\ \frac{di_C}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_A - v_{sA} \\ u_B - v_{sB} \\ u_C - v_{sC} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Avec :

i_A, i_B, i_C : sont les courants de sortie.

u_A, u_B, u_C : Les tensions de sortie de l'onduleur connecté au réseau.

L : L'inductance entre l'onduleur et le réseau.

R : Résistance entre l'onduleur et le réseau.

La transformation de repère (abc) vers le repère ($\alpha\beta$) est donnée comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sA} \\ v_{sB} \\ v_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \cos \omega t \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \sin \omega t \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

De (4.21) et (4.22) on obtient :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sA} \\ v_{sB} \\ v_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_A - L \frac{di_A}{dt} - R i_A \\ u_B - L \frac{di_B}{dt} - R i_B \\ u_C - L \frac{di_C}{dt} - R i_C \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} u_\alpha - L \frac{di_\alpha}{dt} - R i_\alpha \\ u_\beta - L \frac{di_\beta}{dt} - R i_\beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.23)$$

La transformation de repère $\alpha - \beta$ vers $d - q$ nous donne :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Nous utilisons (4.23) et (4.24) nous aurons :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L \frac{di_\alpha}{dt} \\ L \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R i_\alpha \\ R i_\beta \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \cdot L \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right\} - R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Les tensions de sortie de l'onduleur connecté au réseau dans le repère (d, q) sont données par :

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

4.2.2 Stratégie de contrôle de l'onduleur connecté au réseau

Le diagramme vectoriel de réseau est représenté par la figure (4.10) :

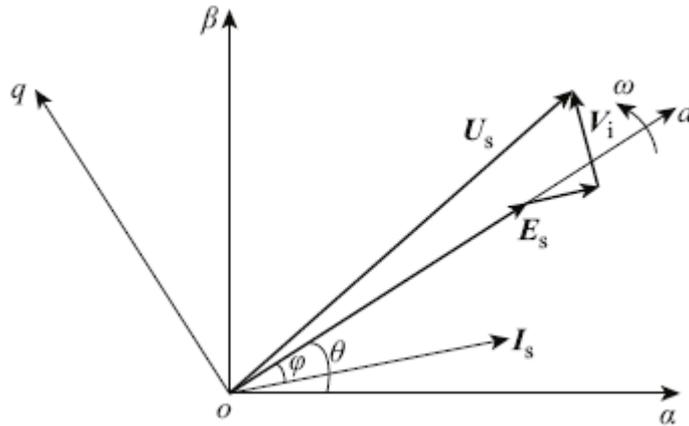


Figure 4.10 Description de l'orientation de vecteur tension de réseau.

Où :

U_s : Le vecteur tension de sortie de l'onduleur connecté au réseau.

I_s : Le courant de sortie de l'onduleur connecté au réseau.

Les tensions de sortie de l'onduleur dans le repère (d-q) sont données par [37,38,39] :

$$\begin{cases} v_{sd} = V_s, \\ v_{sq} = 0, \end{cases} \quad (4.27)$$

Avec :

v_s : L'amplitude de vecteur E_s

Dans le repère (d, q), la puissance active et réactive sont données par [38] :

$$P = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) = \frac{3}{2} E_s i_d \quad (4.28)$$

$$Q = \frac{3}{2}(u_q i_d - u_d i_q) = -\frac{3}{2} E_s i_q$$

Nous utilisons (4.26) et (4.27), nous obtenons :

$$L \frac{di_d}{dt} + R i_d = u_d - V_s + L \omega i_q \quad (4.29)$$

$$L \frac{di_q}{dt} + R i_q = u_q - L \omega i_d$$

Nous supposons :

$$u_d' = u_d - V_s + L \omega i_q \quad (4.30)$$

$$u_q' = u_q - L \omega i_d$$

Nous utilisons (4.29) et (4.30), nous aurons :

$$L \frac{di_d}{dt} + R i_d = u_d' \quad (4.31)$$

$$L \frac{di_q}{dt} + R i_q = u_q'$$

Dans le but de maintenir les courants à leur références, deux régulateurs de courants sont utilisés, dans ce cas les tensions de sortie obtenus des deux boucles de régulations sont données par [37, 38] :

$$u'_d = Kp (i_d^* - i_d) + Ki \int (i_d^* - i_d) dt \quad (4.32)$$

$$u'_q = Kp (i_q^* - i_q) + Ki \int (i_q^* - i_q) dt$$

Les tensions de références sur l'axe direct d et sur l'axe en quadrature q sont données par :

$$u_d^* = V_s - L \omega i_q + u'_d \quad (4.33)$$

$$u_q^* = L \omega i_d + u'_q$$

Le contrôle vectorielle de l'onduleur coté réseau permet de maintenir la tension de bus contenu constante ainsi qu'un coefficient de puissance unitaire entre le courant et la tension de phase de réseau.

Le schéma de contrôle de l'onduleur coté réseau est donné par la figure 4.11 qui réalise le découplage entre la puissance active et réactive. L'axe direct (d) peut contrôler la tension de bus continu (Vdc), et l'axe en quadrature (q) peut contrôler la puissance réactive. La puissance réactive de référence est fixée à zéro pour avoir le coefficient de puissance unitaire. L'angle θ_s obtenu à partir de l'intégration de la pulsation du réseau $\omega = 2\pi.f$

4.3 Modèle complet de la chaîne de conversion éolienne à base de la machine synchrone à aimants permanents

La chaîne de conversion éolienne étudiée (figure 4.12), comprend la génératrice synchrone à aimants permanents, le convertisseur MLI1, le bus continu, le convertisseur MLI2, et la liaison au réseau via un filtre.

Le convertisseur MLI1 est un redresseur triphasé à contrôle vectoriel par MLI. Ce choix est justifié par le fait qu'il peut offrir un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée par un autopilotage de la machine synchrone, il peut contrôler les grandeurs électromécaniques telles que le couple électromagnétique, la tension du bus continu et les puissances actives et réactives échangé avec le réseau, et d'avoir des courants à fréquences adéquates.

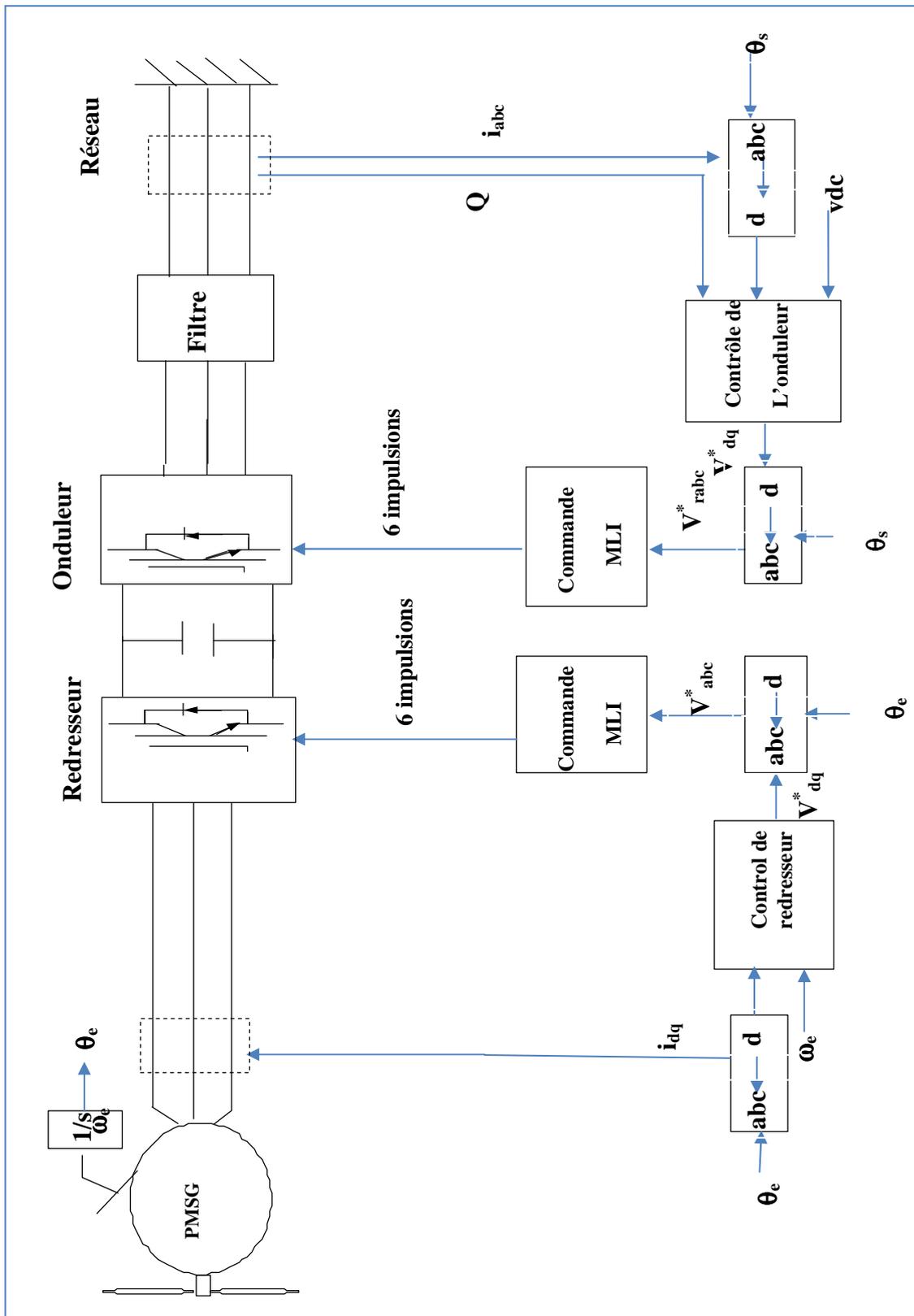


Figure 4.12 Schéma complet de contrôle de la chaîne de conversion

Les résultats de simulations sont donnés par les figures suivantes :

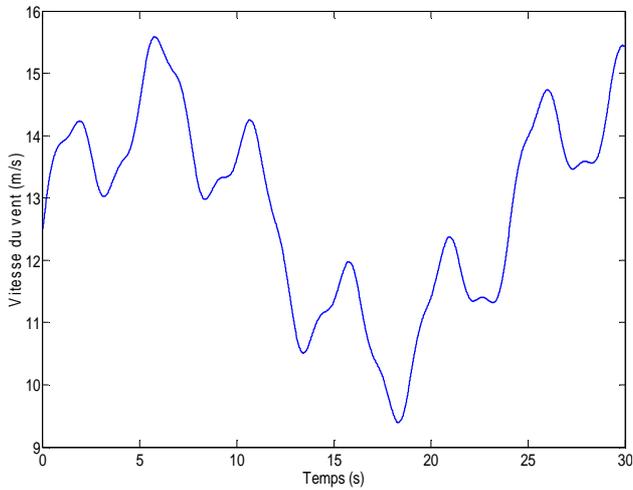


Figure 4.13 Profil du vent

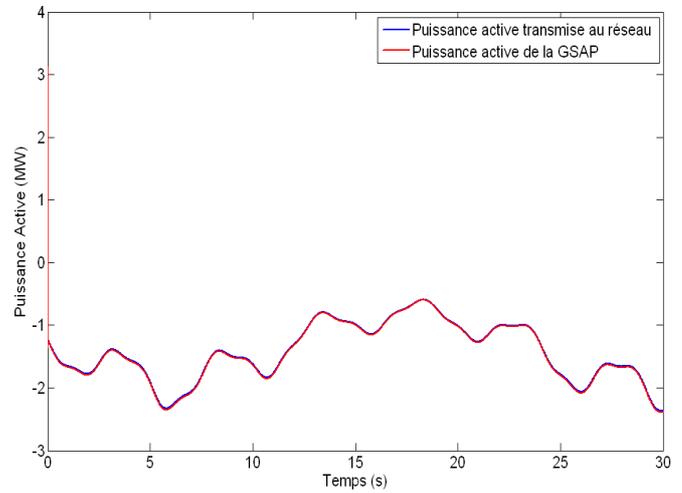


Figure 4.14 Puissance active de la GSAP et la puissance active transmise au réseau

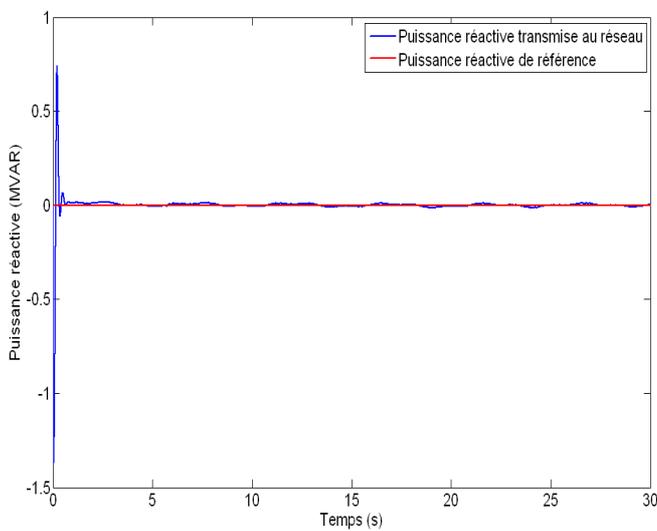


Figure 4.15 Puissance réactive transmise au réseau avec sa référence

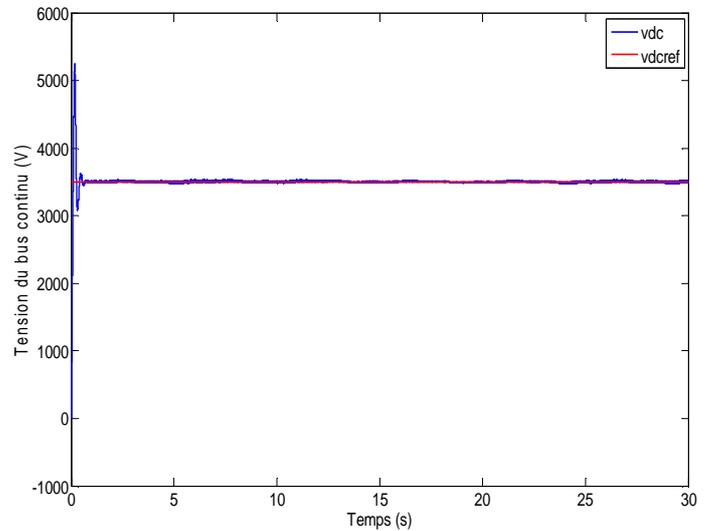


Figure 4.16 Tension du bus continu et sa référence

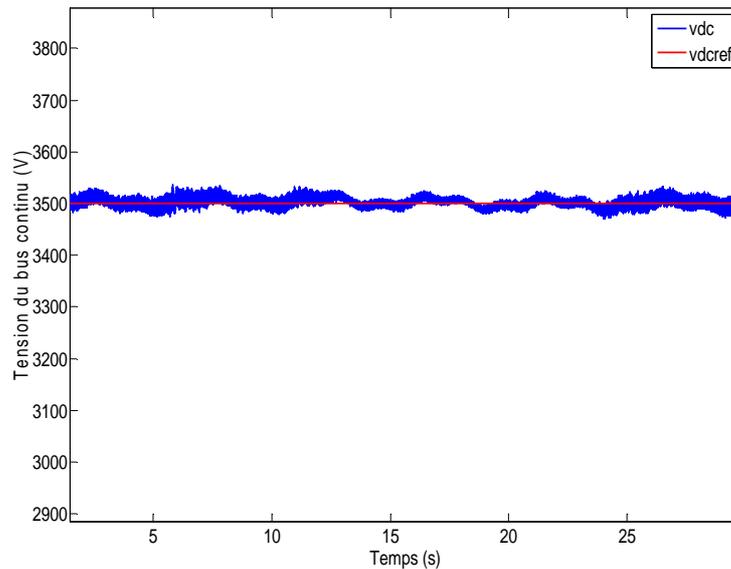


Figure 4.16 Zoom de la Tension du bus continu

Dans cette partie, quelques résultats de simulation d'une éolienne à vitesse variable reposant sur une machine synchrone à aimants permanents (dont les paramètres sont fournis en annexe) sont présentés, obtenus par implantation sur Matlab_simulink.

La vitesse du vent figure (4.13) varie entre (12 et 16m /s), sa vitesse moyenne sur cette durée vaut 12,5m/s. La tension du bus continu est maintenue constante (3500V), la puissance réactive est imposée nulle figure 4.15.

Nous avons étudié ce système sous une tension de bus continu de 3500V. On constate une bonne régulation du bus continu figure 4.16, et la puissance réactive oscille autour de zéro ce qui nous permet d'avoir un facteur de puissance proche de l'unité. La puissance générée par l'éolienne est totalement transmise au réseau d'après la figure 4.14 ce qui nous permet de dire que notre système transmet la totalité de la puissance extraite du vent au réseau électrique.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établie un modèle de la chaîne de conversion éolienne qui est constituée d'une machine synchrone à aimants permanents, des convertisseurs contrôlés par MLI et relié au réseau via un bus continu et un filtre.

Nous avons construit un dispositif de commande de l'ensemble afin de faire fonctionner l'éolienne de manière à extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent. Nous avons décrit le contrôle de la liaison au réseau avec la régulation du bus continu. Par la suite nous avons donné quelques résultats de simulation du système globale.

Introduction

Les onduleurs de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC (Neutral point clamped converter) jouent un rôle incontournable dans des applications de forte puissances et haute tension. Deux motivations principales sont à l'origine de l'utilisation de ces convertisseurs ; d'une part la réduction des tensions de blocage des semi-conducteurs en des valeurs plus petites et directement commutables et, d'autre part l'augmentation de la tension de sortie au delà des limites des semi-conducteurs avec moins d'harmoniques.

La forme d'onde de la tension de sortie de ce convertisseur se compose de 5 niveaux intermédiaires obtenus à partir de tensions des condensateurs formant le bus continu. Généralement, ces dernières sont générées par des convertisseurs AC-DC dit redresseurs.

Dans notre travail on s'intéresse à la modélisation de l'onduleur à cinq niveaux ainsi que sa stratégie de commande, ensuite nous associons cet onduleur au système éolien qui débite sur une charge RL et nous faisons une comparaison avec les résultats obtenus avec onduleur à deux niveaux.

5. 1 Modélisation et commande de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC

L'idée de base de cette structure est l'obtention d'une tension de sortie à N niveaux par la superposition de (N-1) interrupteurs élémentaires alimenté chacun par une source de tension continue distincte [32]. Cette structure d'onduleur a attiré l'intention de plusieurs chercheurs et industriels. Cet intérêt est dû à sa grande similitude avec la structure de l'onduleur à deux niveaux.

5. 1.1 Structure

La structure de l'onduleur à cinq niveaux de type NPC est représentée sur la figure 5.1. Cette dernière se compose de trois bras symétriques constitués chacun de six interrupteurs en

série et de deux autres en parallèles. Les deux diodes, notées D_{K1} et D_{K0} , permettent l'obtention du niveau zéro de la tension V_{KM} ($k=A, B$ et C). Chacun de ces interrupteurs est composé d'un semi-conducteur bi-commandable (IGBT par exemple) et d'une diode montée en tête bêche [34,1].

La source de tension continue se compose de quatre groupes de condensateurs de filtrage formant ainsi le bus continu. Dans ce mode de fonctionnement, chaque semi-conducteur est soumis à l'état ouvert aux quart de la tension de la source continue, d'où l'utilité de cette structure d'onduleur pour les applications de haute tensions. Cet onduleur est dit à cinq niveaux car il délivre cinq niveaux de tension par bras ($E/2, E/4, 0, -E/2, -E/4$).

Pour un fonctionnement totalement commandable de ce convertisseur, nous adoptons la commande complémentaire suivante [39,40, 41] :

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K5}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K3} = \overline{B_{K6}} \\ B_{K7} = B_{K1} B_{K2} \overline{B_{K3}} \\ B_{K8} = B_{K4} B_{K5} \overline{B_{K6}} \end{cases} \quad (5.1)$$

5.1. 2 Modélisation aux valeurs instantanées de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC

Cette modélisation nous permet d'étudier l'évolution des différentes grandeurs régissant le fonctionnement de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC tout en considérant les commutations des interrupteurs.

5.1.2. 1 Hypothèses

Afin de simplifier notre étude, des hypothèses simplificatrices sont nécessaires pour la mise en équations. Ces dernières sont:

- chaque paire transistor-diode est représentée par un interrupteur bidirectionnel TD_{ki} ,
- les interrupteurs sont idéaux,
- les sources de tension du bus continu sont supposées parfaites,

- les transitions entre les configurations ne dépendent que des commandes externes des transistors.

5.1.2.2.1 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux

La topologie de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC présente cinq configurations fonctionnelles. Ces dernières dépendent de la tension du bras k par rapport au point milieu M composé de cinq niveaux distincts. Le nombre de niveaux de tension de cet onduleur représente le nombre de potentiels différents du bus continu imposé à la tension de sortie. En outre, chaque niveau de tension est obtenu par une seule configuration de cet onduleur.

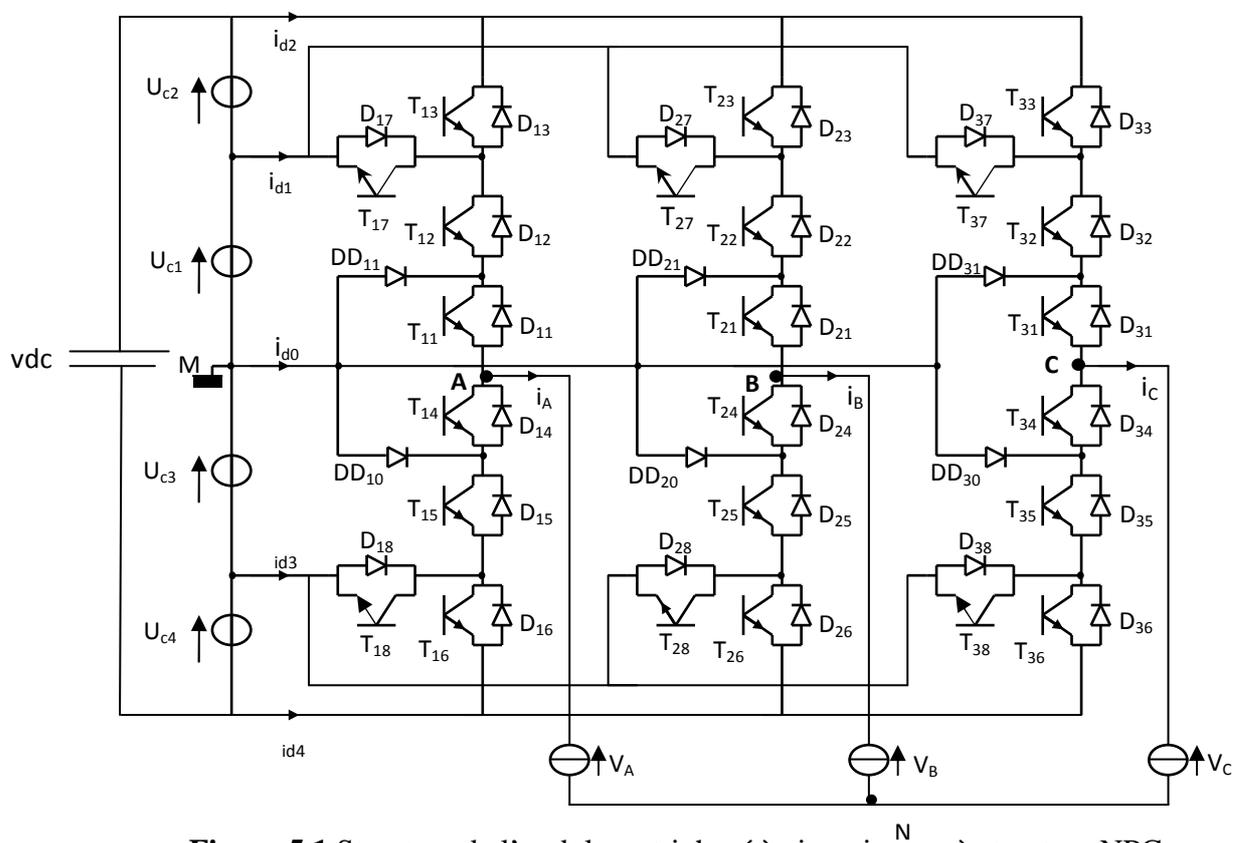


Figure 5.1 Structure de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC.

En conduction continue de l'onduleur à cinq niveaux, les différentes configurations E_m possibles sont définies comme suit, avec $E_m = [TD_{k1}, TD_{k2}, \dots, TD_{k8}]$:

▪ Première configuration E_1 [11100000]

Cette configuration est représentée sur la Figure (5.2). Dans ce cas, les semi-conducteurs TD_{11} , TD_{12} et TD_{13} sont commandés à l'état 1 et les autres interrupteurs restent à l'état 0. La valeur de la tension V_{AM} est donnée par l'équation (5.2) :

$$V_{AM} = B_{11} \frac{E}{4} + B_{12} B_{13} \frac{E}{4} = \frac{E}{2} \quad (5.2)$$

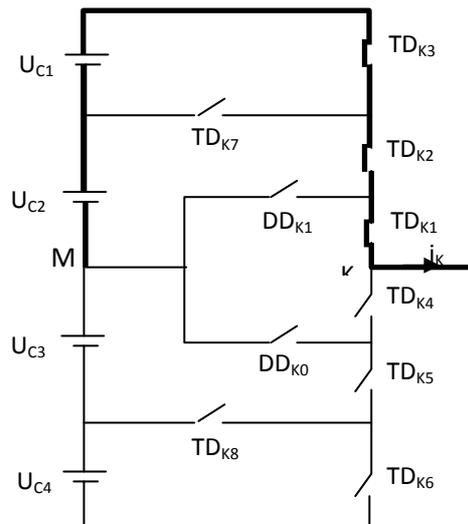


Figure 5.2 Configuration E_1 du premier bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

▪ Deuxième configuration E_2 [01100010]

En commandant les semi-conducteurs TD_{11} , TD_{12} et TD_{17} à l'état 1 et les autres à l'état 0 Figure (5.3), l'équation (5.3) donne la valeur de la tension V_{AM} correspondant à cette configuration :

$$V_{AM} = B_{12} B_{13} B_{17} \frac{E}{4} = \frac{E}{4} \quad (5.3)$$

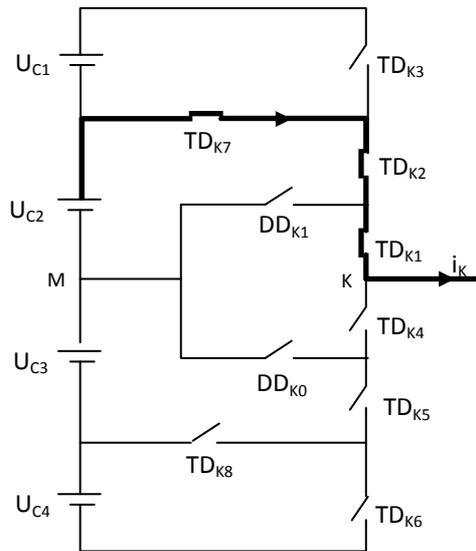


Figure 5.3 Configuration E_2 du premier bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

▪ Troisième configuration E_3 [00110000]

La conduction des interrupteurs TD_{13} et TD_{14} permet la mise à zéro de la tension V_{AM} Figure (5.4). Cette configuration est similaire à celle de l'onduleur à trois niveaux.

$$V_{AM} = B_{13} \frac{E}{4} - B_{14} \frac{E}{4} = 0 \quad (5.4)$$

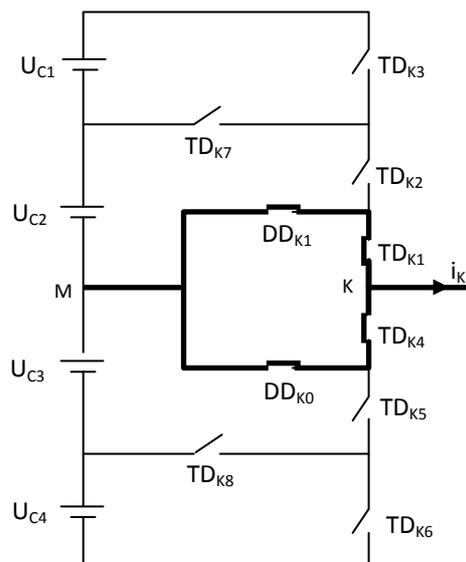


Figure 5.4 Mise à zéro d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

▪ Quatrième configuration E_4 [00011001]

Cette configuration fournit la partie négative, définie par l'état des interrupteurs TD_{14} , TD_{15} et TD_{18} . L'équation (5.5) donne la valeur de V_{AM} .

$$V_{AM} = B_{14} B_{15} B_{18} \left(-\frac{E}{4}\right) = -\frac{E}{4} \quad (5.5)$$

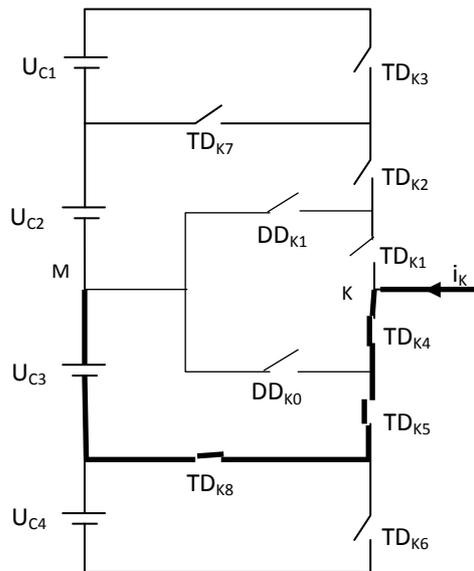


Figure 5.5 Configuration E_4 du premier bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

▪ Cinquième configuration E_5 [00011100]

Le cinquième niveau d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux est montré par la Figure (5.6).

La valeur de la tension correspondante V_{AM} est donnée par l'équation (5.6) :

$$V_{AM} = -B_{16} \frac{E}{4} - B_{14} B_{15} \frac{E}{4} = -\frac{E}{2} \quad (5.6)$$

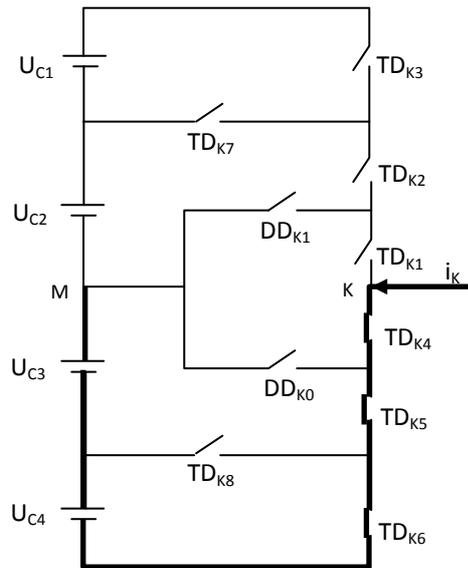


Figure 5.7 Configuration E_5 du premier bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux

Le tableau (5.1) résume les différentes grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations.

Configuration	Grandeurs électriques
E_1	$V_{AM} = U_{C1} + U_{C2} = E/2$
E_2	$V_{AM} = U_{C1} = E/4$
E_3	$V_{AM} = 0$
E_4	$V_{AM} = -U_{C3} = -E/4$
E_5	$V_{AM} = -U_{C3} - U_{C4} = -E/2$

Tableau (5.1): Grandeurs électriques pour chacune des configurations d'un bras K de l'onduleur cinq niveaux.

5.2.2.3 Modèle de connaissance de l'onduleur à cinq niveaux en vue de la commande

a) *Fonction de connexion*

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouvert ou fermé. Chaque interrupteur introduit une fonction de connexion F_{ks} , tel que :

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si } TD_{ks} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } TD_{ks} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (5.7)$$

En utilisant la commande complémentaire (5.1), les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k sont liées par les relations suivantes:

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k5} \\ F_{k2} = 1 - F_{k4} \\ F_{k3} = 1 - F_{k6} \\ F_{k7} = F_{k1} F_{k2} \overline{F_{k3}} \\ F_{k8} = F_{k4} F_{k5} \overline{F_{k6}} \end{cases} \quad (5.8)$$

A. *Mise en équation*

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à cinq niveaux par rapport au point milieu M sont donnés par le système suivant :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11} F_{12} \overline{F_{13}} U_{C1} + F_{11} F_{12} F_{13} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{14} F_{15} \overline{F_{16}} U_{C3} - F_{14} F_{15} F_{16} (U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{BM} = F_{21} F_{22} \overline{F_{23}} U_{C1} + F_{21} F_{22} F_{23} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{24} F_{25} \overline{F_{26}} U_{C3} - F_{24} F_{25} F_{26} (U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{CM} = F_{31} F_{32} \overline{F_{33}} U_{C1} + F_{31} F_{32} F_{33} (U_{C1} + U_{C2}) - F_{34} F_{35} \overline{F_{36}} U_{C4} - F_{34} F_{35} F_{36} (U_{C3} + U_{C4}) \end{cases} \quad (5.9)$$

Afin de simplifier les équations du modèle du convertisseur multiniveaux, nous définissons la fonction de connexion du demi-bras [42]. Elle est notée F_{km}^b où k désigne le numéro du bras et m le demi-bras ($m = 1$ pour le demi-bras du haut, et $m = 0$ pour le demi-

bras du bas). Pour le bras k , les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \cdot F_{k3} \\ F_{k0}^b = F_{k4} \cdot F_{k5} \cdot F_{k6} \end{cases} \quad (5.10)$$

En introduisant ces fonctions de connexion des demi-bras dans le système des équations (5.9), ces dernières sont réduites au système suivant :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{17}U_{C1} + F_{11}^b(U_{C1} + U_{C2}) - F_{18}U_{C3} - F_{10}^b(U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{BM} = F_{27}U_{C1} + F_{21}^b(U_{C1} + U_{C2}) - F_{28}U_{C3} - F_{20}^b(U_{C3} + U_{C4}) \\ V_{CM} = F_{37}U_{C1} + F_{31}^b(U_{C1} + U_{C2}) - F_{38}U_{C3} - F_{30}^b(U_{C3} + U_{C4}) \end{cases} \quad (5.11)$$

Le système (5.11) montre qu'un onduleur à cinq niveaux est une mise en série de quatre onduleurs à deux niveaux ou deux onduleurs à trois niveaux [40,41]. Dans le cas où les sources de tensions continue sont constantes ($U_{c1} = U_{c2} = U_{c3} = U_{c4} = E/4$), le système (5.11) se réduit à celui :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{4} \quad (5.12)$$

En utilisant les lois de Kirchhoff, les tensions simples aux bornes de la charge triphasée alimentée par l'onduleur de tension à cinq niveaux sont données par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{AM} - V_{NM} \\ V_{BM} - V_{NM} \\ V_{CM} - V_{NM} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Avec, V_{NM} étant la tension entre le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur et le point neutre de la charge. Elle est donnée comme suit :

$$V_{NM} = \frac{1}{3}(V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \quad (5.14)$$

A partir des relations (5.13), (5.14) et (5.15), nous obtenons le système matriciel donnant l'expression des tensions simples aux bornes de la charge en fonction des fonctions de

connexions des demi-bras.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{E}{4} \quad (5.16)$$

Ainsi, les courants d'entrée de l'onduleur s'expriment en fonction des courants de la charge i_A, i_B et i_C au moyen des fonctions de connexion des demi-bras par les relations suivantes:

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{17}i_A + F_{27}i_B + F_{37}i_C \\ i_{d2} = F_{11}^b i_A + F_{21}^b i_B + F_{31}^b i_C \\ i_{d3} = F_{18}i_A + F_{28}i_B + F_{38}i_C \\ i_{d4} = F_{10}^b i_A + F_{20}^b i_B + F_{30}^b i_C \end{cases} \quad (5.17)$$

Le courant i_{d0} s'exprime en fonction des courants d'entrée et les courants de la charge par la relation

$$i_{d0} = (i_A + i_B + i_C) - (i_{d1} + i_{d2} + i_{d3} + i_{d4}) \quad (5.18)$$

5.1.2.3 Les stratégies de commandes de l'onduleur à cinq niveaux

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans le domaine des variations de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement de composants à semi-conducteurs de puissance entièrement commandables, puissants, robustes et rapides, d'autre part, sur l'utilisation des stratégies de commande très performantes.

L'objectif principal de ces stratégies, appliquées aux onduleurs, est de fournir des tensions alternatives d'amplitude et de fréquence réglables, en éliminant ou en repoussant le plus loin possible les composantes harmoniques parasites résultant du découpage.

La commande par modulation de largeur d'impulsions (MLI) obéit à cette règle. En effet, le principe de cette stratégie consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la

fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. La multiplication du nombre des impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie offre la possibilité de moduler la forme de cette dernière de manière à satisfaire un critère déterminé.

Pour les onduleurs de tension alimentant des charges alternatives, le critère à considérer est l'obtention d'une forme d'onde approximant aux mieux la sinusoïde. Pour cela, la solution la plus largement employée consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire, d'où son appellation triangulo-sinusoïdale [43, 32, 44].

5.2.3.1 La triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses bipolaires

Le principe de cette stratégie de commande découle de la propriété qu'un onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC est la mise en série de quatre onduleurs de tension à deux niveaux [2].

Cette stratégie consiste à générer les ordres de commandes des différents interrupteurs par la comparaison de trois signaux sinusoïdales de référence $V_{refk}(t)$ de fréquence f et d'amplitude V_m , avec quatre porteuses triangulaires de fréquence f_p et d'amplitude U_{pm} . Ces porteuses sont identiques et sont décalées entre elles d'un quart de période ($T_p/4$). Ce déphasage régulier des porteuses, les unes par rapport aux autres, est utile pour deux raisons. D'une part, il permet d'obtenir les cinq niveaux de tension et d'autre part, de multiplier la fréquence apparente de découpage de la tension de sortie [40].

Cette stratégie de commande est caractérisée par deux grandeurs de réglage à savoir :

- le taux de réglage $r = \frac{V_m}{U_{pm}}$.
- L'indice de modulation $m = \frac{f_p}{f}$.

Les tensions de référence permettant de générer un système de tension triphasé équilibré sont données par le système suivant :

$$V_{ref}[k] = r U_{pm} \sin(\omega t - (k-1)2\pi/3) \quad k = 1, 2 \text{ et } 3 \quad (5.20)$$

La Figure 5.8 illustre allure du système de tension de référence triphasée et les quatre porteuses bipolaires.

L'algorithme de commande de cette stratégie, pour un bras k de l'onduleur de tension à cinq niveaux, se résume dans les étapes suivantes :

1^{ère} étape: Détermination des tensions intermédiaires: ($V_{K1}, V_{K2}, V_{K3}, V_{K4}$)

$$\begin{cases} V_{refK} \geq U_{p4} \Rightarrow V_{K1} = 2U_c \\ V_{refK} < U_{p4} \Rightarrow V_{K1} = U_c \end{cases} \quad \begin{cases} V_{refK} \geq U_{p3} \Rightarrow V_{K2} = U_c \\ V_{refK} < U_{p3} \Rightarrow V_{K2} = 0 \end{cases} \quad (5.21)$$

$$\begin{cases} V_{refK} \geq U_{p2} \Rightarrow V_{K3} = 0 \\ V_{refK} < U_{p2} \Rightarrow V_{K3} = -U_c \end{cases} \quad \begin{cases} V_{refK} \geq U_{p1} \Rightarrow V_{K4} = -U_c \\ V_{refK} < U_{p1} \Rightarrow V_{K4} = -2U_c \end{cases}$$

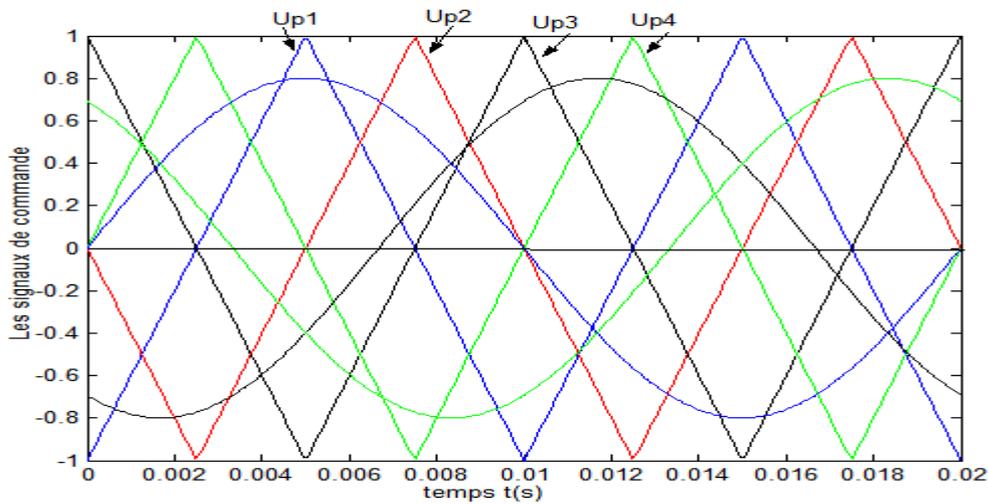


Figure 5.8 Signaux de commande de la stratégie triangulo-sinusoidale à quatre porteuses bipolaire

2^{ème} étape:

➤ Détermination du signal V_{KM} :

$$V_{kM} = V_{k1} + V_{k2} + V_{k3} + V_{k4} \quad (5.22)$$

➤ les ordres de commande B_{Ks} des interrupteurs

$$V_{kM} = 2U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = 1 \quad (5.23)$$

$$V_{kM} = U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = 1, B_{k3} = 0$$

$$V_{kM} = 0 \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 0, B_{k3} = 0$$

$$V_{kM} = -U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = 0, B_{k3} = 1$$

$$V_{kM} = -2U_c \Rightarrow B_{k1} = B_{k2} = B_{k3} = 0$$

5.3 Association de l'onduleur à cinq niveaux au système de conversion éolien

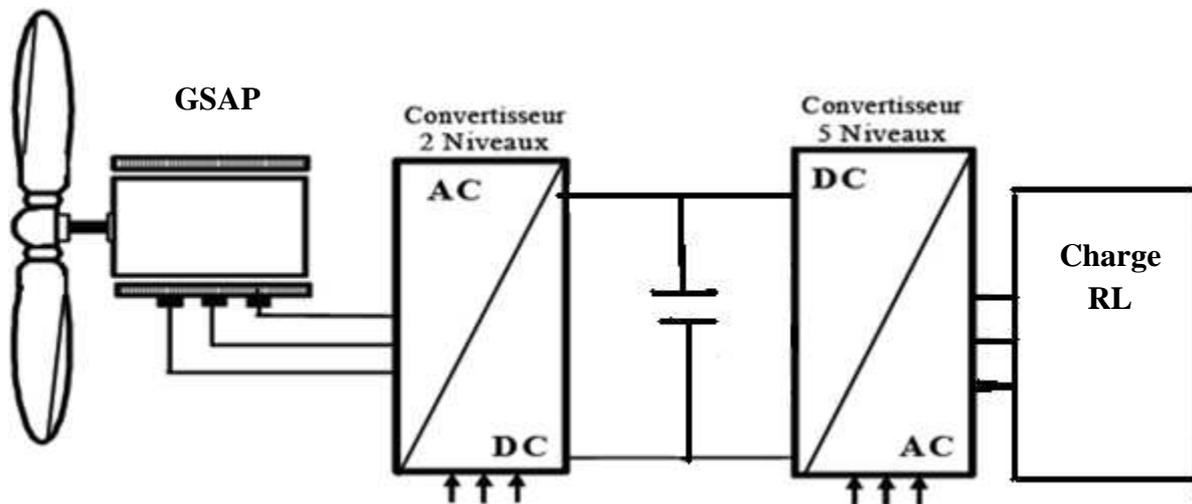


Figure 5.9 Connexion d'un générateur éolien en utilisant un convertisseur à cinq niveaux

La figure 5.9 représente un système de conversion d'énergie qui comporte le modèle de la turbine et celui de la machine et un redresseur qui sont étudiés en détail dans les chapitres (2, 3, 4) respectivement. Le système est associé à une charge RL ($R=100$, $L=0.008H$).

Les résultats de simulation de système de conversion comportant la turbine éolienne le redresseur à deux niveaux et l'onduleur à cinq niveaux associé à une charge RL sont donnés par les figures qui suivent :

5.3 l'onduleur à deux niveaux :

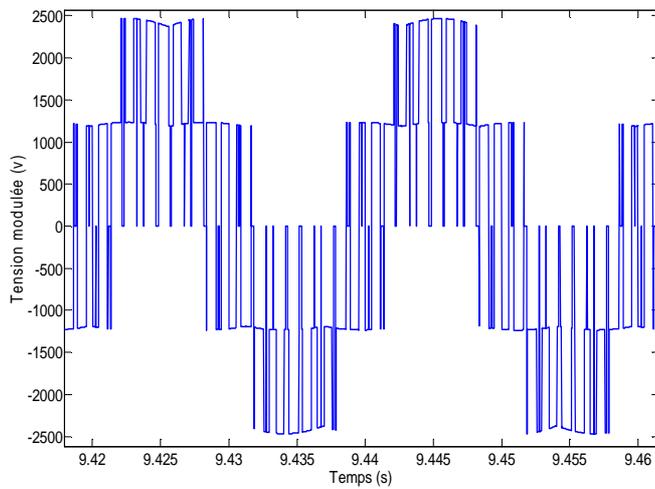


Figure 5.10 La tension modulée à la sortie de l'onduleur

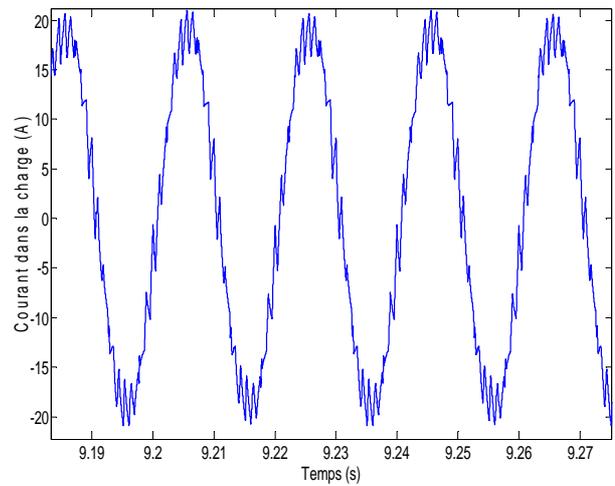


Figure 5.11 Le courant dans la charge

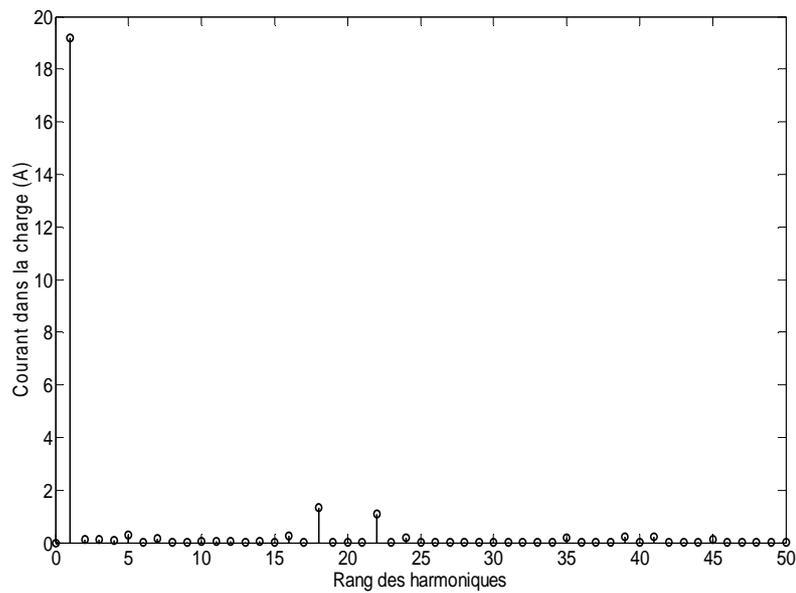


Figure 5.12 L'analyse spectrale de courant de la phase A

5.3.2 Onduleur à cinq niveaux :

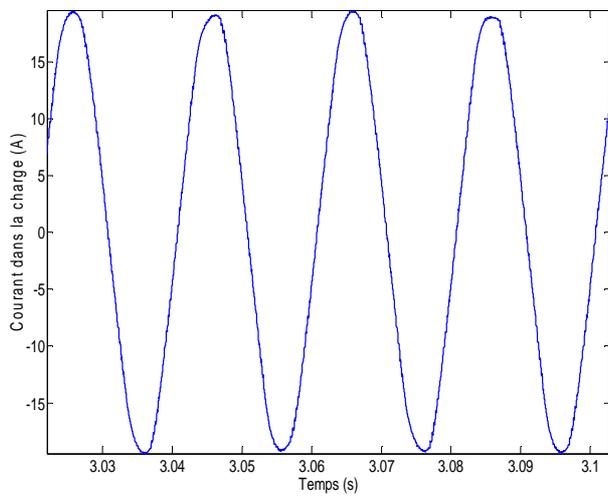


Figure 5.13. Le courant dans la charge

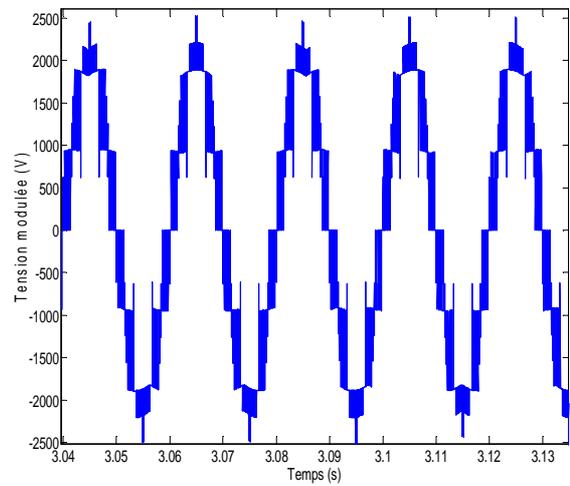


Figure 5.14 La tension modulée à la sortie de l'onduleur

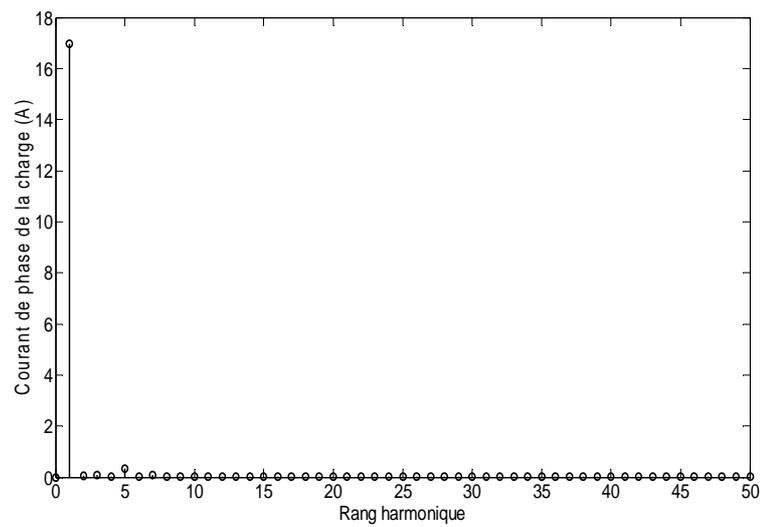


Figure 5.15 L'analyse spectrale de courant de la phase A

La figure 5.14 représente la forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur triphasé à cinq niveaux, elle est composée de cinq niveaux de tensions pratiquement identiques à la forme théorique.

Comme application, ce convertisseur est associé au système éolien qui débite sur une charge RL. La figure 5.13 représente le courant dans la charge, les résultats montre que les courants de charge ont une forme sinusoïdale, les ondulations dû aux harmoniques d'ordre élevé, sont atténuées relativement par rapport à ceux obtenus dans le cas d'un onduleur à deux niveaux.

Conclusion :

Ce chapitre nous l'avons consacré à la modélisation et la commande de l'onduleur NPC à cinq niveaux. Nous avons présenté une stratégie de commande trianglo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires. Nous avons donné par la suite les résultats de simulation de l'association de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC au système éolien, les résultats ont montré que tant qu'on augmente le nombre de niveaux de tension, les harmoniques sont atténués, on a remarqué que les courants dans la charge sont plus sinusoïdal lorsque on a utilisé l'onduleur à cinq niveaux.

Conclusion générale

L'objectif de notre travail consiste en l'étude, la modélisation et la simulation des différentes parties de l'entraînement électrique d'un système éolien à base de la machine synchrone à aimants permanents, et de concevoir une stratégie de commande permettant de maximiser le rendement aérodynamique, et de contrôler la puissance transmise au réseau. Pour ce faire on a utilisé l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Le premier chapitre présente les principes fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolien en énergie électrique et examiner différentes association machine-convertisseur de puissance. La production d'énergie électrique par éolienne se divise en deux grandes catégories : l'éolien de proximité où les machines sont très souvent autonomes et de petite puissance, et le grand éolien où l'énergie électrique est produite directement sur le réseau de distribution avec des machines de plusieurs KW, voire plusieurs MW.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation et la commande de la turbine éolienne dans le but de maximiser la puissance extraite du vent, pour cela nous avons choisie une stratégie de commande qui se base sur l'asservissement ou non de la vitesse de rotation de la turbine. Dans notre travail nous avons choisie la commande avec asservissement de vitesse de rotation ; nous avons utilisé pour cela un régulateur PI à avance de phase. L'algorithme de maximisation de puissance a été validé par des résultats de simulation qui ont montré leurs avantages et leurs inconvénients

Le troisième chapitre, présente la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents sans association et avec association de la turbine éolienne, le contrôle vectoriel de la GSAP a été réalisé en imposant le courant sur l'axe direct ($i_{d_{ref}}$) nul pour pouvoir extraire le maximum de puissance du vent.

Le quatrième chapitre présente la modélisation des différentes parties de système de génération d'énergie éolienne, basé sur une machine synchrone à aimants permanents de 2MW, associée à un convertisseur commandé par MLI. Le système global piloté par le stator par un convertisseur contrôlé par MLI, un bus continu commandé de façon à maintenir la

Conclusion générale

tension de bus continu constante. La liaison au réseau est ensuite réalisée par un autre convertisseur contrôlé par MLI, un filtre de lissage qui assure la liaison avec le réseau. Cette partie est consacrée au contrôle de la liaison au réseau, avec la régulation de bus continu. Les performances des stratégies de régulation du bus continu et de contrôle de la puissance réactive ont été mises en évidence à travers les résultats de simulation obtenus.

Dans le dernier chapitre, la modélisation et la commande, la simulation de l'onduleur à cinq niveaux a été présentée, les résultats de simulation sont donnés. Une comparaison des résultats dans le cas où on associe l'onduleur à cinq et à deux niveaux au système éolien débitant sur une charge RL. Nous avons constaté que les résultats sont meilleurs dans le cas de l'onduleur à cinq niveaux car il permet d'éliminer les harmoniques.

Suite aux travaux réalisés, on peut proposer quelques perspectives qui peuvent améliorer les performances de la chaîne de conversion proposée :

- Association d'un système de stockage d'énergie ;
- Régulation de l'angle de calage ;
- Utilisation d'autres méthodes de maximisation de puissance (logique floue, réseau de neurones) ;
- Association d'un système éolien à chaque condensateur de l'onduleur à cinq niveaux dans le but d'augmenter la puissance active.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] O. Bouhali, « Contribution des convertisseurs multiniveaux 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.

- [2] F.Poitiers, « Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne -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.

- [3] O. Gergoud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse doctorat en Electrotechnique, Ecole Normale Supérieur de Cachan, 2002.

- [4] B. Boukhezzar, « Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable », Thèse doctorat en sciences, Université Paris XI ORSAY, 2006.

- [5] J. ERAST and W. LEONHARD, « Optimisation of wind energy outpout of variable speed wind turbines », In wind power 85, San Francisco, CA, 1985.

- [6] T. Senjyu, Nakasone.N, Yona.A, Saber.A.,Y., Funabashi.T, Sekine.H, «operation strategies for stability of gearless wind power generation systems», IEEE conference, Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21 st Centry, pp.1-7,2008.

- [7] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.

- [8] A.Mirecki, « Etude Comparative de chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une

- Eolienne de Petite Puissance ». Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [9] V. Courtesuisse, « Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse doctorat en Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, 2008.
- [10] Ming Yin, Gengyin Li, Ming Zhou, Chengyng Zhao, « Modelling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration », Pwer Enginering Society General Meeting, jun 2007, PP 1-6.
- [11] Jean_Claude Sabonnadière, « Nouvelles technologies de l'énergie 1 », Lavoisier, 2006.
- [12] Michel Crappe, « Commande et régulation des réseaux électriques », Lavoisier, 2003.
- [13] A. Abdelli, « optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [14] A. Boyette, « Contrôle- commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse doctorat en Génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [15] Nicolas Laverdure, « Sur l'intégration des générations éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèse doctorat, L'INPG, Génie Electrique, Décembre 2005.
- [16] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et de qualité de l'énergie », J3eA, vol.5-Hors Série 1,2006.
- [17] S.EL-Aimani. « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [18] R. Melicio V. M. F. Mendes, J. P. S. Catalão, « Computer Simulation of Wind Power Systems: Power Electronics and Transient Stability Analysis », Internationnal Conference on Power System Transients (IPST2009), Kyoto, Japan, Juin 3-6, 2009.
- [19] Xing Zuoxia , Yao Xingja, « Research of Double Fed Variable Speed Wind Turbine

- Power Output Performance», ICIEA 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 23-25 May, 2007, China.PP.1378-1383.
- [20] O.Gergaud, B.Multon, H.Ben Ahmed, « Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne », Electrotechnique du Futur 2001, pp.17-22. Nancy, November, 2001.
- [21] S. M. Muyeen, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, and M. H. Ali, « Transient Stability Analysis of Permanent Magnet Variable Speed Synchronous Wind Generator », Proceeding of international conference on electrical Machines and Systems, oct 8-11 2007,Seoul,Korea.
- [22] K. Ghedamsi and all, « Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system», Renewable Energy 33(2008) 2145-2156.
- [23] GUY STURTZER, EDDIE SMIGIEL, «modélisation et commande des machines triphasées», mars 2000.
- [24] A. Abedini and A. Nasiri, « PMSG Wind Turbine Performance Analysis During Short Circuit Faults », IEEE Canada Electrical Power Conference, pp.165, jui.2007.
- [25] Philippe Barret, « Régimes transitoires des machines tournantes électriques », Editions Eyrolles 1987.
- [26] Fernando Soares dos Reis, «Active Shunt Filter for Harmonic Mitigation in Wind Turbines Generators», 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 18 - 22, 2006, Jeju, Korea.
- [27] Fang Liu, Xing Zhang, Zhen Xie, Po Xu, Liuchen Chang, « Shunt Active Power Filter for Harmonic and Reactive Current Compensation in Wind Conversion Systems», Power Electronics Specialists Conference, 2008, PESC 2008, IEEE, PP. 2329-2332.
- [28] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable

- intégrant du stockage inertiel d'énergie », thèse doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [29] J.Larouche, ''Cours et exercice corrigés'', Livre de l'Electronique de puissance Convertisseurs .Lycée E.Belin de Vesoul, 2003.
- [30] Jean Paul Louis, « Modèles pour la commande des actionneurs électriques », EGEM, Lavoisier, 2004.
- [31] Guy Grellet, Guy clerc, « Actionneurs Electriques », Editions Eyrolles, 1997.
- [32] G.Seguiet,F.Labrique, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », Edition Lavoisier. Tec&Doc, 1998, tome1,et tome 4.
- [33] G. Cimuca, « Système inertiel de stockage d'énergie associé a des générateurs éoliens », thèse doctorat en Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2005.
- [34] Y.Madi, « Etude des onduleurs multiniveaux dans les chaines de production d'énergie éolienne », mémoire magister, Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2009.
- [35] M.E.Haque, K.M.Mattaqui, and M Negnevitsky, « Contrôle of stand alone variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator », Power and Enegy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in 21st Centry, PP.1-9,2008.
- [36] H.Camblong, « Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat d'Etat en Automatique. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2003
- [37] Yang Yong, « Grid-connected inverter for wind power generation system», J Shanghai Univ (Engl Ed), 2009.

- [38] You Jiang, Meng Fan Rong and Luo Hua, « Variable Speed Constant Frequency Tidal Current Energy Generation and Control Strategy for Maximum Power Point Tracking and Grid Connection», Sustainable Power Generation and Supply, 2009, Supergen 09, International Conference, PP. 1-6.
- [39] Monica Chinchilla and all, «Controle of Permanent –Magnet Generator Applied to Variable Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol, N, 1, March 2006.
- [40] S. Boulkhrachef, « Analyse et contrôle de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC. Application à la commande floue de la machine asynchrone », thèse de magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, May 2001.
- [41] R. Chibani, « Application de l'automatique aux cascades à onduleur à cinq niveaux à structure NPC », thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, 2007.
- [42] E. Berkouk, « Contribution à la conduite des machines asynchrone monophasée et triphasée a alimentées par convertisseurs directs et indirects. Application aux gradateurs et onduleur multiniveaux », thèse doctorat du Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France, décembre 1995.
- [43] M. Fracchia, T. Ghiara and all, « Optimized Modulation Techniques for the Generalized N. Level Converter», Power Electronics Specialists conference PESC 92, Vol1.2, 1992.
- [44] J. Sheng Lai, F. Zheng Peng, « Multilevel Converter-A New Breed of Power converters», IEEE transaction on Industry Application, Vol 32.N°3, May/june 1996.

ANNEXE

Paramètres de la chaîne de conversion éolienne basée sur une GSAP

Les paramètres mécaniques de la turbine éolienne de 2MW basée sur une GSAP, sont illustrés dans le tableau suivant [8], [12]

<i>Elément de la chaîne de conversion éolienne</i>	<i>Valeur Numérique</i>	<i>Signification</i>
<i>Turbine éolienne</i>	$\rho = 1.22 \text{ Kg} / \text{m}^3$	Masse volumique de l'air
	$R = 4 \text{ m}$	Rayon de l'éolienne
	$J = 8000 \text{ Kg.m}^2$	Inertie équivalente de (turbine+GSAP)
<i>Génératrice synchrone à aimants permanents</i>	$R_s = 0.1 \Omega$	Résistance statorique
	$L_d = 0.005 \text{ H}$	Inductance statorique selon l'axe d
	$L_q = 0.005 \text{ H}$	Inductance statorique selon l'axe q
	$K_f = 10.68.002 \text{ V.s.rad}$	Coefficient d'aimantation
	$P = 80$	Nombre de paires de pôles
<i>Bus continu</i>	$U_c = 3500 \text{ V}$	Tension nominale du bus continu
	$C = 15000$	Capacité du bus continu
<i>Liaison au réseau</i>	$L_f = 0.001 \text{ H}$	Inductance du filtre
	$R_f = 0.01$	Resistance du filtre
<i>Réseau</i>	690 V	Tension simple du réseau
	50 Hz	Fréquence du réseau