

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU MAMMERI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE MAGISTER

En Electrotechnique
Option : Entraînement électrique

Présenté par

M^{elle} AGGOUN GHANIA

*Etude qualitative de l'association convertisseur machine
pour l'entraînement électrique d'un système de génération
éolienne*

Devant le jury d'examen composé de :

MOHELLEBI Hassane
FELLAG Sid Ali
AOUZELLAG Djamel

Professeur à l'UMMTO
Maitre de conférence classe A à l'UMMTO
Maitre de conférence classe A à Bejaia

Président
Rapporteur
Examineur

Remerciements

Remerciements

Je ne pourrai jamais remercier suffisamment mon encadreur Mr FELLAG SID ALI, maître de conférences au département d'électrotechnique, faculté génie électrique et informatique à l'UMMTO pour tout le temps qu'il m'a accordé tout au long de ce travail, son soutien moral et scientifique, sa disponibilité ainsi que la confiance qu'il m'a accordé.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui me feront l'honneur de juger ce travail, Monsieur MOHELLEBI Hassane professeur à l'UMMTO ainsi que Monsieur AOUZELLAG Djamal maître de conférences à l'Université ABDELAHMANE MIRA de Bejaia.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale

Chapitre 1 : Théorie sur les énergies renouvelables

1.1 Introduction.....	3
1.2 Production d'énergie électrique par sources renouvelables	3
1.3 Génération d'énergie renouvelable.....	5
1.3.1 Génération de la chaleur.....	6
1.3.2 Génération d'électricité	8
1.4 Etat de l'art, principes et éléments constitutifs de l'éolien	11
1.4.1 Historique de l'éolien	11
1.4.2 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne	13
1.4.3 Principaux composants d'une éolienne	14
1.4.4 Les différents types d'éoliennes	16
1.4.4.1 Axe vertical (VAWT)	16
1.4.4.2 Axe horizontal (HAWT)	18
1.4.5 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	21
1.4.5.1 Loi de Betz – notions théoriques.....	21
1.4.5.2 Impact du nombre de pales sur le coefficient Cp	22
1.4.6 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	23
1.4.6.1 Partie mécanique	23
1.4.6.2 Méthodes de contrôle au niveau de la turbine	27
1.5 La conversion électromécanique	31
1.5.1 Systèmes à vitesse fixe	32
1.5.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil	32
1.5.2 Systèmes à vitesse variable	33
1.5.2.1 Variation de +10% au-delà de la vitesse de synchronisme.....	34
(Machine asynchrone contrôle de la résistance rotorique: <i>structure MASRe</i>	
1.5.2.2 Variation de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme (Machine	
asynchrone à double alimentation : <i>structure MADA</i>	35
1.5.2.3 Variation de 0 à 100% de la vitesse nominale de rotation (Machine	
synchrone à inducteur bobiné ou à aimants : <i>structure MS</i>	37
1.5 Conclusion.....	37

Chapitre 2 : Modélisation d'un système éolien (turbine, MADA)

2.1 Introduction.....	39
2.2 Principe de la double alimentation par le stator et le rotor	39
2.3 Modélisation de la vitesse du vent.....	40
2.4 Modélisation de la turbine.....	40
2.4.1.1 Dispositif d'entraînement	41
2.5 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....	45
2.5.1 Techniques d'extraction du maximum de la puissance.....	45
2.6 Synthèse du régulateur <i>Proportionnel-Intégral</i> pour le contrôle de la vitesse	46
2.7 Mode de fonctionnement de la MADA	47
2.7.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	47
2.7.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	48
2.7.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	48
2.7.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	48
2.8 Modélisation de la machine à double alimentation (MADA) et sa commande.....	49
2.8.1 Equations de tension en grandeurs de phase [14]	50
2.8.2 Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park	50
2.9 Résultats de simulation.....	55
2.10 Conclusion.....	57

Chapitre 3 : Commande vectorielle de la Machine Asynchrone à double alimentation

3.1 Introduction	58
3.2 Stratégie de commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation	58
3.3 Choix du référentiel pour le modèle de Park.....	58
3.4 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	61
3.5 Expressions de puissances active et réactive de l'aérogénérateur.....	61
3.6 Commande vectorielle en puissance de la MADA en génératrice.....	62
3.6.1 Principe génér.....	62
3.6.2 Objectifs du contrôle.....//.....	64
3.7 Mise en place de la régulation.....	64

3.7.1 Synthèse du régulateur <i>Proportionnel-Intégral</i> pour le contrôle de la puissance...	65
3.8 Résultats de simulation.....	66
3.9 Conclusion.....	

Chapitre 4 : Modélisation des convertisseurs statiques (AC-DC, DC-AC)

4.1 Introduction	69
4.2 Etage onduleur.....	70
4.2.1 Principe de la modulation sinus-triangle	71
4.2.2 Le principe de la modulation vectorielle	73
4.2.3 Application de la modulation sin-triangle et la modulation vectorielle pour un onduleur de tension	83
4.2.3.1 Le modèle du filtre R-L et la charge R-L	84
4.2.3.2 Spectre de fréquences	86
4.2.3.3 Application de la MLI vectorielle à l'onduleur de tension.....	87
4.2.3.4 Application de la MLI sinus triangle à l'onduleur de tension.....	89
4.3 L'étage redresseur.....	90
4.3.1 Redresseur à commutation forcée à facteur de puissance unitaire.....	90
4.3.2 Mise en équation du système.....	91
4.3.3 Stratégie de contrôle du facteur de puissance unitaire	92
4.3.4 Asservissement de la tension de sortie et du courant d'entrée.....	92
4.3.5 Synthèse du correcteur PI.....	94
4.4 Conclusion	94

Chapitre 5 : Résultats de la simulation sous Matlab/ Simulink de la chaîne éolienne

5.1 Introduction	97
5.2 Schéma synoptique du dispositif étudié.....	97
5.3 Résultats de simulation du système complet: Redresseur de courant -Onduleur de tension à deux niveaux – MADA –Turbine.....	97

5.4 Interprétations des résultats.....	100
5.5 Conclusion	101

Conclusion générale

Nomenclature

ω_v : Pulsation du vent

V_v : Vitesse du vent (m/s)

$\rho = 1,225 \text{ kg.m}^{-3}$: Densité de l'air

$P_{méc}$ La puissance mécanique disponible sur l'arbre de transmission

$P_{méc_opt}$: la puissance mécanique optimale.

C_p . Coefficient de puissance

λ Rapport de vitesse

C_t Le couple produit par l'éolienne

$C_T(\lambda)$: coefficient de couple

R Rayon de l'éolienne (m)

K Gain du multiplicateur de vitesse

β Angle d'orientation des pales [rd]

J Moment d'inertie de la turbine [kg.m^2] ;

C_{p-max} Coefficient de puissance maximal

C_{aero} Couple aérodynamique [$N.m$]

λ_{opt} Rapport de vitesse optimal ;

S La surface circulaire balayée par la turbine [m^2]

C_g Couple transmet à la génératrice [$N.m$] ;

C_{em} Couple électromagnétique [$N.m$]

$C_{em_réf}$ Couple électromagnétique de référence [$N.m$]

Ω_{mec} Vitesse mécanique de la génératrice [rd/s]

$\Omega_{turbine}$ Vitesse de rotation de la turbine [rd/s]

f Coefficient de frottement visqueux [$N.m.s/rd$]
 P_g Puissance active de l'aérogénérateur [W]
 Q_g Puissance réactive de l'aérogénérateur [VAR]
 P_s Puissance active statorique [W]
 Q_s Puissance réactive statorique [VAR]
 P_r Puissance active rotorique [W]
 Q_r Puissance réactive rotorique [VAR]
 R_s, R_r Désignent respectivement les résistances par phase du stator et du rotor
 L_{sr} Induction mutuelle stator-rotor
 g Le glissement de la génératrice.
 ψ_{ds} Flux statorique d'axe directe [Wb].
 ψ_{qs} Flux statorique d'axe en quadrature [Wb].
 ψ_{os} Flux statorique homopolaire [Wb].
 ψ_{dr} Flux rotorique d'axe directe [Wb].
 ψ_{qr} Flux rotorique d'axe en quadrature [Wb].
 ψ_{or} Flux rotorique homopolaire [Wb].
 V_{ds} Tension statorique d'axe directe [V].
 V_{qs} Tension statorique d'axe en quadrature [V].
 V_{os} Tension statorique homopolaire [V].
 V_{dr} Tension rotorique d'axe directe [V].
 V_{qr} Tension rotorique d'axe en quadrature [V].
 V_{or} Tension rotorique homopolaire [V].
 i_{ds} Tension statorique d'axe directe [A].
 i_{qs} Tension statorique d'axe en quadrature [A].
 i_{os} Courant statorique homopolaire [V].

i_{dr} Tension rotorique d'axe directe [A].
 i_{qr} Tension rotorique d'axe en quadrature [A].
 i_{or} Courant rotorique homopolaire [V].
 L_s Inductances cycliques statorique
 L_r Inductances cycliques rotorique
 L_{or} Inductances cycliques homopolaire
 ω_s Pulsation statorique [rd/s].
 ω_r Vitesse électrique du rotor ;
 P Nombre de paires de pôles de la génératrice.
 η Rendement de la génératrice.
 P_{g_ref} Puissance de référence de l'aérogénérateur.
 Q_{g_ref} Puissance réactive de référence de l'aérogénérateur
 V_{dc} Tension du bus continu
 V_{dc_ref} Tension référence du bus continu
 i_{ref} Courant de référence
 C_{dc} La capacité du condensateur
 $S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6$ Les interrupteurs des convertisseurs
 h Largeur de la bande d'hystérésis
 P_c Puisque la puissance moyenne du coté continu
 m L'indice de modulation
 r Le coefficient de réglage en tension
 THD taux de distorsion harmonique
 G_c Régulateur PI, P
 K_p Gain proportionnel
 K_i Gain intégral
 w_n Pulsation naturelle [rd/s]

p Opérateur de Laplace.

ξ Coefficient d'amortissement

Introduction générale

Introduction générale

*L'électricité, forme propre de l'énergie par excellence, est aujourd'hui produite, à près de 80 %, grâce à la combustion des carburants fossiles ou de l'uranium 235 (fission nucléaire) [3], ressources épuisables. Elle contribue ainsi abondamment à la production de déchets nuisibles pour l'environnement. Les ressources énergétiques renouvelables sont pourtant considérables et parfaitement capable de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Mais outre l'hydroélectricité, technologie parfaitement mature, les solutions de conversion des ressources renouvelables, que sont le **soleil**, le **vent**, la **houle**, la **biomasse**, etc..., sont encore en phase de décollage industriel et ne représentent qu'une faible part dans le bilan global. Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis la crise pétrolière de 1973 a relancé de nouvelles recherches des filières de production d'électricité d'origine renouvelable, qualifiées de nouvelles, c'est-à-dire hors «hydroélectricité». [2]*

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques, en Asie en particulier.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est d'améliorer le rendement des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés. [7][8]

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Néanmoins, longtemps négligées, les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent

des recherches et des développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et d'augmenter l'efficacité énergétique.

Parmi ces énergies alternatives renouvelables nous nous sommes intéressés dans notre travail à l'énergie d'origine éolienne qui est en plein essor dans le monde entier ; la multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Ainsi, dans le cadre du présent mémoire, nous nous sommes intéressés à l'utilisation des machines de type asynchrone à double alimentation largement utilisées dans les systèmes éoliens.

Le premier chapitre est consacré à un état de l'art sur les différentes formes d'énergies renouvelable utilisées dans la production de l'électricité ainsi que des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le deuxième chapitre présente le modèle de la turbine ainsi que la topologie de la machine asynchrone à double alimentation. Son fonctionnement en génératrice à vitesse variable ainsi que les grandeurs de commande utilisées lorsqu'elle est intégrée à un système éolien sont détaillées. Une modélisation dans un repère diphasé lié au champ statorique et une stratégie de commande vectorielle en puissances active et réactive statoriques sont proposées.

Le troisième chapitre, la commande vectorielle est élaborée en terme de puissance active et réactive au niveau statorique. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, où on a exprimé les grandeurs statoriques de la machine asynchrone à double alimentation en fonction des grandeurs rotoriques dans le but du pilotage de la MADA par le rotor.

Le quatrième chapitre présente l'étude de la chaîne rotor composée d'un redresseur de type tension réversible à base de transistors et à facteur de puissance unitaire suivi d'un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion. Les convertisseurs n'étant pas sur le chemin principal du flux de puissance, ils sont dimensionnés au voisinage de 25% de la puissance nominale produite, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse. La gestion des puissances actives et réactives de la machine est assurée par le convertisseur statique

branché à son rotor. Le rôle du convertisseur statique branché au réseau est de régler la tension de l'étage continu tout en assurant un facteur de puissance unitaire coté alternatif.

Dans le cinquième chapitre, les résultats obtenus sont donnés ainsi que leurs interprétations.

Enfin une conclusion générale clos ce travail.

Chapitre 1

Théorie sur les énergies renouvelables

1.1 Introduction

La production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale (figure.1a) et la part des énergies renouvelables n'est que de 14% environ [3]. Il apparaît donc de façon flagrante que l'électricité, bien qu'énergie finale propre par excellence, contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ressources non renouvelables (combustibles fossiles et uranium). C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité.

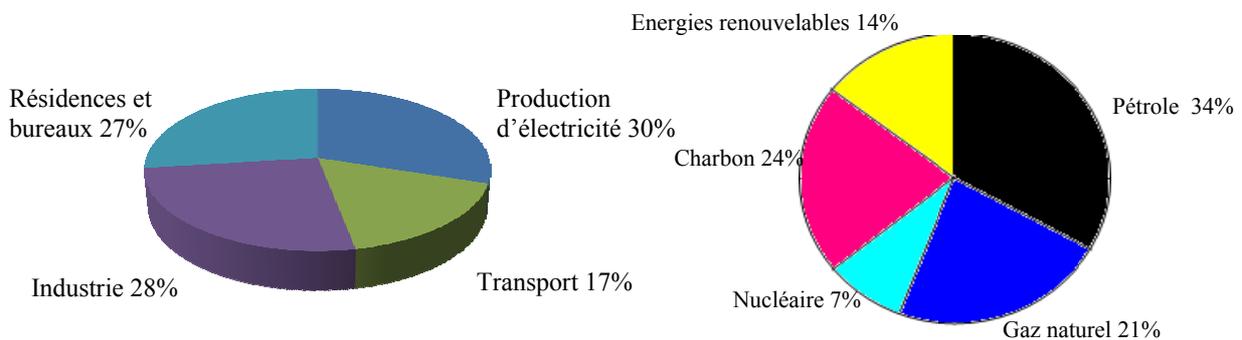


Figure 1.1.a- Répartition de la consommation primaire de l'énergie

Figure 1.1.b- Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde

1.2 Production d'énergie électrique par sources renouvelables

L'électricité, est aujourd'hui produite, à près de 86 %, grâce à la combustion des carburants fossiles ou de l'uranium 235 (fission nucléaire), ressources épuisables [1]. Elle contribue ainsi abondamment à la production de déchets nuisibles pour l'environnement.

Les ressources énergétiques renouvelables sont pourtant considérables et parfaitement capables, à long terme, de satisfaire la majeure partie de nos besoins. Mais outre l'hydroélectricité, technologie parfaitement mature, les solutions de conversion des ressources renouvelables, que sont le *soleil*, le *vent*, la *houle*, la *biomasse*, etc., sont encore en phase de décollage industriel et ne représentent qu'une faible part dans le bilan global [2].

Après de nombreux soubresauts, les contraintes environnementales, le rapprochement de l'échéance d'épuisement des ressources fossiles et fissiles ainsi que les soucis d'indépendance énergétique conduisent depuis les années 1990 à un décollage significatif des filières de production d'électricité d'origine renouvelable, qualifiées de nouvelles, c'est-à-dire hors «grande hydroélectricité» [2].

En effet, la consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître (figure 1.2) posant des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétiques.

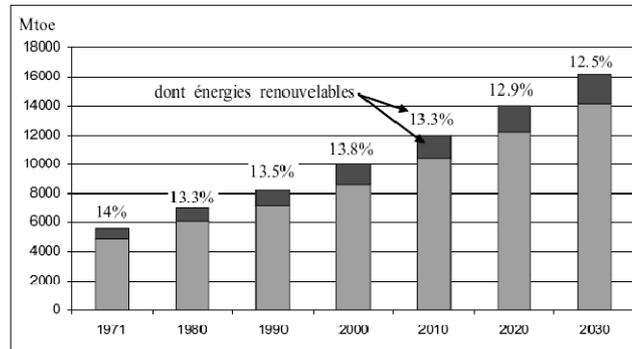


Figure 1.2 : Consommation mondiale en énergie

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre [3] qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs [3].

L'autre argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en énergies. Dans le courant de 21^{ème} siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître [3]. De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour « tenter » de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique 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. Dans le contexte économique actuel où l'on ne chiffre qu'une partie des coûts en occultant certains « coûts collatéraux » (démantèlement de centrales, pollution,...) les installations à énergie renouvelable peuvent encore aujourd'hui avoir un coût important (exemple des panneaux solaires photovoltaïques) et sont donc plutôt réservées à des pays développés où elles peuvent dans d'autres cas être assez peu onéreuses (exemple de la combustion de la biomasse) et peuvent être utilisées dans les pays en voie de développement[1][2][3].

1.3 Génération d'énergie renouvelable

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est lié au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui est extrait des gisements respectifs et acheminé « sans gros problèmes » vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées de milliers de kilomètres. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation. Seule la biomasse semble avoir les propriétés les moins restrictives. Par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés, les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées, les propriétés de la houle ne sont pas favorables partout sur les mers [7][8]. Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire de transformer l'énergie renouvelable sous la forme électrique qui est transportable via les lignes électriques.

La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. Cependant, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique et du stockage de masse, actuellement principalement assuré par l'hydraulique.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine *mécanique* (la houle, éolien), énergie *électrique* (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la *chaleur* (géothermie, solaire thermique,...)

Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité des ressources.

A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne.

Toutes les ressources renouvelables sont en forte croissance ; la figure 1.3 donne une vue sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que leurs prévisions pour les années à venir.

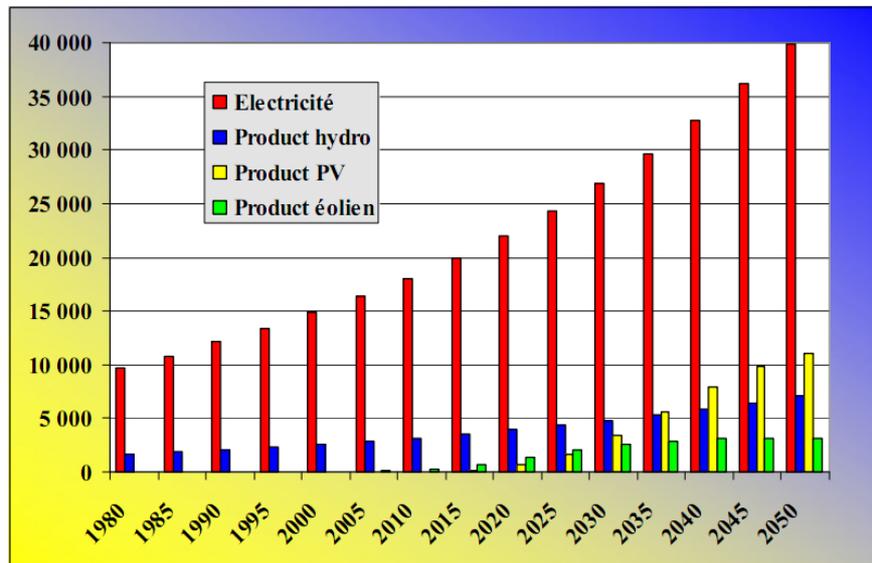


Figure 1.3 : Production mondiale de l'électricité basée sur les énergies renouvelables TW [48].

1.3.1 Génération de la chaleur

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables. Une description et quelques commentaires sont proposés ci-dessous.

➤ Thermo solaire

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où 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, très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée.

Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance.

➤ Géothermie

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la Terre [3]. Dans certaines zones favorables, on trouve, en effectuant des forages plus ou moins profonds, de l'eau à température élevée. Dans la plage de 150-350° C, on parle de géothermie haute énergie. L'eau est pompée vers la surface et passe dans des échangeurs; la vapeur produite est ensuite turbinée comme dans les centrales thermiques classiques [1].

Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1 000 °C à 4 300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères [3].

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement : la haute (>180°C), moyenne (>100°C), basse (>30°C) et très basse énergie [3]. Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé.

➤ Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse.

Différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants, le biogaz. Le bois – énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde. En Europe, c'est 51% de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie [1]. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut utiliser toutes les ressources du bois : les chutes ou déchets de production des industries de transformation du bois (bois d'élagage, le bois forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut

provenant d'emballages, de palettes etc.). L'utilisation va de petites chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle de plus de 15 MW.

Le développement des biocarburants est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du baril de pétrole. Aujourd'hui éthanol (betterave, blé...) et biodiesel (colza, tournesol...) offrent des avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre.

1.3.2 Génération d'électricité

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique.

➤ Photovoltaïque

La génération directe d'électricité à partir d'un rayonnement lumineux associée aux énormes ressources énergétiques solaires constitue, à long terme, l'un des principes les plus prometteurs de production d'énergie électrique [49]. La conversion photovoltaïque est statique, elle offre un total silence de fonctionnement et permet d'envisager une très grande fiabilité. Enfin, elle se prête extrêmement bien à une forte décentralisation en exploitant directement les surfaces de toitures des bâtiments [2][21].

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons [49]. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la matière première peu coûteuse et abondante (silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Cependant, de nets progrès ont été faits à ce sujet et on considère aujourd'hui qu'il suffit de 1.6 à 4.7 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a nécessitée [49]. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie utilisée. Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT) [3]. Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne.

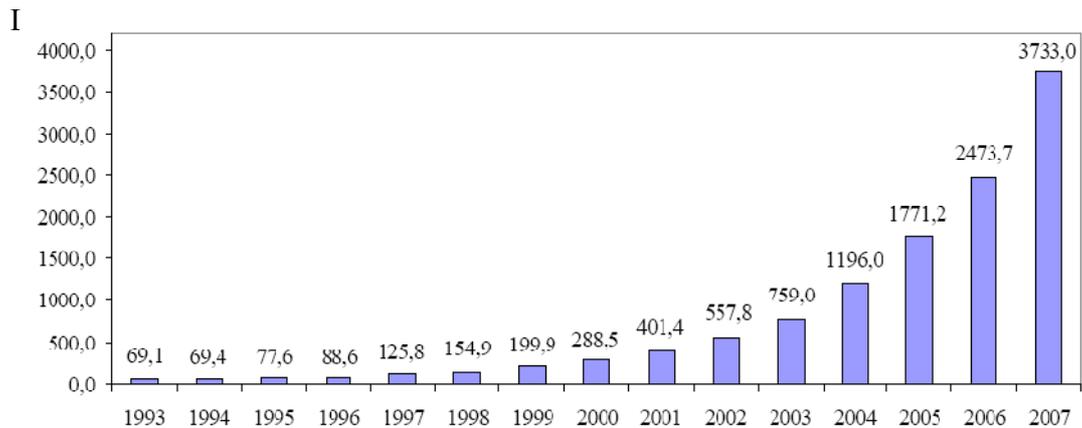


Figure 1.4 : Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques en MW [50].

➤ Hydraulique

C'est aujourd'hui, et de très loin, la première source d'électricité d'origine renouvelable.

La puissance installée dans le monde atteint **740 GW** pour une production annuelle de **2,7.10¹² kWh** [2]. C'est une solution extrêmement attractive qui est exploitée au voisinage du maximum de son potentiel dans de nombreux pays industrialisés. En France, environ 90 % des ressources sont utilisées.

Certaines régions du monde sont plus favorisées que d'autres (Norvège, Québec, Amazonie, Chine...) mais une grande partie des zones habitées sont traversées par des cours d'eau dont le potentiel est souvent encore peu exploité (11 % en Asie et 4 % seulement en Afrique) [2].

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 ».

Certains pays (dont la France) sont déjà « saturés » en sites hydroélectriques exploitables et ne peuvent pratiquement plus progresser dans ce domaine. Les sites de petite puissance (inférieures à 10kW) sont des solutions très prisées dans les applications aux petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont un grand avantage.

➤ Energie de la mer

L'énergie des vagues est encore 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 créées 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 [3]. Une autre façon de récupérer de l'énergie de la mer est la production grâce à la marée qui est due à l'action de la lune sur les eaux. Les barrages ou des hydroliennes installées dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source de l'énergie substantielle.

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.

➤ Production éolienne

L'échauffement différentiel de la surface terrestre par le soleil entraîne le déplacement d'importantes masses d'air sur la terre, le vent. Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en électricité ou en d'autres formes d'énergie [4].

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. La capacité dans le monde atteint 159'213 MW, dont 38'312 MW ont été ajoutés en 2009. Dans l'échelle mondiale L'énergie éolienne a montré un taux de croissance de 31,7%, taux le plus élevé depuis 2001. La tendance s'est poursuivie que la capacité éolienne double tous les trois ans. Ce chiffre a atteint environ 203 500 MW en 2010 [52].



Figure 1.5 : Croissance mondiale de la capacité installée d'énergie éolienne en MW [52]

1.4 Etat de l'art, principes et éléments constitutifs de l'éolien

1.3.1 Historique de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ.

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent [3].

Des moulins à vent à axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres afghanes 7 siècle A.C. pour moudre du grain [5].

La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur réapparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30 000 et dans toute l'Europe à 200 000[3]. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. Ainsi dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice [3][5]. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs.

La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouvelles recherches et les réalisations éoliennes dans le monde ; ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donne naissance aux aérogénérateurs modernes [5]

Après un siècle de recherches, d'essais et de déconvenues, la génération éolienne a connu son premier marché avec le « wind rush » californien dans les années 1980 [5][1]. Cette opération

volontariste a permis au marché éolien de se créer et d'amorcer une réelle compétitivité économique.

Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance depuis plus de 10 ans et cela devrait continuer pendant les 20 prochaines années [1][5]. Ainsi l'aérogénérateur devrait constituer la plus grande contribution à la réduction de l'effet de serre.

Les raisons de cette croissance résident dans la forte volonté politique de développement de cette filière mais également dans des coûts de production qui deviennent de plus en plus compétitifs. La productivité énergétique dépend ensuite de l'intensité des vents (vitesse moyenne) et de leur variabilité. On considère que les bons sites éoliens terrestres conduisent à un fonctionnement équivalent à pleine puissance de plus de 2000 heures par an (sur les 8760), certains sites dépassent les 3000 heures, mais c'est plutôt en zone offshore que l'on rencontre de telles conditions [1][2].

1.4.2 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

➤ Les avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. *L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂.*
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO_x. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de

la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus simuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

➤ **Les désavantages**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel. Ca reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'au développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques ; bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est-à-dire là où il y a le plus de vent. Concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste en encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

1.4.3 Principaux composants d'une éolienne

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

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. Le fonctionnement général est illustré par la figure 1.6; l'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

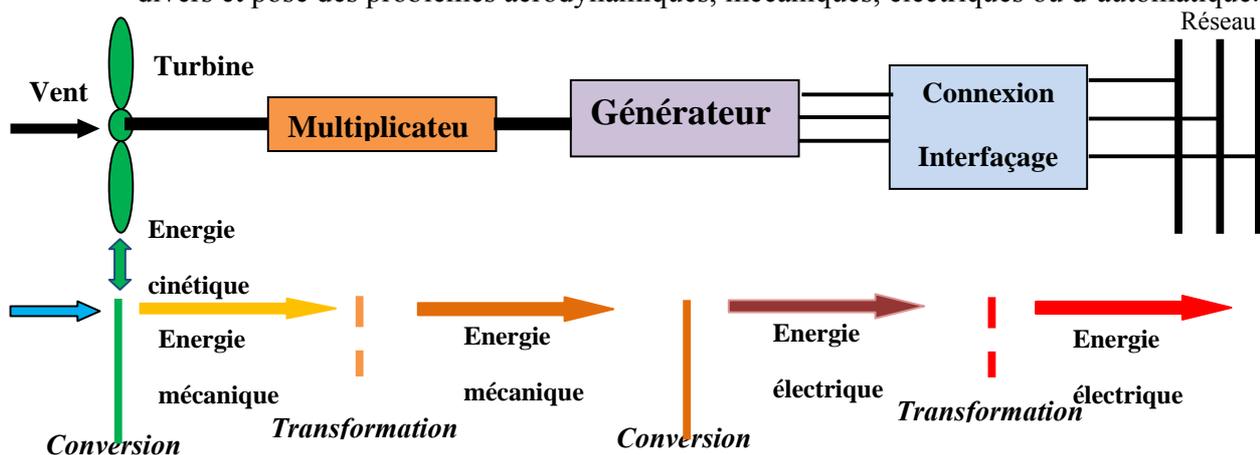


Figure 1.6: Principe de la conversion d'énergie

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

Le mât : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de

l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur [6]).

La nacelle : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

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

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écurie) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

1.4.4 Les différents types d'éoliennes

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

Bien qu'il existe des turbines à axe vertical (Darrieus, Savonius...), les machines à axes horizontal dominant très largement le marché des petites puissances (quelques 10 W jusqu'aux plus élevées, de quelques MW).

1.4.4.1 Axe vertical (VAWT)

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité [6]. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [7].

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue [3], de nos jours elles sont très peu mises en œuvre car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal [7]. Cependant, elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application, on trouve des éoliennes à axes verticaux développées pour la production de faibles puissances, de 100W à 25kW. Elles sont destinées à des utilisations permanentes, par exemple la charge de batteries servant à alimenter un chalet en montagne.

Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : les turbines Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30) [7][6] classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) [6].

La conception verticale possède l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche au sol, moins fort qu'en hauteur freiné par le relief.

De part son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor.



a) Darrieus,

b) Darrieus de type H,

c) Savonius

Figure 1.7 : Exemples des constructions VAWT.

- Le rotor de Darrieus fonctionne grâce à la portance et se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple de démarrage de ce type

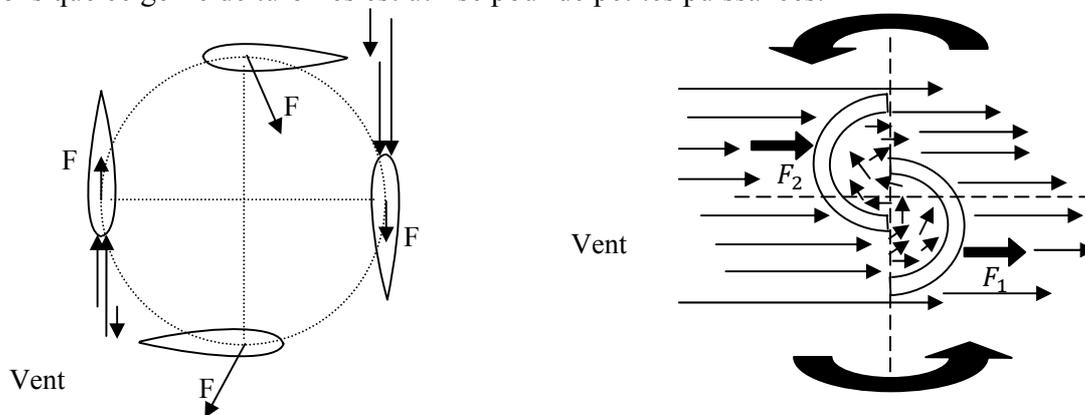
d'éoliennes est proche de zéro, ce qui implique lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur) [3][6]. (figure 1.8.a).

En ce qui concerne leurs implantations, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet des câbles haubans doivent passer au dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole par exemple.

Les deux problèmes majeurs de la Darrieus en forme de « batteur d'œufs » résident dans la fragilité de sa structure et par le fait que son mât soit haubané. Ajoutant à cela la faible efficacité de la conversion d'énergie. Tous ces inconvénients ont fortement limités le développement de ces éoliennes, laissant place aux aérogénérateurs à axe vertical [7].

- Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : 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.b).

Notons que ce genre de turbines est utilisé pour de petites puissances.



a- Principe de fonctionnement d'un rotor Darrieus **b-** Principe de fonctionnement d'un rotor Savonius

Figure 1.8 : Principe de fonctionnement des éoliennes à axe vertical.

1.4.4.2 Axe horizontal (HAWT)

Les aérogénérateurs modernes sont presque tous à **axe horizontal**. Ils comprennent un mât et une nacelle supportant la turbine, généralement à 3 pales, qui entraîne une génératrice débitant sur le réseau. La plupart des systèmes intègrent un multiplicateur de vitesse entre la turbine (lente) et la génératrice (rapide) mais des systèmes à attaque directe se développent rapidement. Ils nécessitent des machines électriques lentes sans pour autant alourdir exagérément la nacelle. Les machines rapides sont presque toutes des asynchrones alors que les génératrices lentes sont de type synchrone à rotor bobiné ou à aimants permanents.



*a- Prototype d'éolienne à rotor
FLETTNER*



*b- Installation offshore
en mer du nord*



*c- Enercon tripale E66 :
65m-1,8 MW [1]*

Figure 1.9 : Exemples des constructions HAWT

Plus le diamètre du rotor sera grand, plus la puissance récupérable sera importante dans un vent donné. La gamme des éoliennes disponible est très large, de 50 Watt (diamètre de 90 cm) à 5MW et plus (+ de 124 m de diamètre).

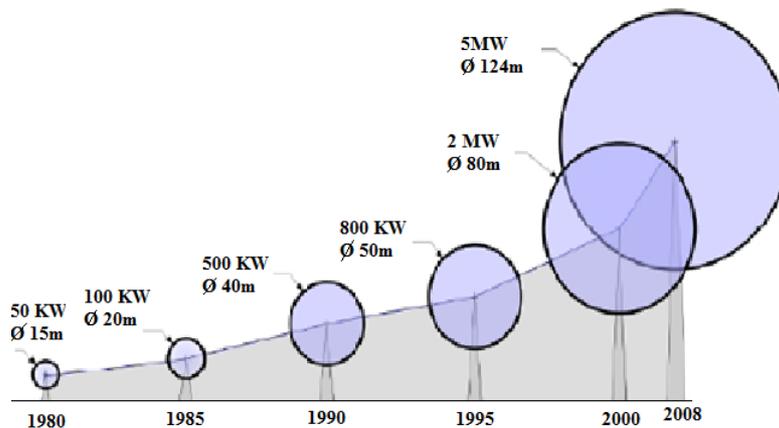


Figure 1.10: Taille des hélices en m et puissance en kW [51].

La voilure peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downwind). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes sont à noter et qui sont dues au passage des pales derrière le mat [3][7]. La Figure 1.11 montre les deux procédés.

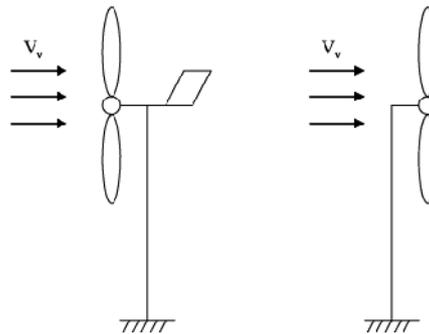


Figure 1.11 : Type de montage de la voilure a) upwind b) downwind.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité [6]. Ce type d'éoliennes utilisent souvent une génératrice à vitesse fixe ou vitesse variable.

Une éolienne à axe vertical est constituée d'une tour (élément porteur). A son sommet se trouve fixée la nacelle (élément actif). La nacelle est constituée d'un système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique avec sa commande :

- un rotor muni de pales fixes ou orientales au nombre de trois, tourne à la vitesse nominale;
- un multiplicateur pour l'adaptation de la vitesse du rotor de l'éolienne à la vitesse du générateur électrique;
- un générateur électrique;
- un dispositif de freinage sur l'arbre;
- un dispositif de freinage aérodynamique sur les pales fixes;
- un système d'orientation des pales pour la régulation de la puissance (réglage aérodynamique);
- un mécanisme d'orientation de la nacelle pour le calage par rapport au vent;
- un anémomètre donnant la vitesse du vent pour la régulation;

- une girouette donnant l'orientation de la direction des vents pour le calage du vent.

La tour de l'éolienne est de forme conique. Les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle et de commande, les appareillages de connexion au réseau de distribution basse tension, sont disposés à l'intérieur de la tour. [9]

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

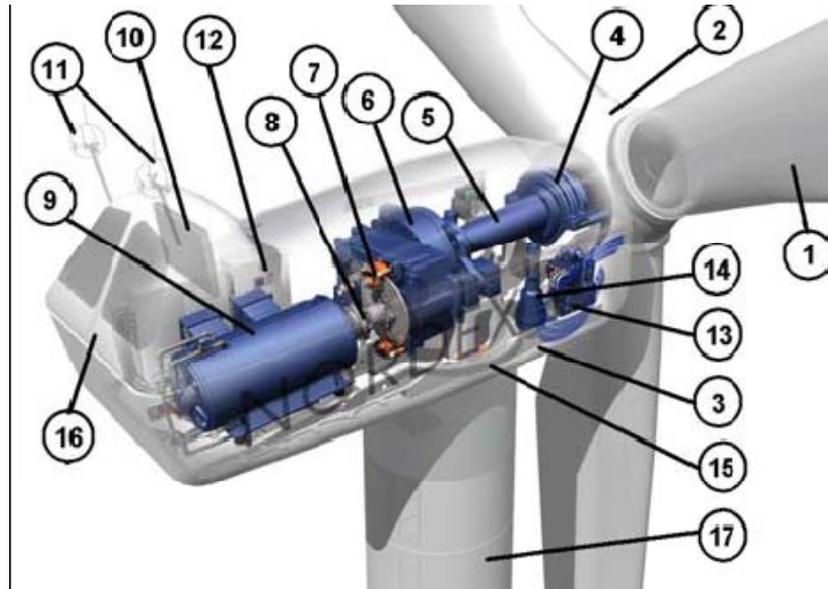


Figure 1.12 : Schéma d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW) [1].

➤ Avantages de ce type d'éolienne

Ces éoliennes captent le vent lent en hauteur et loin du sol, à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Un autre avantage, et non des moindres, est l'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ici, seule la tour occupe de la place au sol et contient généralement tous les systèmes de raccordement. Ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local électrique et l'emprise au sol est vraiment minimale.

1.4.5 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

1.4.5.1 Loi de Betz – notions théoriques

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure 1.13 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit

$\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad 1.1$$

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

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad 1.2$$

Soit en remplaçant m par son expression dans l'équation 1.1:

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad 1.3$$

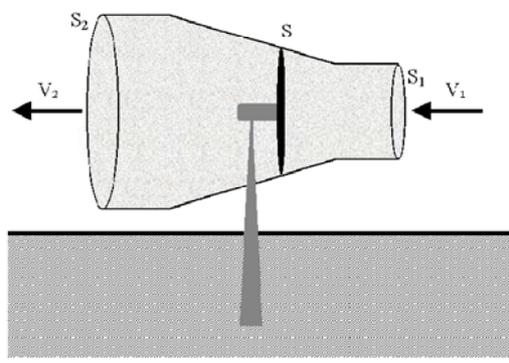


Figure 1.13 : Tube de courant autour d'une éolienne [6].

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

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad 1.4$$

ρ : la densité de l'air qui est égale à 1,22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C.

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

$$P_{méc_max} = \frac{16}{27} \cdot P_{mt} = 0.59 \cdot P_{mt} \quad 1.5$$

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 :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{eol_max}}{P_{mt}} = \frac{2P_{méc_max}}{\rho \cdot S \cdot V_1^3} = 0.59 \quad 1.6$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent :

$$C_p = \frac{2P_{méc}}{\rho \cdot S \cdot V_1^3} \quad 1.7$$

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 de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V_1} \quad 1.8$$

$\Omega_{turbine}$: vitesse de rotation avant multiplicateur [rad/s] et R : rayon de l'éolienne [m].

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique $P_{méc}$ disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{méc} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \left(\frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{K \cdot V_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad 1.9$$

1.4.5.2 Impact du nombre de pales sur le coefficient C_p

Les éoliennes de marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur diamètre est limité à environ 8 mètres ; et celles à marche rapide possèdent de une à trois pales. Ces dernières sont plus adaptées à la production de l'énergie électrique [6].

En passant d'une turbine monopale à la bipale le coefficient de puissance ' C_p ' augmente de 10% ; de la bipale à la tripale le coefficient de puissance C_p s'élève de 3% ; de la tripale à la quadripale le coefficient C_p s'accroît de 1% [11][12].

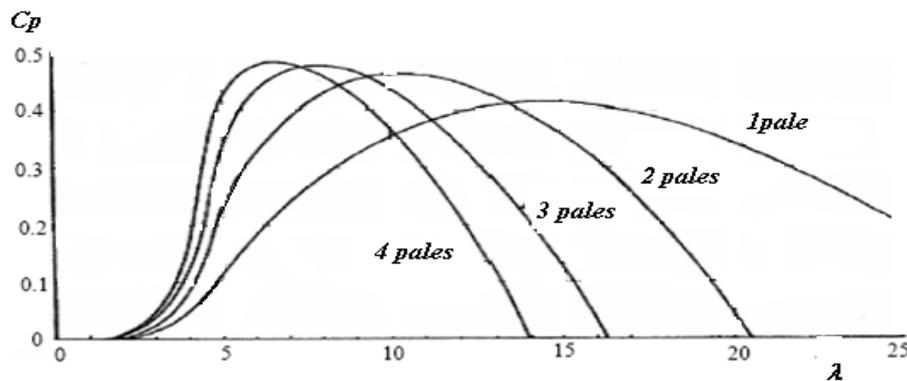


Figure 1.14 : Coefficient de puissance C_p [12].

La turbine monopale nécessite un contre poids. Dans la turbine bipale, des vibrations cycliques importantes peuvent apparaître lorsque la nacelle cherche à suivre le vent et que les

pales sont à horizontale. Une turbine tripale est dynamiquement plus stable et a un meilleur impact visuel.

1.4.6 Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

1.3.6.1 Partie mécanique

➤ Description d'une hélice d'éolienne

Les éoliennes classiquement utilisées actuellement pour la production électrique sont à axe horizontal et avec une hélice à trois pales à pas variable permettant de s'adapter aux différentes conditions de vent.

Les pales utilisées sont en fibre de verre; afin que chaque partie de la pale fonctionne dans des conditions aérodynamiques similaires, permettant une efficacité maximale, les pales s'affinent vers l'extrémité et sont vrillées dans leurs longueurs; le vent relatif est plus important en bout de pales qu'au centre de l'hélice. Ainsi, l'angle d'attaque est plus important en pied de pale qu'en extrémité, ceci afin que l'angle d'incidence soit constant.

➤ Action du vent sur les pales de la turbine

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté par le schéma de la figure 1.15:

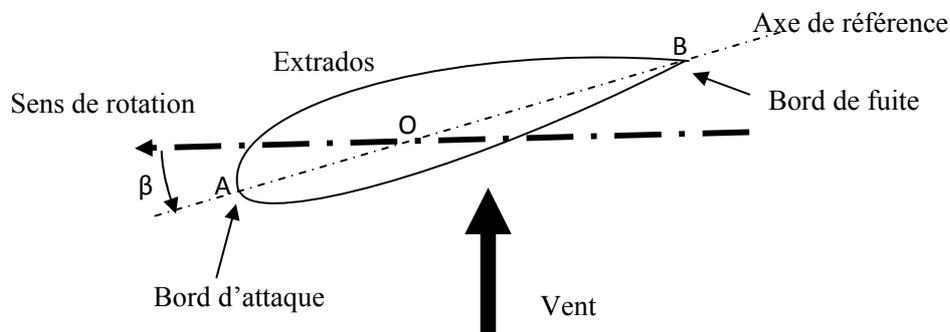


Figure 1.15 : *Eléments caractéristiques d'une pale.*

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- Extrados : dessus de la pale
- Intrados : dessous de la pale
- Corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite
- Angle de calage b (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation)

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis.

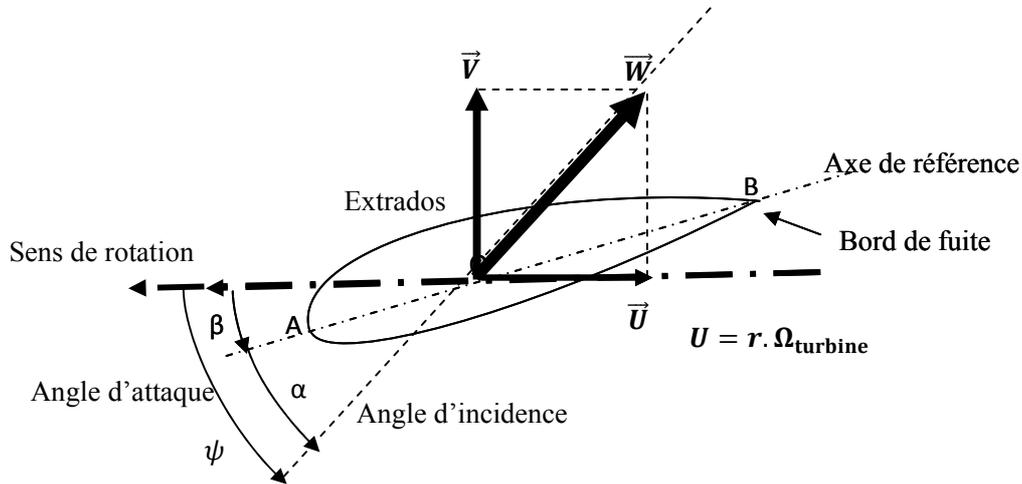


Figure 1.16: Direction du vent sur un tronçon de pale

Du fait de la rotation de la pale, le «tronçon» de largeur dr située à une distance r du moyeu est soumis à la fois au vent incident de vitesse \vec{V} et à un vent relatif de vitesse \vec{U} dirigée dans le sens contraire de la rotation de vitesse Ω_{turbine} :

$$U = r \cdot \Omega_{\text{turbine}} \quad 1.10$$

La vitesse résultante \vec{W} du vent « apparent » s'écrit donc :

$$\vec{W} = \vec{V} + \vec{U} \quad 1.11$$

La vitesse résultante du vent « apparent » \vec{W} fait un **angle d'attaque** ψ avec le plan de rotation. Cet angle s'écrit :

$$\psi = \text{Arctan}\left(\frac{V}{U}\right) \quad 1.12$$

On introduit alors l'angle dit d'incidence, noté α entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent :

$$\alpha = \psi - \beta \quad 1.13$$

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pale de largeur dr et de longueur de corde l à une distance r de l'axe de rotation une force résultante $d\vec{F}$:

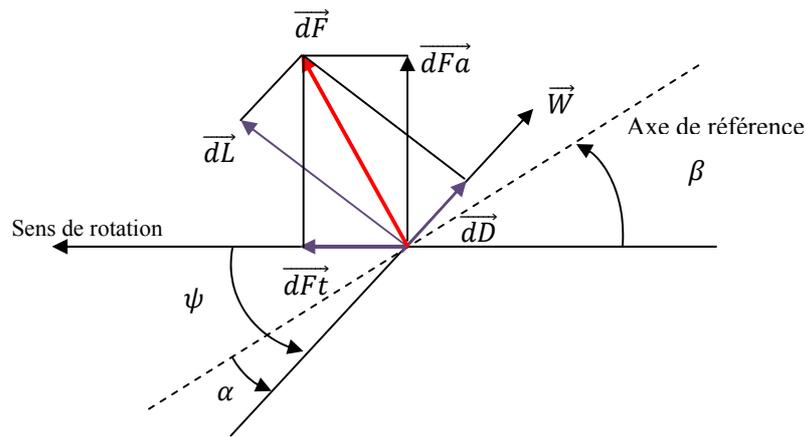


Figure 1.17: Forces appliquées sur un élément de pale.

On peut décomposer la force résultante \vec{dF} de la manière suivante :

- la portance \vec{dL} , normale a la direction du vent apparent.
- la force de traînée \vec{dD} , parallèle a la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- la poussée axiale \vec{dF}_a , perpendiculaire au plan de rotation.
- la poussée tangentielle \vec{dF}_t , dans la direction de rotation.

On déduit aisément les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de la traînée à partir du schéma précédent:

$$dF_t = dL \cdot \sin(\psi) - dD \cdot \cos(\psi) \tag{1.14}$$

$$dF_a = dL \cdot \cos(\psi) - dD \cdot \sin(\psi) \tag{1.15}$$

C'est le couple résultant de l'ensemble des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine.

Les modules des forces dL et dD s'expriment en fonction de deux coefficients, le coefficient de portance C_L et le coefficient de traînée C_D :

$$dL = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot dA \cdot C_L \tag{1.16}$$

$$dD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot dA \cdot C_D \tag{1.17}$$

Avec :

$dA = l(r)dr$: Surface du « tronçon » de la pale

$l(r)$: Longueur de la corde à la distance r de l'axe de rotation

C_L : Coefficient de portance (sans dimension)

C_D : Coefficient de traînée (sans dimension)

w : Module du vent apparent

Ces coefficients C_L et C_D dépendent fortement de l'angle d'incidence α (figure 1.17). Pour des angles α faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance. C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler. Ici, elle « aspire » la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point puis l'écoulement devient turbulent. Du coup, la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le *décrochage aérodynamique*.

Cependant, les concepteurs de pales ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la traînée. La traînée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles α importants.

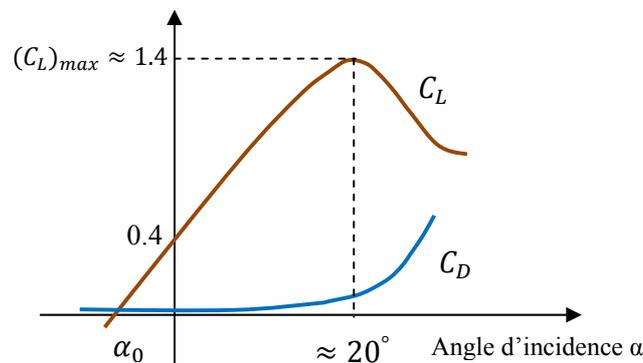


Figure 1. 18: Evolution des coefficients de portance C_L et de traînée C_D

L'intégration le long des N_p pales (généralement $N_p = 3$) des couples élémentaires exercés sur chaque « tronçon » :

$$d\Gamma_t = N_p \cdot r \cdot dF_t \quad 1.18$$

Permet d'obtenir après calcul le couple Γ_T puis l'expression de la puissance captée par :

$$P_{méc} = \Gamma_T \cdot \Omega_{turbine} \quad 1.19$$

1.4.6.2 Méthodes de contrôle au niveau de la turbine

Comme le montrent les expressions des forces précédemment données, celles-ci augmentent rapidement avec le vent apparent et la puissance correspondante peut devenir rapidement supérieure à la puissance nominale de la machine. Il faut donc à un moment donné pouvoir limiter le couple. Le réglage du couple, donc de la puissance captée par la turbine, se fait essentiellement par action sur la portance qui dépend principalement de l'angle d'incidence α . Le réglage de la puissance va donc se faire par action sur α .

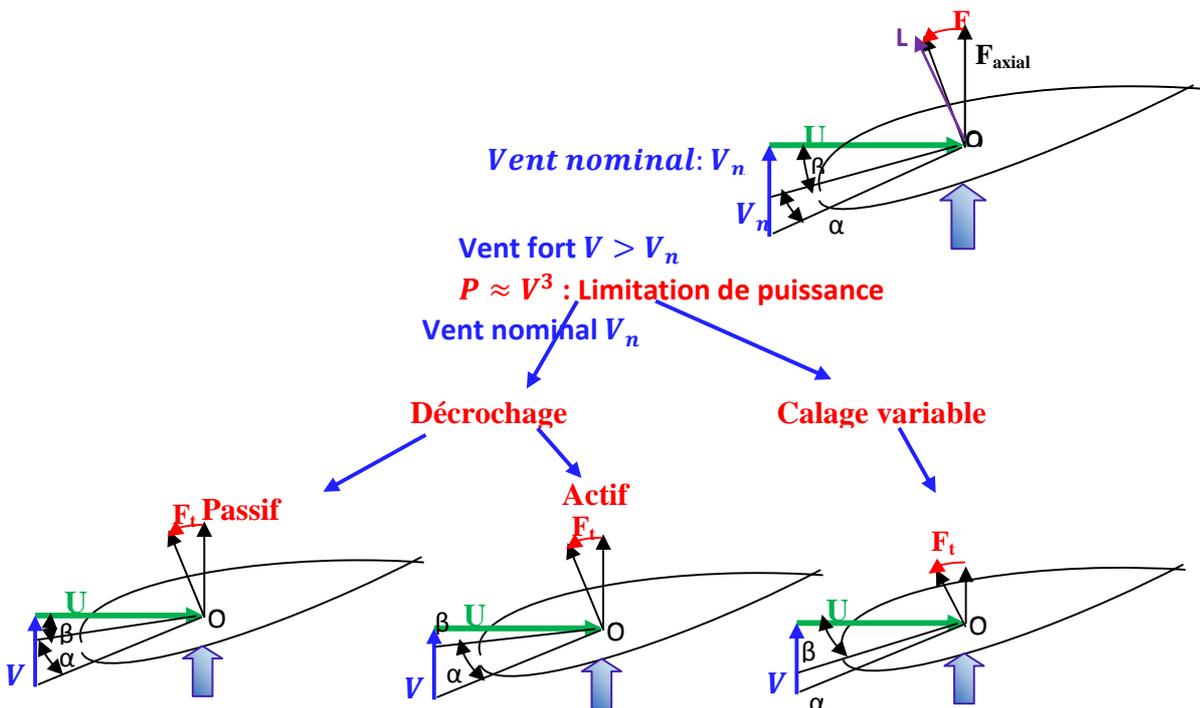


Figure 1.19 : Méthodes de contrôle de la puissance captée par la turbine

Il existe trois méthodes de contrôle qui sont décrites sur la figure 1.19. Elles servent principalement à limiter la puissance captée pour les vents forts mais certaines peuvent également intervenir pour faciliter la mise en rotation de la turbine.

a) Contrôle par décrochage aérodynamique passif (« Passive Stall »)

L'angle de calage β est fixe. L'angle α augmente naturellement avec la vitesse du vent incident v si la vitesse de rotation est pratiquement constante. Cette augmentation provoque une augmentation de la traînée (coefficient C_D) et un décrochage progressif de la pale. Le couple est maintenu à peu près constant ($\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$) jusqu'au décrochage total ($\alpha_3 < \alpha$) (chute brutale de C_L et accroissement important de C_D) où il chute rapidement. La puissance est donc bien limitée.

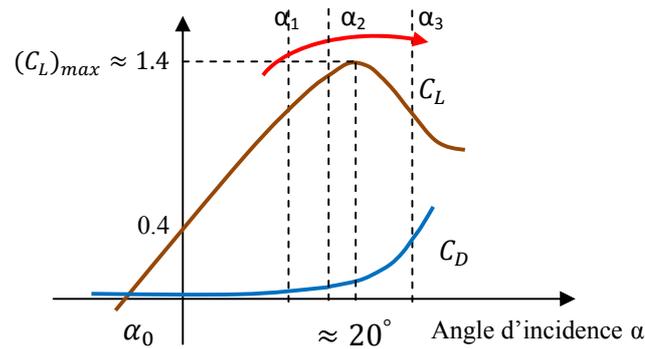


Figure 1.20 : Décrochage aérodynamique passif

Avantages : Ce concept simple et normalement robuste ne fait intervenir aucun système mécanique ou électrique auxiliaire.

Inconvénients : La puissance captée par la turbine est seulement fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. Il n'y a donc aucune possibilité d'adaptation. En cas de défaut sur le réseau, si l'énergie captée ne peut lui être transmise, il est nécessaire de disposer de freins dimensionnés pour absorber l'énergie cinétique de la turbine ainsi que l'énergie captée pendant le freinage, même en cas de problème sur la transmission, ce qui suppose un système de freinage sur l'arbre de la turbine lui-même (couple de freinage très élevé). Généralement, les constructeurs prévoient de pouvoir utiliser les extrémités des pales comme aérofreins en les faisant pivoter de 90° en cas d'urgence. Dans ce cas, le système de freinage mécanique peut être monté derrière le multiplicateur de vitesse ou le couple est plus faible. Un freinage d'urgence peut également être assuré par le générateur à condition de prévoir un circuit électrique résistif de récupération d'énergie connecté (freinage rhéostatique). Par ailleurs, en fonctionnement normal, le générateur doit être capable de freiner la turbine et d'imposer le décrochage alors que la vitesse du vent croît, ce qui peut nécessiter un dimensionnement supérieur à celui correspondant aux conditions nominales.

b) Contrôle par décrochage aérodynamique actif (« Active Stall »)

L'angle α peut être augmenté (ou diminué) légèrement par diminution (ou augmentation) de l'angle de calage β de quelques degrés (3° à 5° généralement). Le décrochage peut être légèrement avancé (ou retardé). Le couple est maintenu pratiquement constant jusqu'au décrochage total où il chute rapidement. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale.

Avantages : Il y a possibilité d'adaptation de la turbine aux conditions d'exploitation. Les actionneurs, électriques ou hydrauliques nécessaires, sont de taille réduite, les mouvements de

rotation des pales restant de faible amplitude. La possibilité de provoquer un décrochage volontairement facilite les conditions de freinage. Le frein mécanique peut être monté derrière le multiplicateur de vitesse ou le couple est plus faible, et il n'est utilisé que comme frein de « parking ».

Inconvénients : L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine. Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite des contacts glissants bagues/charbons sujets à l'usure et nécessitant un entretien.

c) Contrôle par angle de calage variable (« Pitch Control »)

L'angle α peut être diminué (ou augmenté) fortement par augmentation (ou diminution) de l'angle de calage β de quelques dizaines de degrés (20 à 30° généralement). Les forces aérodynamiques s'exerçant sur les pales sont donc ainsi réduites (à la fois pour la portance et pour la traînée). Le couple est maintenu pratiquement constant et peut être annulé par « mise en drapeau » des pales ($\beta = 90^\circ$). La puissance est donc limitée.

Avantages : La diminution de l'angle d'incidence α jusqu'à une valeur nulle ou négative limite toutes les forces aérodynamiques sur les pales, ce qui réduit considérablement les efforts à vitesse de vent élevée. Comme la force de poussée axiale est également diminuée, les efforts sur la tour sont réduits. Cet avantage est encore amplifié à vitesse variable puisque l'excès d'énergie pendant une rafale (dont la variation est trop brutale pour que le mécanisme d'orientation puisse compenser les effets) peut être stocké dans l'inertie du rotor par variation de sa vitesse (si le générateur l'accepte) alors que la puissance transmise reste pratiquement constante. Le frein mécanique n'est alors qu'un frein de « parking ».

Inconvénients : Les actionneurs nécessaires sont de puissance supérieure à celle du cas précédent. L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine. Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite également des contacts glissants bagues/charbons sujets à l'usure et nécessitant un entretien.

$$(C_L)_{max} \approx 1.4 \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1 \quad C_L$$

$$0.4 \quad C_D$$

$$\alpha_0 \approx 20^\circ \quad \text{Angle d'incidence } \alpha$$

Figure 1.21 : Décrochage par contrôle de l'angle de calage β

d) Zones de fonctionnement

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

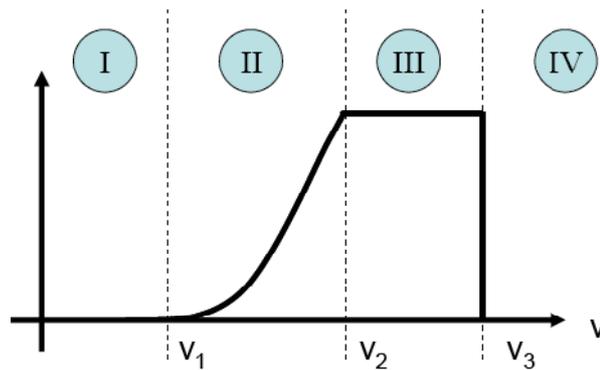


Figure 1.22 : Zones de fonctionnement d'une éolienne

v_1 : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, v_1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

v_2 : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, v_2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

v_3 : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, v_3 vaut 25m/s.

Zone I : $v < v_1$:

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie a capter est trop faible.

Zone II : $v_1 < v < v_2$:

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle (C_p).

Zone III : $v_2 < v < v_3$:

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de $(P)_n$. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge (P_C).

Zone IV : $v > v_3$:

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

1.4 La conversion électromécanique

La technologie des aérogénérateurs s'est diversifiée en même temps qu'elle progressait. Ainsi de nos jours il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [15][17]. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure.

Il y'a quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe [18].

Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil. C'est en grande partie les progrès technologiques réalisés sur les composants d'électrotechnique de puissance et la réduction des prix correspondants qui ont rendu leur utilisation dans les nouveaux aérogénérateurs possible. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique, ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système. La variation de vitesse permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

1.5.1 Systèmes à vitesse fixe**1.5.1.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil**

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde [16]. Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses.

Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé (environ 85%)[15] consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau électrique. Pour limiter le fort appel de courant dû à la magnétisation brutale au moment du couplage, un convertisseur statique, type gradateur, est mis en œuvre pour permettre un établissement progressif de la tension aux bornes de la machine [19]. Il est par la suite court-circuité. La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure 1.23 [17] qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [16]. Mais, au delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients [15].

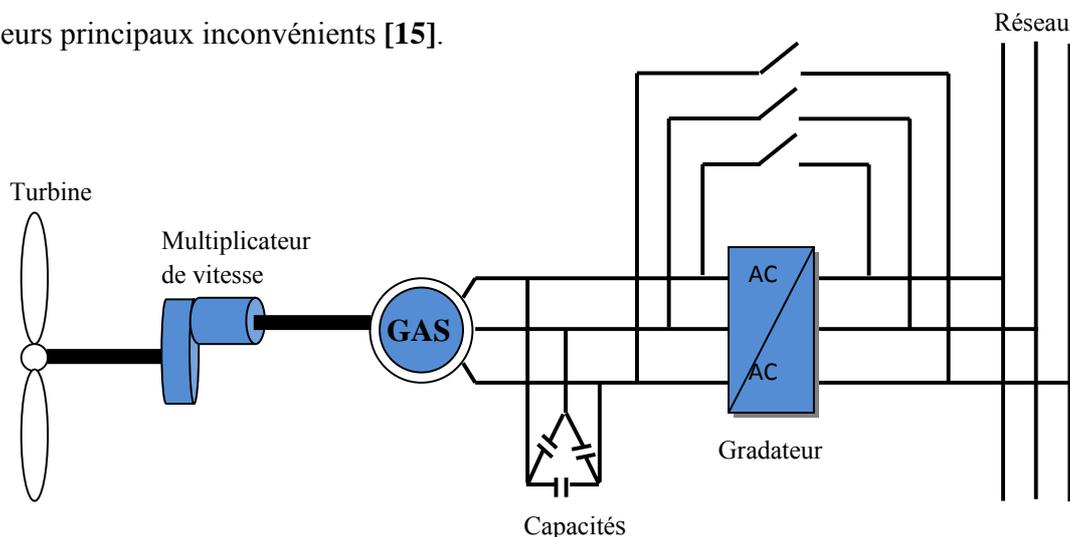


Figure 1.23 : Génératrice asynchrone GAS à cage (souvent à deux enroulements statoriques 4 et 6 pôles) avec multiplicateur et connexion directe au réseau [19].

Les caractéristiques de cette solution:

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
- Machine standard	- Puissance extraite non optimisée
- Robuste	- Maintenance de boîte de vitesse
- Faible cout	- Pas de gestion de l'énergie réactive par le générateur
- Pas d'EP pour l'interface	- Magnétisme de la machine non gérée

Tableau 1.1 : *Avantages et inconvénients de la structure MAS***1.5.2 Systèmes à vitesse variable**

Des systèmes éoliens à vitesse de rotation variable vont permettre d'optimiser les conditions de fonctionnement de la turbine. Différentes structures sont proposées :

1.5.2.1 Variation de +10% au-delà de la vitesse de synchronisme – Machine asynchrone –**Contrôle de la résistance rotorique : *structure MASRe***

Ce procédé est bien connu lorsqu'il s'agit de démarrer des moteurs à pleine charge. Dans ce cas-la, le rotor de la machine asynchrone n'est plus court-circuité. L'enroulement rotorique est triphasé et bobiné. Une résistance « contrôlée » à travers une interface d'électronique de puissance est « embarquée » sur le rotor de la machine. Le contrôle de cette interface permet d'obtenir une résistance rotorique variable. Ceci permet une variation de vitesse de l'ordre de 10% au-delà de la vitesse de synchronisme ω_{sync} , augmentant sensiblement l'énergie captée et réduisant l'influence des oscillations de puissances dues aux fluctuations du vent et permet de maintenir un couple élevé aux forts glissements sans accroître le courant statorique [17].

Cette solution n'apporte que très peu d'évolutions par rapport à la structure MAS. Elle conserve les mêmes inconvénients. On peut néanmoins la considérer comme le précurseur des technologies à vitesse variable modernes. Cette structure est proposée uniquement par le constructeur danois VESTAS (système *Optislip*) [19].

Pour ce qui est de la connexion au réseau de ce type de machines, elle est identique à celle du système à vitesse de rotation fixe et génératrice asynchrone à cage.

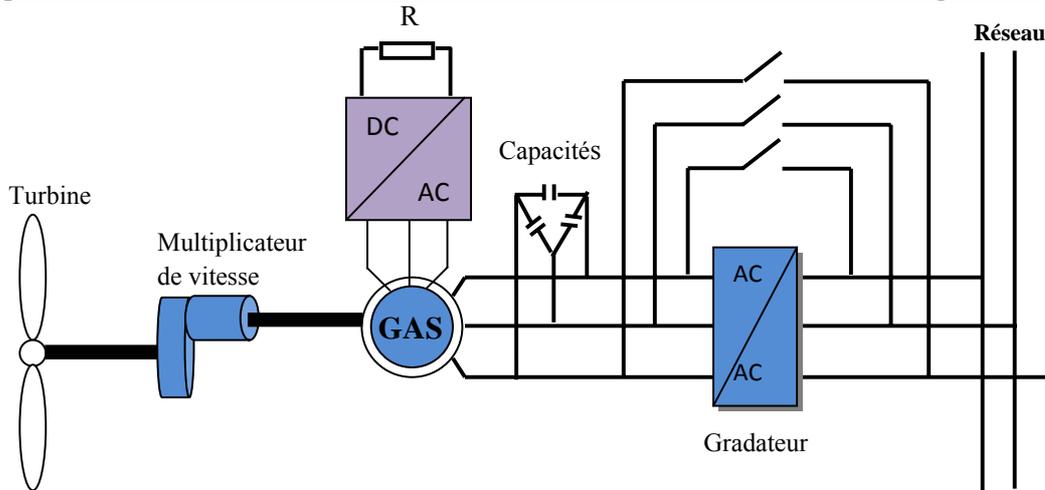


Figure 1.24 : Génératrice asynchrone GAS à bague directement connectée au réseau et contrôle électronique du glissement [19].

Les caractéristiques de cette solution

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
- Fonctionnement à vitesse variable (+10% ω_{syn})	- Puissance extraite non optimisée
- Robuste	- Maintenance de boîte de vitesse
- EP faiblement dimensionnée	- Pas de gestion de l'énergie réactive par le générateur
	- Magnétisme de la machine non gérée
	- Pertes supplémentaires

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients de la structure MASRe.

1.5.2.2 Variation de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme – Machine asynchrone à double alimentation : structure MADA

Avec les génératrices synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable [15]. Dans ce cas-la, le stator de la génératrice identique à celui de la génératrice asynchrone à cage est directement couplé au réseau alors que l'enroulement rotorique triphasé bobiné avec bagues collectrices y est connecté par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance qui assure la variation du glissement [15]. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Les vitesses de rotation nominales de ces machines sont d'habitude un peu moins

élevées par rapport aux machines à cage d'écureuil alors le rapport de multiplicateur de vitesses peut être moins important [15].

Pour la grande majorité des éoliennes proposées sur le marché, cette interface est constituée de deux onduleurs de tension à interrupteurs commandables à la fermeture et à l'ouverture (en général ce sont des IGBT) fonctionnant indifféremment en mode redresseur ou onduleur [19].

Le dimensionnement de la chaîne rotor se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse [15][19]; c'est là son principal avantage. Cette structure est actuellement en fort développement chez plusieurs constructeurs d'éoliennes parmi ceux présents sur le marché. Ils l'ont généralement retenue pour leurs modèles haut de gamme et grande puissance (NORDEX, VESTAS....) [15][17] [19]. Malgré la nécessité d'une maintenance accrue (**balais-bagues**) et le **surcoût** de la machine à rotor bobiné, le gain sur le prix du convertisseur est suffisamment significatif pour assurer la compétitivité de cet ensemble et pour le voir occuper une très large part du marché actuel [17].

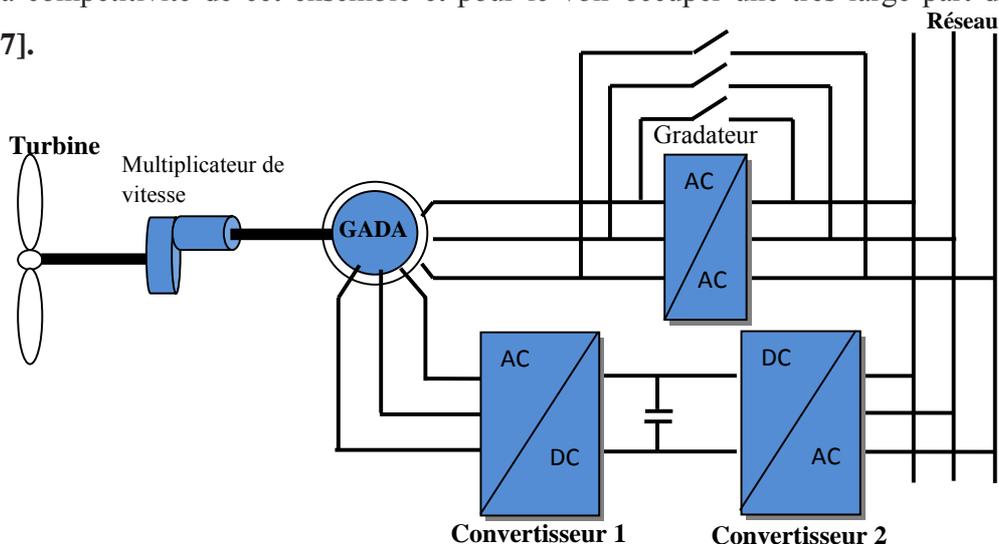


Figure 1.25 : Génératrice asynchrone GAS avec multiplicateur à variation de vitesse par le rotor.

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de la machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Avec une électronique de puissance de taille réduite et une commande appropriée, on obtient une qualité de tension similaire à celle de la machine asynchrone classique.

Les convertisseurs d'électronique de puissance offrent des possibilités de contrôle extrêmement utiles au pilotage de l'ensemble : contrôle de la qualité des courants et des puissances active et réactive injectés au réseau, meilleur suivi de trajectoires des courants,

maitrise fine et rapide des points de fonctionnement. La commande de l'onduleur coté rotor permet le contrôle de la puissance convertie. Il s'agit en fait de contrôler le couple du générateur afin d'obtenir la vitesse de rotation souhaitée

Les caractéristiques de cette solution

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\% \omega_{syn}$)	Prix de l'électronique de puissance relatif
Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens	Maintenance de boîte de vitesse
EP dimensionnée à 30% de $(P)_n$	Contrôle-commande complexe
Machine standard	maintenance (balais-bagues)
Connexion de la machine plus facile à gérer	

Tableau 1.4 : *Avantages/inconvénients de la structure MADA*

1.5.2.3 Variation de 0 à 100% de la vitesse nominale de rotation – Machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants : structure MS

Ce type de machine qui est utilisé dans la plus part des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, creux de 500kW à 2MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [18].

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur –réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (figure 1.26) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de passer du multiplicateurs, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [15].

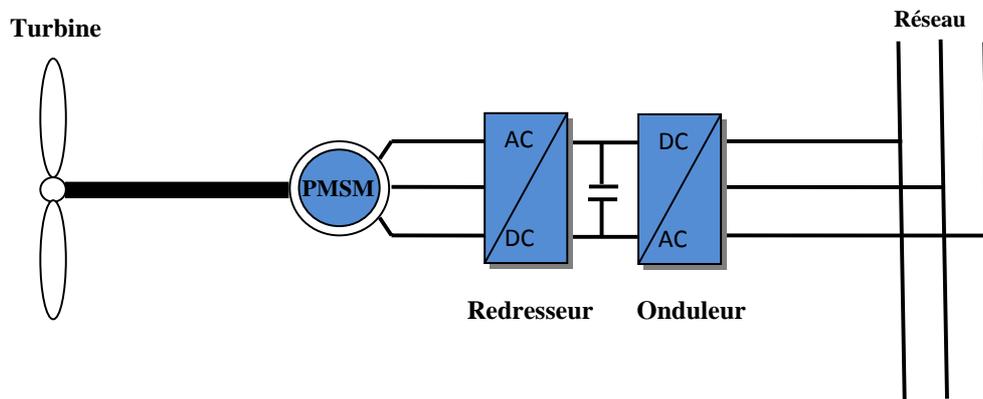


Figure 1.26: génératrice synchrone GS à attaque directe à excitation bobinée sans balai ou à aimants.

Les caractéristiques de cette solution

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse	Prix de l'EP et de la machine
Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens	Machine spécifique
Connexion de la machine plus facile à gérer	Grand diamètre de la machine
Absence de boîte de vitesse	EP dimensionnée au moins à 100% de $(P)_n$

Tableau 1.5 : Avantages/inconvénients de la structure MS.

1.6 Conclusion

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne

comme ainsi que des exemples d'architectures des génératrices utilisées dans ce domaine ont été données, etc. Dans la suite de ce travail nous nous intéresserons de près à l'énergie éolienne produite par un générateur à double alimentation. La turbine utilisée est une turbine à axe horizontal

Chapitre 2

*Modélisation d'un système éolien (turbine,
Machine Asynchrone à Double Alimentation)*

2.1 Introduction

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1MW reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Étant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle cette génératrice est très utilisée pour la production électrique en forte puissance.

2.2 Principe de la double alimentation par le stator et le rotor

Le système considéré est un aérogénérateur qui se compose d'une éolienne à axe horizontal à rotation rapide à trois pales ; qui entraîne via un multiplicateur de vitesse, une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ayant un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou une machine synchrone ; c'est le rotor qui diffère car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques. [6][7][11][42][43][45][46].

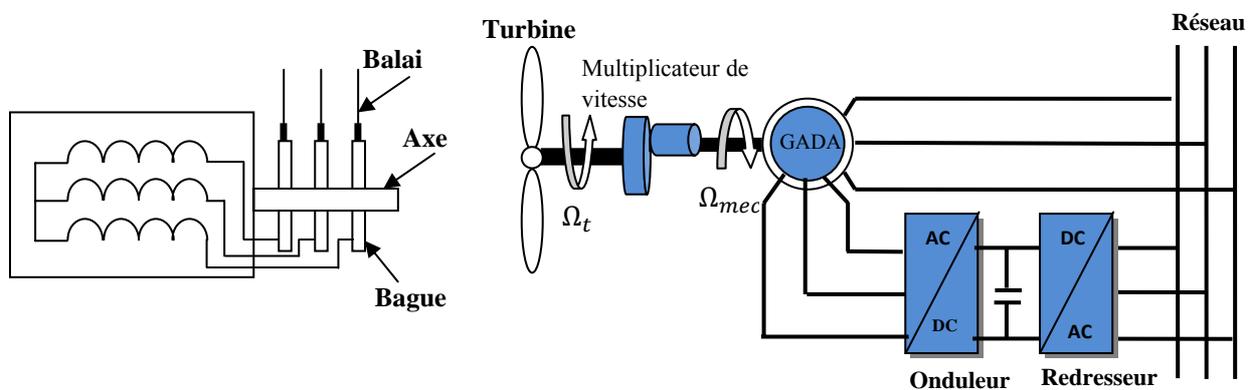


Figure 2.1.a): Principe du rotor bobiné

Figure 2.1.b): Aérogénérateur avec machine asynchrone à double alimentation

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste, gP sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure 2.1.a). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. [42]

2.3 Modélisation de la vitesse du vent

Pour effectuer les différentes simulations de notre système, nous avons besoin d'avoir un profil de vent reflétant au maximum la réalité de ce que l'on peut trouver sur un site éolien. La vitesse du vent sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme [3][6]:

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (2.1)$$

2.4 Modélisation de la turbine

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 1.5MW pour notre simulateur. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 33 m et le rapport du multiplicateur de vitesse K qui permet à la fois de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation. L'évolution du coefficient de puissance C_p est une donnée spécifique à chaque éolienne.

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin\left[\frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad [42] \quad (2.2)$$

Dans notre cas la caractéristique du C_p est représentée en fonction de λ dans la figure 2.2 pour un $\beta_{opt} = 0^\circ$, cette valeur de β nous permet d'avoir un $C_p = C_{pmax}$:

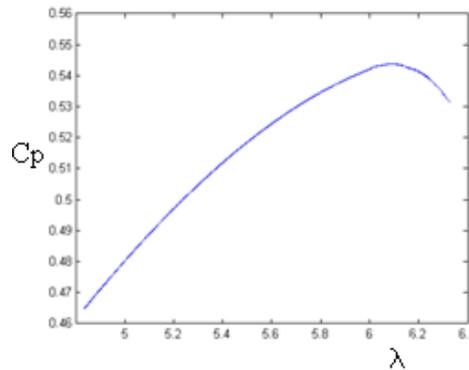


Figure 2.2 : La caractéristique du C_p de la turbine

Connaissant les caractéristiques de l'éolienne et le coefficient de puissance, la puissance mécanique disponible sur l'arbre de transmission peut être calculée selon la relation:

$$P_{méc} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 \quad [6][7][41][42][43][45] \quad 2.3$$

Où ρ est la densité de l'air égale à $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$ [6]. Le couple C_t produit par cette éolienne est alors:

$$C_t = \frac{P_{méc}}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2\Omega_{turbine}} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 \quad 2.4$$

En introduisant le terme $C_T(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}$ [6][7][47] appelé coefficient de couple, on obtient la relation suivante [6][7][47]:

$$C_t = \frac{1}{2} \cdot C_T(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 \quad 2.5$$

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{\text{turbine}}}{V_v} \quad [6][7][41][42] \quad 2.6$$

2.4.1 Dispositif d'entraînement

Le dispositif d'entraînement est destiné à transformer la vitesse de rotation lente côté rotor en une vitesse de rotation rapide côté générateur, ceci permet d'utiliser des générateurs de taille compacte. Ainsi, nous pouvons lui associer soit un modèle à deux masses ou un modèle à une masse uniquement.

a) Modèle à deux masses

Le modèle à deux masses associé au dispositif d'entraînement est très employé dans la littérature [15][17][51]. Son schéma de principe est illustré sur la figure 2.3 :

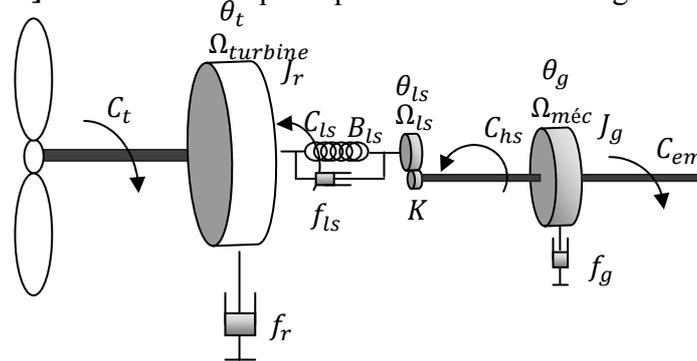


Figure 2.3 : Modèle de transmission mécanique à deux masses.

Liste des symboles	Unité
J_r : inertie des masses du côté rotor	[kg.m ²]
J_g : inertie des masses du côté de la génératrice	[kg.m ²]
f_{ls} : coefficient de frottements sur l'arbre lent	[Nm/rad/s]
f_r : coefficient de frottements externes du rotor	[Nm/rad/s]
f_g : coefficient de frottements externes de la génératrice	[Nm/rad/s]
B_{ls} : coefficient de torsion sur l'arbre lent	[Nm/rad]
C_{ls} : couple de l'arbre lent	[Nm]
C_{hs} : couple de l'arbre rapide	[Nm]
C_{em} : couple électromagnétique de la génératrice	[Nm]
Ω_{turbine} : vitesse de rotation du rotor	[rad/s]
Ω_{ls} : vitesse de rotation de l'arbre lent	[rad/s]
$\Omega_{méc}$: vitesse de rotation de la génératrice	[rad/s]
K : rapport de transmission du multiplicateur	

Tableau 2.1: Paramètres et variables utilisés pour représenter la transmission à deux masses.

Les hypothèses émises pour ce modèle sont [5][15]:

- Tous les modes flexibles sont localisés dans l'élément flexible de l'arbre lent,
- L'arbre rapide est infiniment rigide,
- Les modes flexibles des pales sont supposés suffisamment élevés pour être négligés.
- Les inerties du multiplicateur et de l'arbre lent sont négligées à celle du rotor. L'ensemble est représenté par J_r .

Par sa taille immense, le rotor peut être modélisé par une seule masse. En effet, l'inertie de la turbine est sensiblement égale à celle des pales et celle du moyeu peut être négligée car elle présente 1% de l'inertie totale de la turbine [5][15].

L'inertie de l'arbre rapide associé à la génératrice est représentée par J_g . Les torsions des pales, moyeu, multiplicateur et de l'arbre lent sont regroupées dans un coefficient d'élasticité global représenté au niveau de l'arbre lent, B_{ls} [15]. La torsion de l'axe de la turbine, en termes de constante de raideur, peut être calculée analytiquement, connaissant sa forme géométrique et les propriétés des matériaux la constituant, grâce aux lois de la résistance des matériaux. Les frottements visqueux sur les roulements du dispositif d'entraînement sont pris en compte par les coefficients f_r, f_g .

La majorité des auteurs considèrent un arbre lent flexible et un arbre rapide parfaitement rigide, cependant, on peut dans tous les cas ramener les coefficients de frottement et d'élasticité sur un seul arbre [15].

La dynamique du rotor est caractérisée par une équation différentielle du premier ordre.

$$J_r \frac{d\Omega_{turbine}}{dt} = C_t - C_{ls} - K_r \Omega_{turbine} \quad 2.7$$

Le couple de l'arbre lent C_{ls} résulte des effets de frottements et de torsion générés par les écarts entre la vitesse angulaire du rotor Ω_t et celle de l'arbre lent Ω_{ls} d'une part et entre la position angulaire θ_r et celle de l'arbre lent θ_{ls} d'autre part.

$$C_{ls} = B_{ls}(\theta_t - \theta_{ls}) + K_{ls}(\Omega_t - \Omega_{ls}) \quad 2.8$$

Le couple et la vitesse de cet arbre sont transmis via le multiplicateur de vitesse de rapport K pour produire un couple sur l'arbre rapide,

$$C_{hs} = \frac{C_{ls}}{K} \quad 2.9$$

Car la vitesse et la position angulaire du générateur sont :

$$\theta_g = K\theta_{ls} \quad 2.10$$

$$\Omega_{méc} = K\Omega_{ls} \quad 2.11$$

En pratique, le multiplicateur induit des pertes (de l'ordre de 0.5% de la puissance nominale [15][16]). Dans le cas où ces pertes sont prises en compte, le couple de l'arbre rapide fait apparaître le rendement du multiplicateur η dans l'équation(2.9)

$$C_{hs} = \eta \frac{C_{ls}}{K} \quad 2.12$$

Pour un multiplicateur considéré idéal, on a donc :

$$K = \frac{C_{ls}}{C_{hs}} = \frac{\Omega_{méc}}{\Omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \quad 2.13$$

Le générateur est entraîné par le couple de l'arbre rapide C_{hs} et freiné par le couple électromagnétique C_{em} et les frottements visqueux. Sa dynamique est :

$$J_g \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{hs} - C_{em} - K_g \Omega_{méc} \quad 2.14$$

b) Modèle à une masse

Dans le cas des grandes éoliennes, l'arbre lent du dispositif d'entraînement peut être considéré comme parfaitement rigide. Le modèle à deux masses décrit au paragraphe précédent peut alors se ramener à un modèle à une masse, constitué d'une seule inertie et un seul coefficient de frottement, regroupant tous les coefficients de frottement externes moyennant certaines hypothèses [5][15]:

- Les arbres de transmission sont parfaitement rigides,
- Le multiplicateur de vitesse est idéal,
- L'inertie de la génératrice J_g peut être négligée devant celle de la turbine J_r ou ramenée du côté de l'arbre lent.

En effet, l'inertie du multiplicateur et celle de la génératrice peuvent être, en première approximation, négligées devant celle du rotor. Elles représentent en moyenne entre 5% et 10% de l'inertie de la turbine [15].

▪ Modèle à une masse ramené sur l'arbre lent

Dans la plupart des modèles à une masse, l'inertie de la turbine est ramenée sur l'arbre lent [15][17][20].

En considérant que l'arbre lent est infiniment rigide (ce qui conduit à : B_{ls} infini), alors

$$\theta_t = \theta_{ls} \quad \text{et} \quad \Omega_{turbine} = \Omega_{ls}$$

La relation(2.13) s'écrit maintenant :

$$K = \frac{C_{ls}}{C_{hs}} = \frac{\Omega_{méc}}{\Omega_{turbine}} = \frac{\theta_g}{\theta_t} \quad 2.15$$

Les équations (2.7)(2.14) deviennent alors :

$$J_r \frac{d\Omega_{turbine}}{dt} = C_t - K C_{ls} - f_r \Omega_{turbine} \quad 2.16$$

$$K J_g \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{hs} - C_{em} - K f_g \Omega_{méc} \quad 2.17$$

En multipliant l'équation (2.17) par K et en sommant membre à membre les deux équations(2.16) et (2.17), nous obtiendrons :

$$J_t \frac{d\Omega_{turbine}}{dt} = C_t - C_g - f_t \Omega_{turbine} \quad 2.18$$

Avec :

$$J_t = J_r + K^2 J_g \quad 2.19$$

$$f_t = f_r + K^2 f_g \quad 2.20$$

$$C_g = K C_{em} \quad 2.21$$

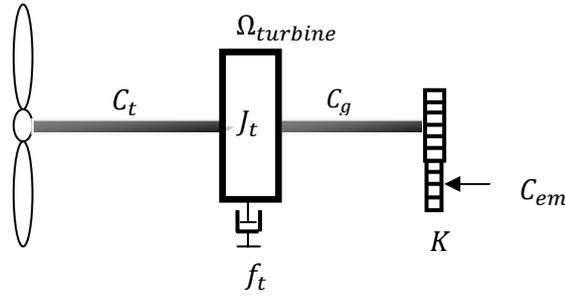


Figure 2.4 : Modèle de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre lent.

Où : J_t , f_t et C_g sont respectivement l'inertie, le coefficient de frottement externes de la turbine et le couple électromagnétique de la génératrice ramenés du côté de l'arbre lent. L'inertie de la génératrice ramenée sur l'arbre lent $K^2 J_g$ est très souvent négligée devant celle du rotor. Ce modèle est généralement utilisé dans la commande de l'aéroturbine.

▪ Modèle à une masse ramené sur l'arbre rapide

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale constituée de celle de la génératrice et de la turbine rapportées sur l'arbre rapide (arbre de la génératrice), comme représenté sur la figure 2.5.

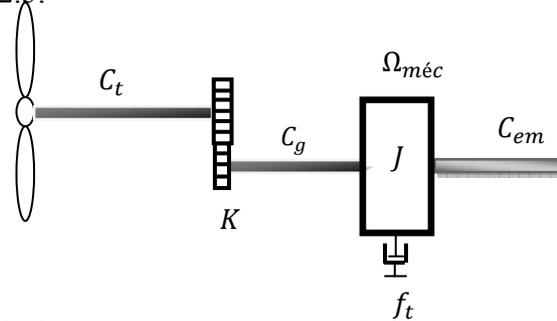


Figure 2.5 : Modèle de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre rapide.

Lorsque le modèle à une masse est ramené sur l'arbre rapide alors, en utilisant les mêmes hypothèses que précédemment, les équations(2.7) et (2.14) s'écrivent :

$$\frac{J_r}{K} \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_t - C_{ls} - \frac{f_r}{K} \Omega_{méc} \quad 2.22$$

$$J_g \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{hs} - C_{em} - f_g \Omega_{méc} \quad 2.23$$

En divisant l'équation (2.22) par K et en additionnant membre à membre l'équation (2.22) et (2.23) on obtient :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C - C_{em} - f \Omega_{méc} \quad 2.24$$

Avec :

$$J = J_g + \frac{J_r}{K^2} \quad 2.25$$

$$f = f_g + \frac{f_r}{K^2} \quad 2.26$$

$$C = \frac{C_t}{K} \quad 2.27$$

J , f et C sont l'inertie, le coefficient de frottements externes de la turbine et le couple aérodynamique ramenés du côté de l'arbre rapide. L'inertie de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine.

Le modèle à une masse ramené sur l'arbre rapide est généralement utilisé dans la commande de la génératrice.

A partir des équations (2.4), (2.6), (2.24), on établit un schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine, représenté sur la figure 2.6. [6][7][11][42][43][44].

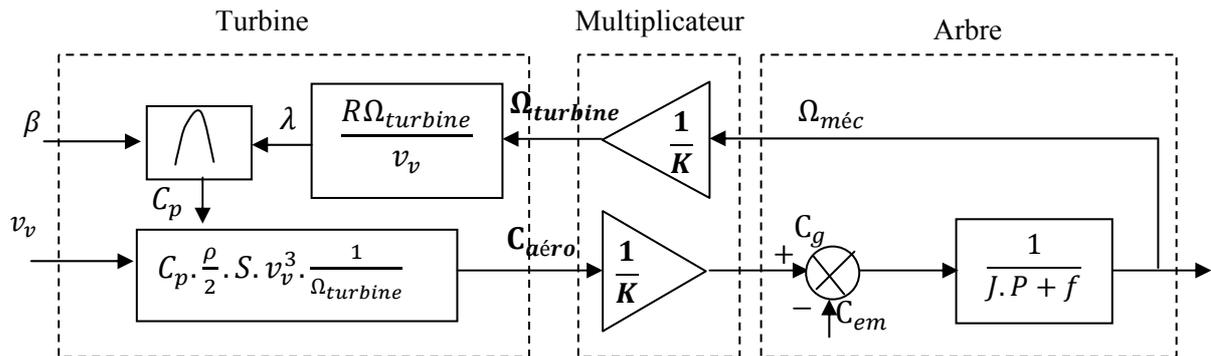


Figure 2.6: Schéma bloc de la turbine.

β : Angle de calage des pales.

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice pour ce système.

2.5 Stratégies de commande de la turbine éolienne

La vitesse du vent est variable dans le temps, pour garantir un captage maximal de l'énergie éolienne incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent et l'angle d'incidence des pales (expliqué en paragraphe 1.2.6.2).

2.5.1 Techniques d'extraction du maximum de la puissance

A partir de la vitesse du vent mesurée, on détermine la vitesse mécanique optimale de la turbine (correspondent à λ_{opt}) (voir figure 2.2), en multipliant cette dernière par la valeur du gain on obtient la vitesse mécanique du rotor de la MADA, qui est utilisée comme grandeur de référence pour un régulateur, ce dernier élabore une consigne de commande, convenant au couple électromagnétique que devrait développer la machine pour passer à la vitesse optimale.

Le couple issu de l'asservissement de vitesse, sera utilisé comme grandeur de référence du couple électromagnétique (C_{em}) dans la structure du modèle de la turbine représentée par la figure 2.6. L'ensemble est représenté par la figure 2.7. [6][7][11][42][43][44].

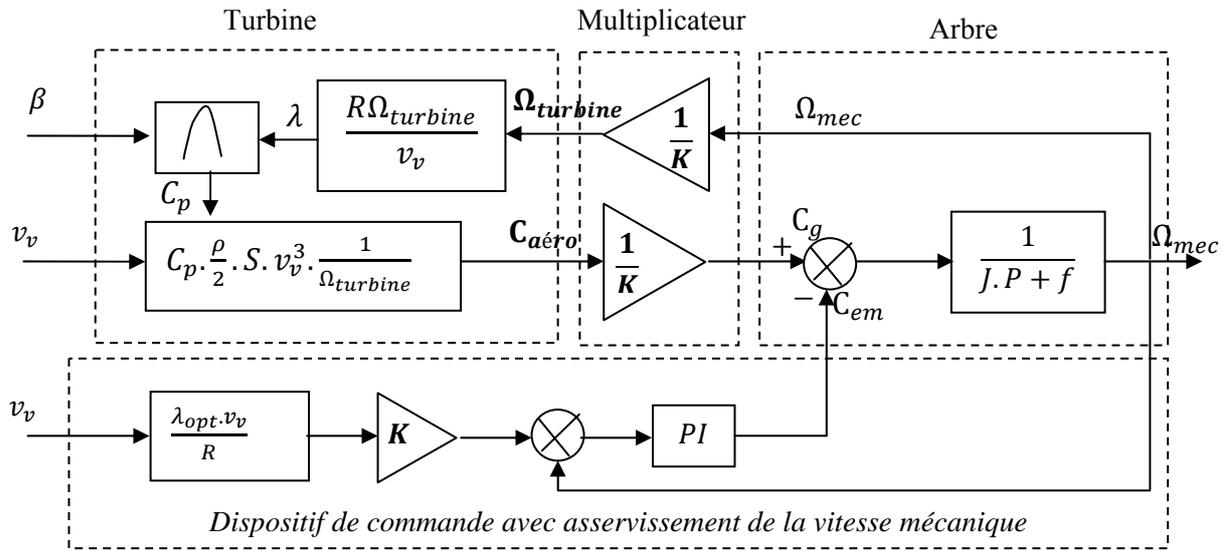


Figure 2.7 : Schéma bloc avec asservissement de la vitesse mécanique.

2.6 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral pour le contrôle de la vitesse

$$C_{em_réf} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) (\Omega_{réf} - \Omega_{mec}) \quad 2.28$$

K_p : gain proportionnel et K_i : gain intégral, sont les paramètres du correcteur à déterminer.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par (l'équation):

$$\Omega_{mec} = F(p)\Omega_{réf} - G(p)C_g \quad 2.29$$

$$F(p) = \frac{K_p p + K_i}{Jp^2 + (f + K_p)p + K_i} \quad 2.30$$

$$G(p) = \frac{p}{Jp^2 + (f + K_p)p + K_i} \quad 2.31$$

Il est donc nécessaire d'augmenter le paramètre K_i pour atténuer l'action du couple éolien C_g . La pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont déterminés par :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \text{ et } \xi = \frac{f + J + K_p}{K_i} \cdot \frac{\omega_n}{2} \quad 2.32$$

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

$$K_i = \omega^2 J \text{ et } K_p = \frac{2K_i \xi}{\omega_n} - f - J \quad 2.33$$

Le paramètre K_p est calculé de manière à obtenir un coefficient d'amortissement unitaire. Un temps de réponse en boucle fermée de 0.1s. [6][7].

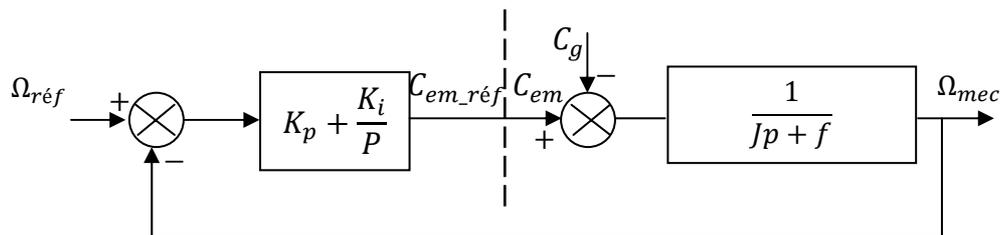


Figure 2.8 : Schéma bloc du correcteur PI

Les résultats de la simulation du modèle sous MATLAB SIMULINK sont donnés dans les figures suivantes :

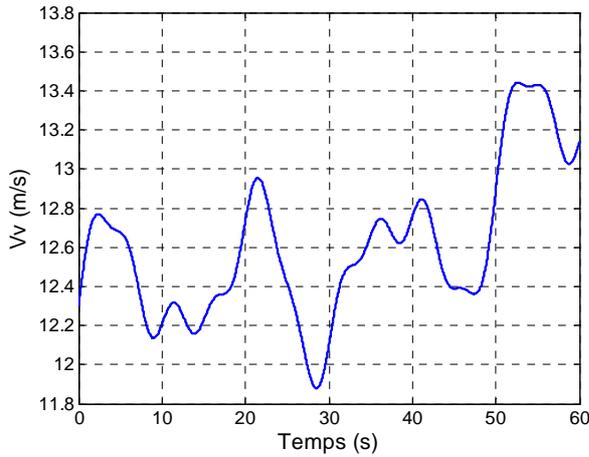


Figure 2.9 a : Allure du vent V_v (m/s)

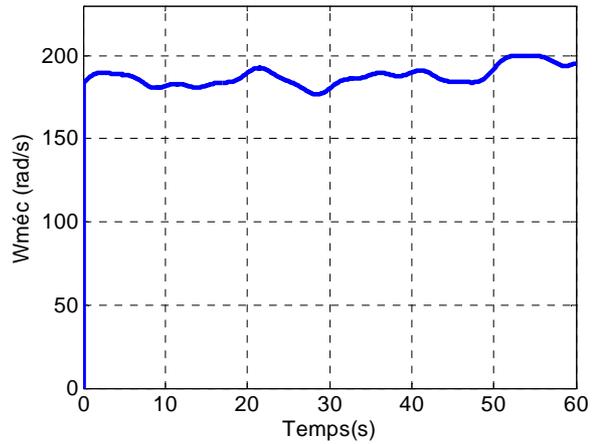


Figure 2.9 b : Vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice

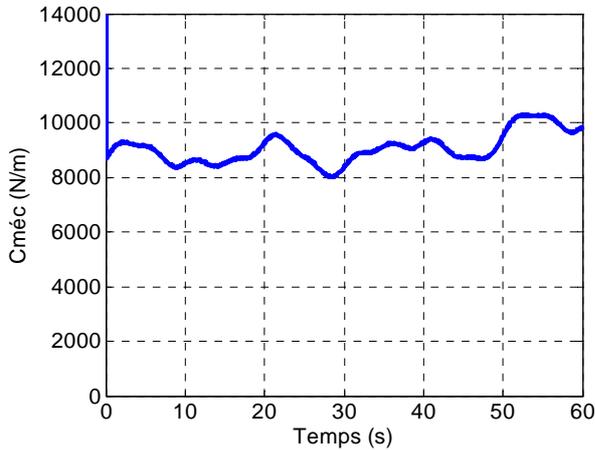


Figure 2.9 c : Couple mécanique transmis à l'arbre de la génératrice.

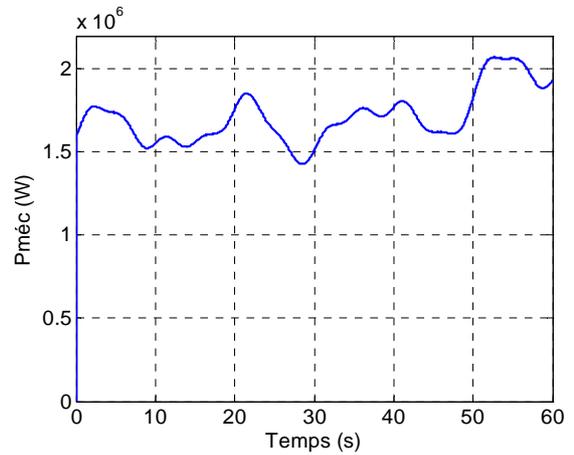


Figure 2.9 d : Puissance mécanique disponible sur l'arbre de transmission.

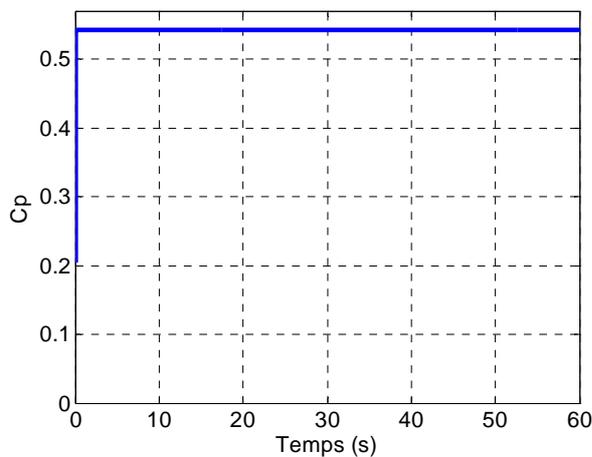


Figure 2.9 e : Allure du C_p en fonction du temps

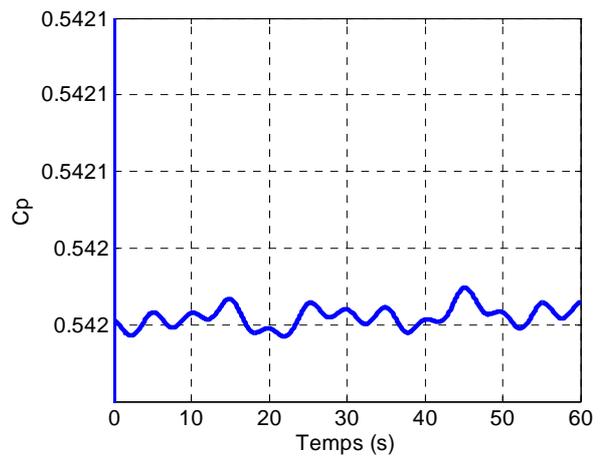


Figure 2.9 f : Zoom allure du C_p en fonction du temps

Figure 2.9 : Allure des différentes grandeurs mécanique de la turbine simulée.

2.7 Mode de fonctionnement de la MADA

2.7.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

Dans ce cas la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjecté dans de réseau. On a donc un fonctionnement moteur au dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique peut fonctionner en ce mode mais la puissance de glissement est dissipée en pertes Joules dans le rotor.

2.7.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

Dans ce cas la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas assurer ce mode de fonctionnement.

2.7.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

Dans ce cas la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur au dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique ne peut pas assurer ce mode de fonctionnement.

2.7.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

Dans ce cas la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être injectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone classique peut assurer ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joules dans le rotor.

Remarque : on peut donc constater que la MADA a deux principaux avantages sur la machine asynchrone classique : la production de puissance ce fait quelle que soit sa vitesse de rotation (*hypo* ou *hyper* synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement est possible en hyper synchrone.

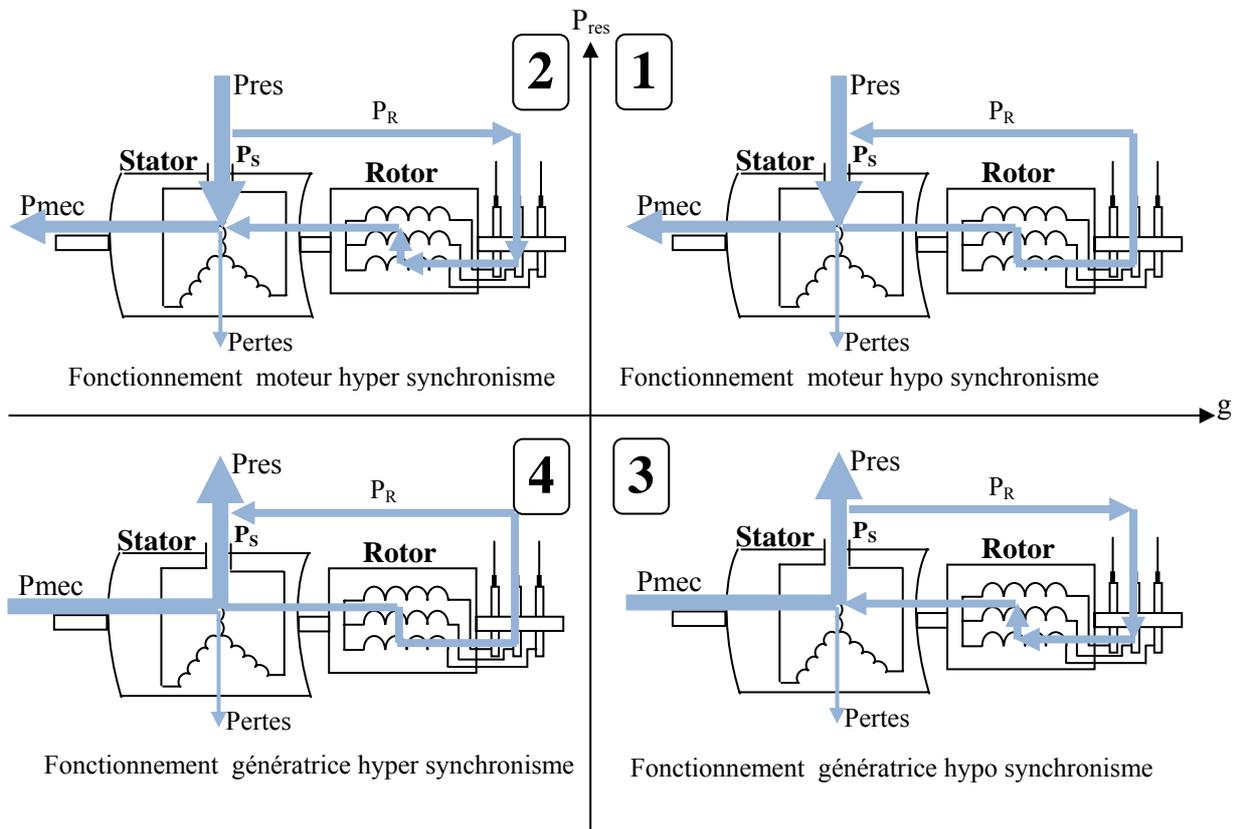


Figure 2.10: Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.

2.8 Modélisation de la machine à double alimentation (MADA) et sa commande

2.8.1 Equations de tension en grandeurs de phase [14] [6][7][11][42][43].

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement sur la figure ci-dessous et dont les phases sont repérées respectivement par les repères ((a, b, c) et (A, B, C)). L'angle électrique θ variable en fonction du temps, définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases a et A choisis comme axes de référence.

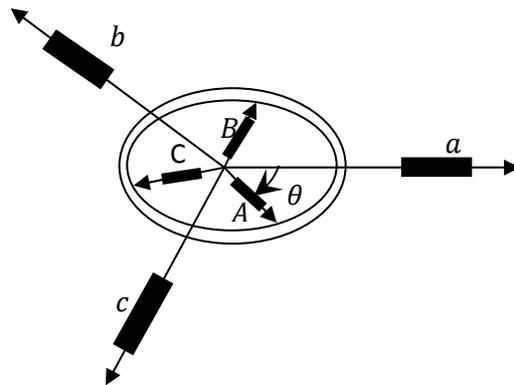


Figure 2.11: Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

Sous forme matricielle, on a :

$$[V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\psi_{abc}] \quad 2.33$$

$$[V_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\psi_{ABC}] \quad 2.34$$

R_s, R_r Désignent respectivement les résistances par phase du stator et du rotor.

Les matrices suivantes représentent respectivement :

- $[V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$ le vecteur de tension statorique ;
- $[\psi_{abc}] = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$ le vecteur de flux statorique ;
- $[i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$ le vecteur de courant statorique.

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques $[V_{ABC}]$, $[\psi_{ABC}]$, $[i_{ABC}]$.

Les flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$[\psi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{ABC}] \quad 2.35$$

$$[\psi_{ABC}] = [L_r][i_{ABC}] + [L_{rs}][i_{abc}] \quad 2.36$$

$[L_s]$, $[L_r]$: représentent respectivement les matrices d'inductances statoriques et rotoriques,

$[L_{sr}]$: correspond à la matrice des inductances mutuelles stator-rotor.

$[L_{rs}]$: correspond à la matrice des inductances mutuelles rotor- stator.

La machines est définie par 5 inductances :

- L'inductance propre d'une phase statorique L_{aa} ;
- L'inductance propre d'une phase rotorique L_{AA} ;
- L'inductance mutuelle entre phases statorique L_{ab} ;
- L'inductance mutuelle entre phases rotorique L_{AB} ;
- L'inductance mutuelle entre phases statorique et rotorique $L_{aA}(\theta)$.

De fait de l'isotropie du circuit magnétique, seule $L_{aA}(\theta)$ est fonction de θ . On a :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix} ; \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix}$$

$$[L_{sr}] = [L_{aA}] \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix} = [L_{aA}][C]$$

$$[L_{rs}] = [L_{sr}]^t$$

En utilisant les équations 2.35 et 2.36 dans 2.33 et 2.34, on obtient :

$$[V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{abc}] + \frac{d}{dt} \{ [L_{sr}] [i_{ABC}] \} \quad 2.37$$

$$[V_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rs}] [i_{abc}] \} \quad 2.38$$

2.8.2 Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $P(\theta)$ permet de ramener les variables du repère triphasé naturel (a, b, c) sur les axes d'un repère fictif diphasé tournant (d, q, o) .

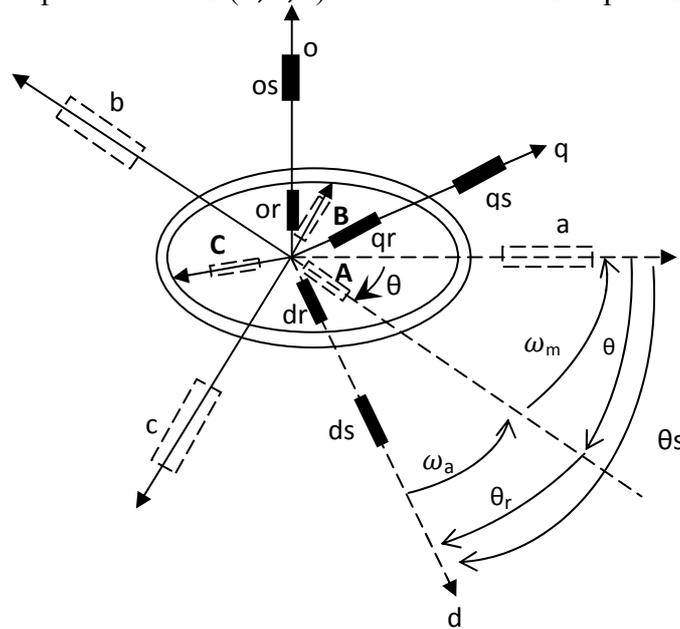


Figure 2.12 : Transformation des enroulements réels en enroulements équivalents.

- θ l'angle entre a et A
- θ_s l'angle entre a et d
- θ_r l'angle entre A et d

ω_a Désigne la vitesse angulaire électrique du système d'axes d, q, o et ω_m celle du rotor.

Hypothèses simplificatrices

Lors de la modélisation de la MADA, on a supposé que :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé ;
- Les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale ;
- Les résistances ne varient pas avec la température ;
- Entre fer constant ;
- L'influence de l'effet de peau n'est pas prise en compte.

De ce fait tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles ne dépendent que de la position des enroulements.

2.8.2.1 Transformation des grandeurs statoriques et rotoriques

Dans la théorie de Park, on utilise la transformation unique pour les courants, tensions et flux :

$$P(\theta_s) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta_s) & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad 2.39$$

La transformation des grandeurs statoriques est définie par :

$$[i_{dqo}]_s = [P(\theta)_s][i_{abc}] \quad 2.40$$

$$[V_{dqo}]_s = [P(\theta)_s][V_{abc}] \quad 2.41$$

$$[\psi_{dqo}]_s = [P(\theta)_s][\psi_{abc}] \quad 2.42$$

$$[i_{abc}] = [P(\theta)_s]^{-1}[i_{dqo}]_s \quad 2.43$$

$$[V_{abc}] = [P(\theta)_s]^{-1}[V_{dqo}]_s \quad 2.44$$

$$[\psi_{abc}] = [P(\theta)_s]^{-1}[\psi_{dqo}]_s \quad 2.45$$

Avec :

$$[P(\theta_s)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad 2.46$$

Les transformations des grandeurs rotoriques s'obtient en remplaçant l'indice s par r et abc par ABC .

➤ Equations de tension

En grandeurs de phase, on a :

$$[V_{abc}] = R_s[i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\psi_{abc}] \quad 2.47$$

En multipliant les deux membres par $[P(\theta_s)]$, il vient :

$$[P(\theta_s)][V_{abc}] = R_s[P(\theta_s)][i_{abc}] + [P(\theta_s)]\frac{d}{dt}[\psi_{abc}] \quad 2.48$$

Et de la :

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_a \psi_{qs} \quad 2.49$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_a \psi_{ds} \quad 2.50$$

$$V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\psi_{os}}{dt} \quad 2.51$$

De façon analogue, la transformation des grandeurs rotoriques conduit au système :

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_m) \psi_{qr} \quad 2.52$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_m) \psi_{dr} \quad 2.53$$

$$V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\psi_{or}}{dt} \quad 2.54$$

➤ Equations de flux

En grandeurs de phase on a :

$$[\psi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{ABC}] \quad 2.55$$

Sachant que $[L_s]$ peut être mise sous la forme suivante :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} - L_{bb} & 0 & 0 \\ 0 & L_{aa} - L_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & L_{aa} - L_{bb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ab} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{ab} \end{bmatrix} \quad 2.56$$

Par ailleurs :

$$[L_{sr}] = L_{aA}[C] \quad 2.57$$

En multipliant les deux membres de (2.35) par $[P(\theta_s)]$ il vient :

$$[P(\theta_s)][\psi_{abc}] = [P(\theta_s)][L_s][i_{abc}] + [P(\theta_s)][L_{sr}][i_{ABC}] \quad 2.58$$

$$[P(\theta_s)][L_s][i_{abc}] = \begin{bmatrix} (L_{aa} - L_{ab})i_{ds} \\ (L_{aa} - L_{ab})i_{qs} \\ (L_{aa} + 2L_{ab})i_{os} \end{bmatrix} \quad 2.59$$

$$[P(\theta_s)][L_{sr}][i_{ABC}] = L_{aA} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_r & -\sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{3}{2} L_{aA} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ 0 \end{bmatrix} \quad 2.60$$

En posant :

$$L_s = L_{aa} - L_{ab} \quad 2.61$$

$$L_{os} = L_{aa} + 2L_{ab} \quad 2.62$$

$$L_{sr} = \frac{3}{2} L_{aA} \quad 2.63$$

L'expression des flux totalisés statoriques prend la forme :

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \quad 2.64$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \quad 2.65$$

$$\psi_{os} = L_{os} i_{os} \quad 2.66$$

On obtient de la même manière pour le rotor :

$$\Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds} \quad 2.67$$

$$\Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs} \quad 2.68$$

$$\Psi_{or} = L_{or} i_{or} \quad 2.69$$

Avec :

$$L_r = L_{AA} - L_{AB} \quad 2.70$$

$$L_{or} = L_{AA} + 2L_{AB} \quad 2.71$$

L_s , L_r et L_{sr} représentent respectivement les inductances cycliques statorique, rotorique et magnétisante exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles.

L_{or} est inductances cycliques homopolaire.

➤ Equations de la puissance et du couple

$$Pe = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = \frac{3}{2} (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) + 3V_{os} i_{os} \quad 2.72$$

$$Pe = -\frac{3}{2} \left\{ \frac{d\Psi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} i_{qs} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} i_{dr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} i_{qr} + 2 \frac{d\Psi_{or}}{dt} i_{or} \right\} \\ + \frac{3}{2} \left\{ (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \frac{d\theta_s}{dt} + (\Psi_{dr} i_{qr} - \Psi_{qr} i_{dr}) \frac{d\theta_r}{dt} \right\} \\ + \frac{3}{2} \left\{ R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2 + 2i_{os}^2) + R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2 + 2i_{or}^2) \right\} \quad 2.73$$

La puissance électrique est composée de trois termes :

- Le premier terme représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée par unité de temps.
- Le deuxième terme correspond à la puissance électrique transformée en puissance mécanique
- Le troisième terme correspond aux pertes joule.

En sachant que :

$$\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds} = -(\Psi_{dr} i_{qr} - \Psi_{qr} i_{dr}) \quad 2.74$$

$$Pe = \frac{3}{2} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \left(\frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \right) = \frac{3}{2} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \frac{d\theta}{dt} = \frac{3}{2} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \omega_r \quad 2.75$$

Le couple électromagnétique est égal au rapport du second terme sur la vitesse de rotation ω_r ,

$$C_{em} = \frac{Pe}{\Omega_r} = P \frac{3}{2} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad 2.76$$

$$\text{avec } \Omega_r = \frac{\omega_r}{P}$$

Avec : P nombre de paire de pôles

▪ Autres expressions du couple instantané

Il est possible d'obtenir d'autres expressions du couple instantané en utilisant les équations du flux statorique:

$$C_{em} = P((L_s I_{sd} + L_{sr} I_{rd}) I_{sq} - (L_s I_{sq} + L_{sr} I_{rq}) I_{sd}) \quad 2.77$$

$$C_{em} = P L_{sr} (L_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) \quad 2.78$$

Pour un système équilibré la composante homopolaire est nulle, après application de la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère (a, b, c), un modèle de la machine est obtenu après calcul, il est représenté sous la forme suivante :

▪ **Equations électriques**

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_a \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_a \psi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_m) \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_m) \psi_{dr} \end{array} \right. \quad 2.79$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_a = \frac{d\theta_r}{dt} \\ \omega_m = \frac{d\theta}{dt} \end{array} \right. \quad 2.80$$

▪ **Équations magnétiques**

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \\ \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs} \end{array} \right. \quad 2.81$$

▪ **Équation mécanique**

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire

$$C_{em} = C_r + f \Omega_{méc} + J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} \quad 2.82$$

Avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques:

$$C_{em} = P \frac{L_{sr}}{L_s} (\Psi_{qs} i_{dr} - \Psi_{ds} i_{qr}) \quad 2.83$$

P : nombre de paires de pôles.

2.9 Résultats de simulation

Les résultats de la simulation sous MATLAB SIMULINK du modèle la MADA qui est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (plan (d, q)) liée au champ tournant sont montrés sur les figures ci-dessous. Ces résultats sont obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 1,5MW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec

une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de $\sqrt{2} * 690V$, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 20V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe égale à 1650 tr/min.

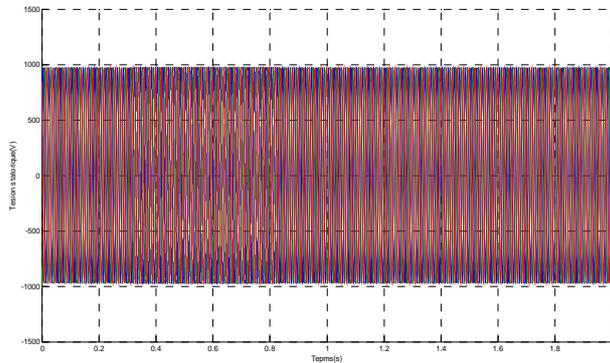


Figure 2.13: La tension triphasée appliquée au stator de la MADA

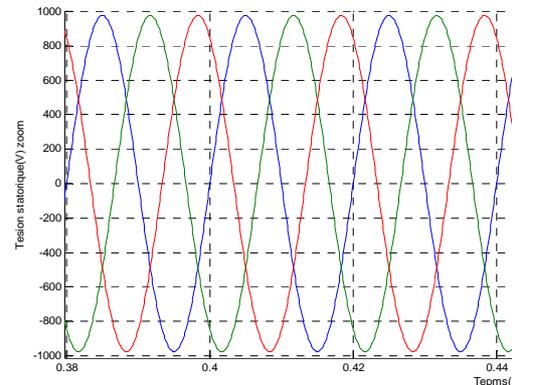


Figure 2.14: Zoom de la tension triphasée appliquée au stator de la MADA

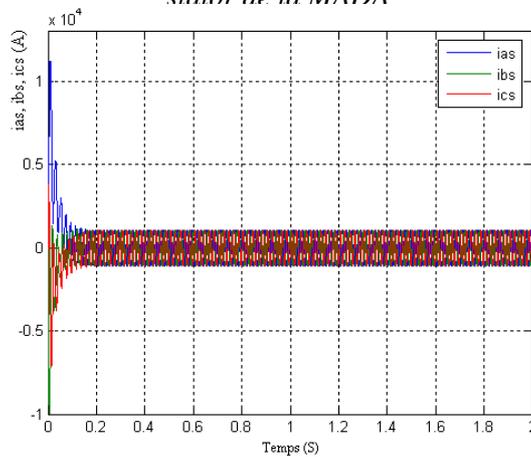


Figure 2.15 : Les courants triphasés statorique de la MADA

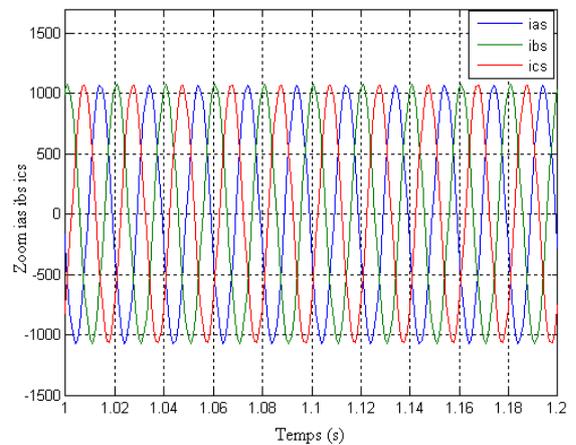


Figure 2.16: Zoom de courants triphasés statorique de la MADA

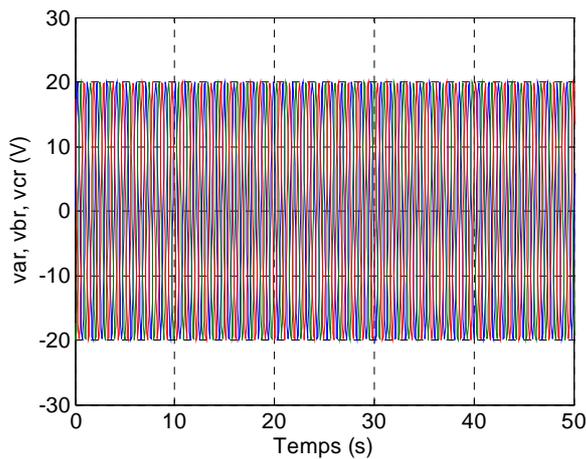


Figure 2.17: Les tension rotoriques de la MADA.

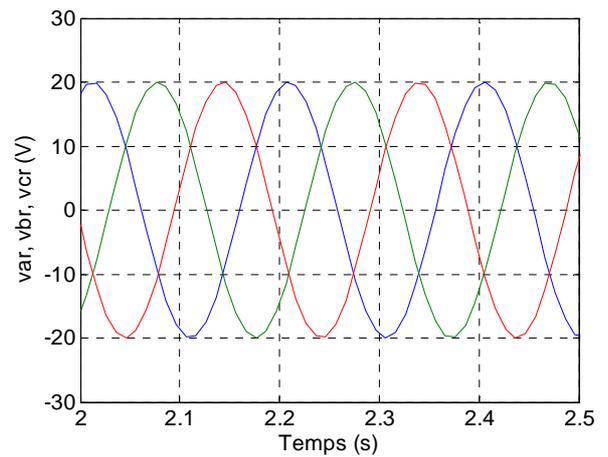


Figure 2.18: Zoom des tensions rotoriques de la MADA.

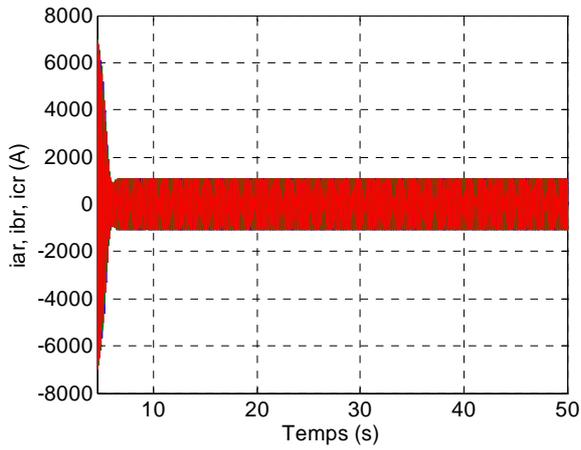


Figure 2.19: Les courants rotoriques de la MADA.

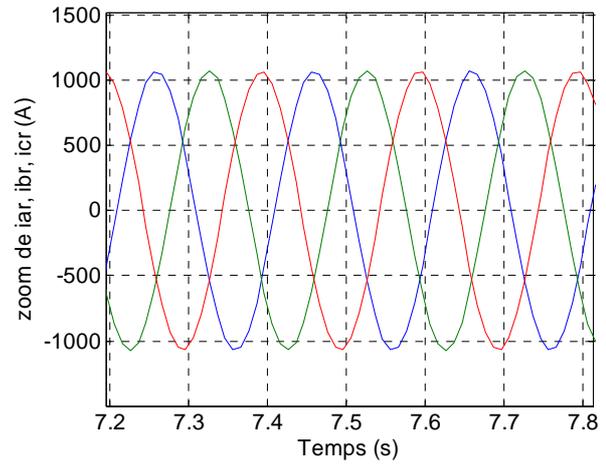


Figure 2.20: Zoom des courants rotoriques de la MADA.

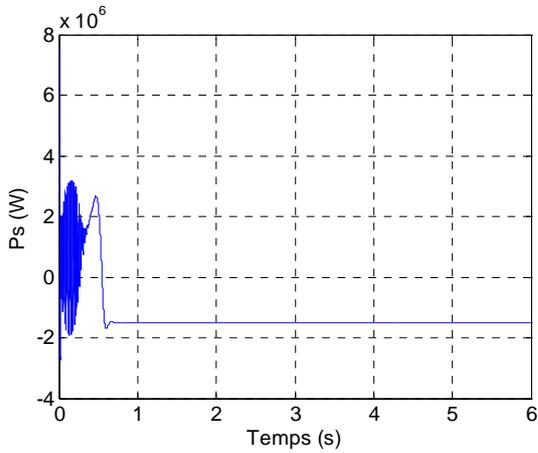


Figure 2.23: Puissance statorique active P_s de la MADA.

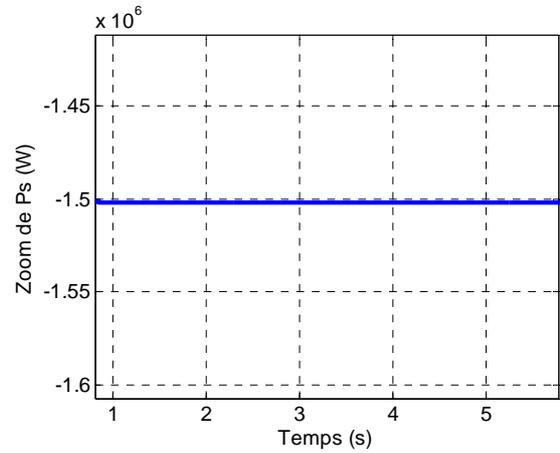


Figure 2.24: Zoom Puissance active statorique P_s de la MADA.

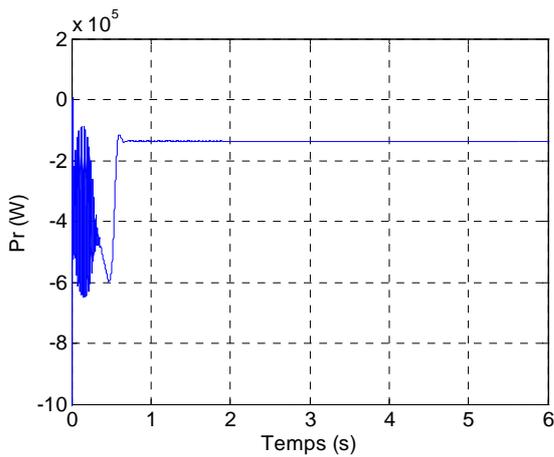


Figure 2.25: Puissance rotorique active P_r de la MADA.

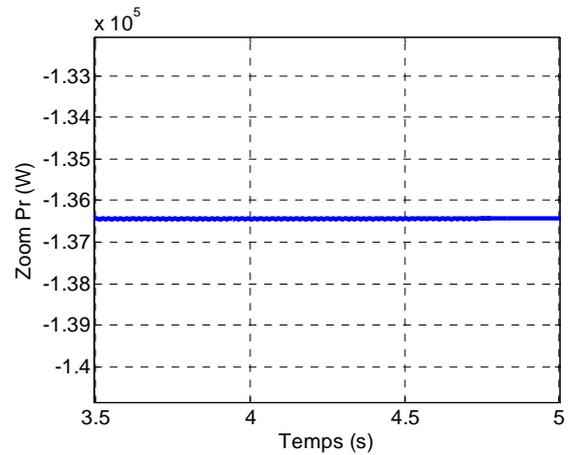


Figure 2.26: Zoom Puissance active rotorique P_r de la MADA.

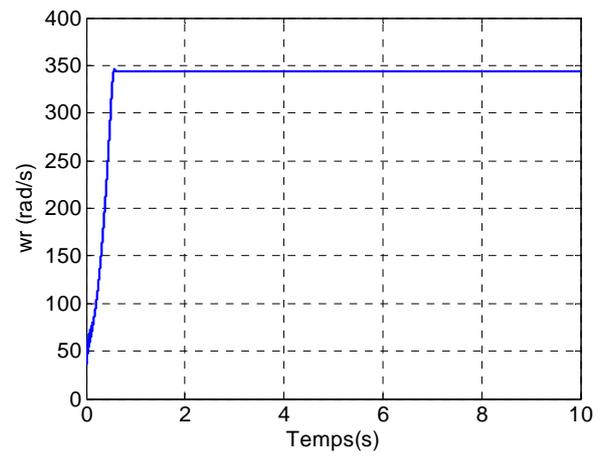


Figure 2.27: Vitesse d'entraînement de la MADA.

1.10 Conclusion

La modélisation de la partie mécanique et électromécanique de l'éolienne a été donnée dans cette partie du travail ainsi que leurs simulations partie par partie.

Chapitre 3

Commande vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

3.1 Introduction

L'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation outre que la taille du convertisseur, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique puissance-vitesse optimale de l'éolienne. Après avoir donné le modèle mathématique de la machine dans le chapitre 1 une commande vectorielle est nécessaire afin de bien contrôler les différentes grandeurs pour permettre le bon fonctionnement de la machine à double alimentation en génératrice.

3.2 Stratégie de commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Pour pouvoir tourner à une vitesse optimale, pour une vitesse de vent donnée, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est-à-dire une puissance active débitée par la MADA [6][7]. C'est en utilisant cette référence de puissances active et réactive que la machine peut être alors commandée. Le modèle de la turbine associé au modèle de la MADA nous a permis de déterminer, pour chaque vitesse de vent la puissance que devait générer la MADA pour permettre à l'éolienne de tourner à vitesse optimale.

Les différentes stratégies de commande de la MADA reposent sur deux approches à savoir : [6][7][11]

- Une approche basée sur un contrôle du flux en boucle fermée, cette approche est nécessaire lorsque le réseau est instable (tension et flux varient) dite commande vectorielle de type direct.
- Une approche basée sur un contrôle du flux en boucle ouverte, cette approche est utilisée quand le réseau est stable (tension et flux constant) dite commande vectorielle de type indirect.

Dans notre cas, nous allons considérer que le réseau est de puissance infini, ainsi nous pouvons opter pour la deuxième approche.

3.3 Choix du référentiel pour le modèle de Park

En considérant les équations électriques de la machine asynchrone à double alimentation suivantes :

Equations électriques

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_r \psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_r \psi_{dr} \end{array} \right. \quad 3.01$$

Équations magnétiques

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \\ \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs} \end{cases} \quad 3.02$$

Équation mécanique

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire

$$C_{em} = C_r + f\Omega_{méc} + J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} \quad 3.03$$

Avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques:

$$C_{em} = p \frac{L_{sr}}{L_s} (\Psi_{qs} i_{dr} - \Psi_{ds} i_{qr}) \quad 3.04$$

p : nombre de paires de pôles.

En choisissant un référentiel diphasé ' $d-q$ ' lié au champ tournant, et en alignant le vecteur flux statorique Ψ_s avec l'axe ' d ', nous pouvons écrire :

$$\Psi_{ds} = \Psi_s ; \Psi_{qs} = 0 \quad 3.05$$

L'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = -p \frac{L_{sr}}{L_s} \Psi_{ds} i_{qr} = -p \frac{L_{sr}}{L_s} \Psi_s i_{qr} \quad 3.06$$

Dans l'hypothèse où le flux Ψ_{ds} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator) [6][7], le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine, par conséquent la puissance active, uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q .

Dans le repère triphasé (a, b, c) la tension aux bornes d'une phase " n " du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{sn} = R_s I_{sn} + \frac{d\Psi_{sn}}{dt} \quad 3.07$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans système éolien [6], cette relation devient :

$$V_{sn} \simeq \frac{d\Psi_{sn}}{dt} \quad 3.08$$

La relation 3.07 montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statorique et qu'il est en avance de $\pi/2$ sur ce même vecteur.

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant) :

$$V_{ds} = 0 \text{ et } V_{qs} = V_s \quad 3.9$$

En s'alignant sur le repère choisi et en utilisant les simplifications ci-dessus inhérentes à ce repère, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Psi_s \end{cases} \quad 3.10$$

$$\begin{cases} \Psi_s = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ 0 = L_r i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \end{cases} \quad 3.11$$

A partir de l'équation 3.11, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Psi_s}{L_s} - \frac{L_{sr}}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{L_{sr}}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad 3.12$$

3.4 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \\ P_r = V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr} \\ Q_r = V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr} \end{cases} \quad 3.13$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds} = 0$), nous conduit à :

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} \end{cases} \quad 3.14$$

En remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions données par l'équation 3.07, nous obtenons celles des puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \Psi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad 3.15$$

En approximant Ψ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \quad 3.16$$

Compte tenu du repère choisi, des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, le système ainsi obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à une constante préé $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ imposée par le réseau.

3.5 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les équations 3.02 en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation 3.12:

$$\begin{cases} \psi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \\ \psi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \end{cases} \quad 3.17$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation) 3.1; nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad 3.18$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{dr} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad 3.19$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. [6][7]

En revanche, le terme $g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur. [6][7]

Les équations 3.15, 3.16 et 3.18 permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (figure 3.1) [6][7][11][42][43].

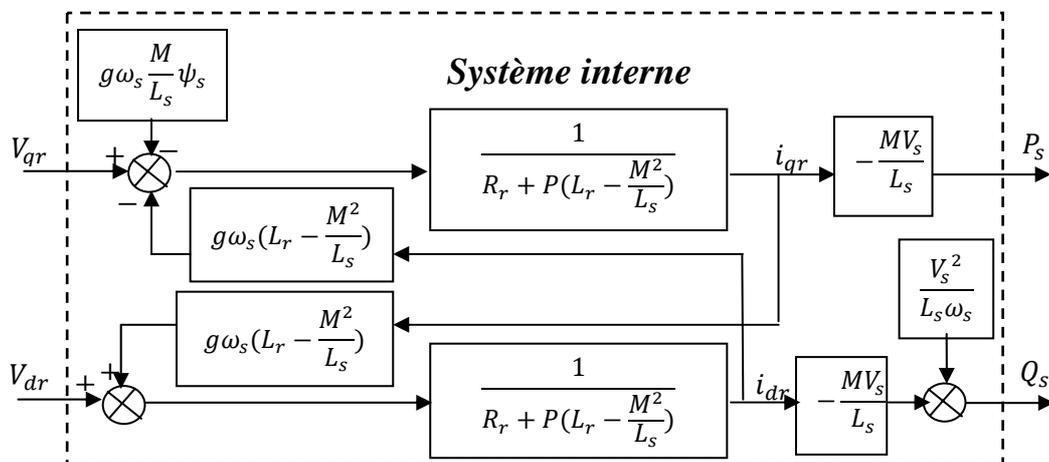


Figure 3.1 : Schéma bloc du système à réguler

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances, active et réactive, statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment, avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance active pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

3.7 Commande vectorielle en puissance de la MADA en génératrice

3.7.1 Principe général

L'objectif de la commande vectorielle en puissance de la MADA consiste à lui faire suivre une consigne en puissance avec une dynamique électrique, la mieux possible que le permet la fréquence de modulation du convertisseur utilisé. Schéma bloc de la commande vectorielle, est montré sur figure 3.2. Nous pouvons constater la présence de deux régulateurs sur chaque axe ($R1$ et $R2$) pour l'axe d et ($R'1$ et $R'2$) pour l'axe q . [6][7]

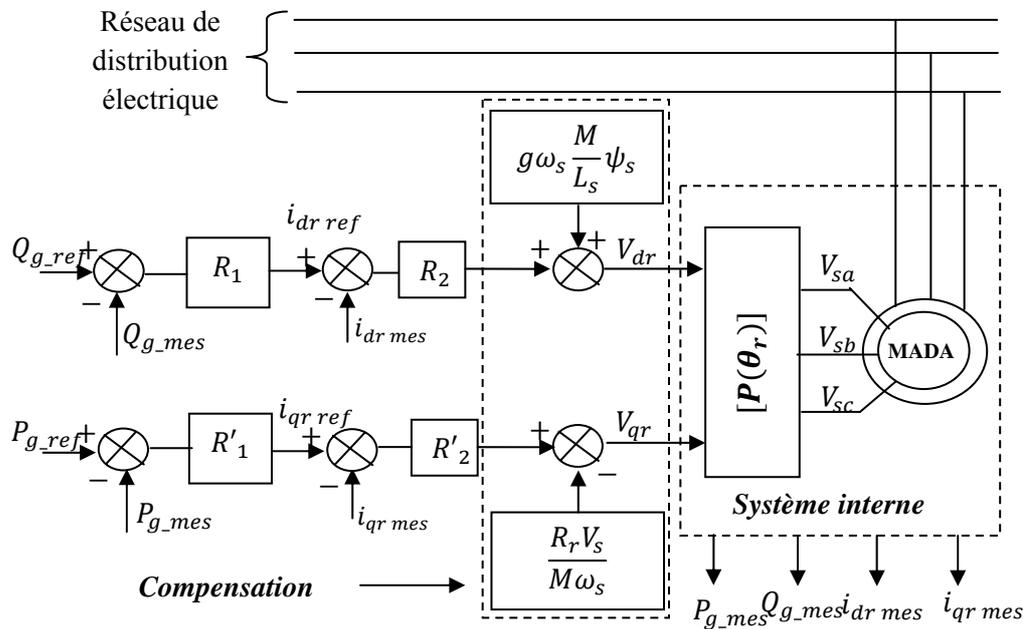


Figure 3.2 : Principe générale de la commande vectorielle en P et Q de la MADA.

Si l'on observe le schéma de la figure 3.1, on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances, active et réactive par le terme $\frac{MV_s}{L_s}$. Lorsque la machine fonctionne en mode autonome ou lorsque le réseau auquel le stator de la machine est connecté présente des

variations importantes, le terme V_s est variable et la présence des régulateurs R_2 et R'_2 se justifie. [6][7]

Dans notre cas, nous considérons que la machine est connectée sur un réseau stable, la tension V_s est par conséquent constante et les régulateurs R_2 et R'_2 sont inutiles. Chaque axe comporte donc un seul régulateur comme indiqué sur la figure 3.3[11][42].

Les blocs R_P et R_Q représentent les régulateurs de puissance active et réactive. Le but de ces régulateurs est d'obtenir des performances dynamiques élevées, et une bonne robustesse. Pour atteindre ces objectifs on utilise des régulateurs PI , et on a égalisé la valeur nulle la puissance réactive de référence du réseau, et ce dans le but d'obtenir un facteur de puissance unitaire.

$$P_{g_réf} = -\eta \cdot P_{méc_opt} \quad 3.21$$

Avec :

η : Rendement de la MADA ;

$P_{méc_opt}$: la puissance mécanique optimale est donnée par l'équation 3.22

$$P_{méc_opt} = \frac{1}{2} \cdot C_{P_max} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{R^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_{méc}^3 \quad 3.22$$

$P_{g_réf}$: Puissance de référence de l'aérogénérateur.

3.6 Expressions de puissances active et réactive de l'aérogénérateur

En négligeant les pertes d'énergie active et réactive dans le convertisseur direct de fréquence, les expressions de puissances active et réactive de l'aérogénérateur s'écrivent comme suit.

$$\begin{cases} P_g = P_s + P_r \\ Q_g = Q_s + Q_r \end{cases} \quad 3.20$$

En négligeant certains termes, et sachant que le redresseur à MLI utilisé au niveau du rotor est à facteur de puissance unitaire ($Q_r = 0$) on trouve les équations des puissances, active et réactive du générateur comme suit [11] [19][42][43]:

$$\begin{cases} P_g = (g - 1) \cdot V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_g = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad 3.21$$

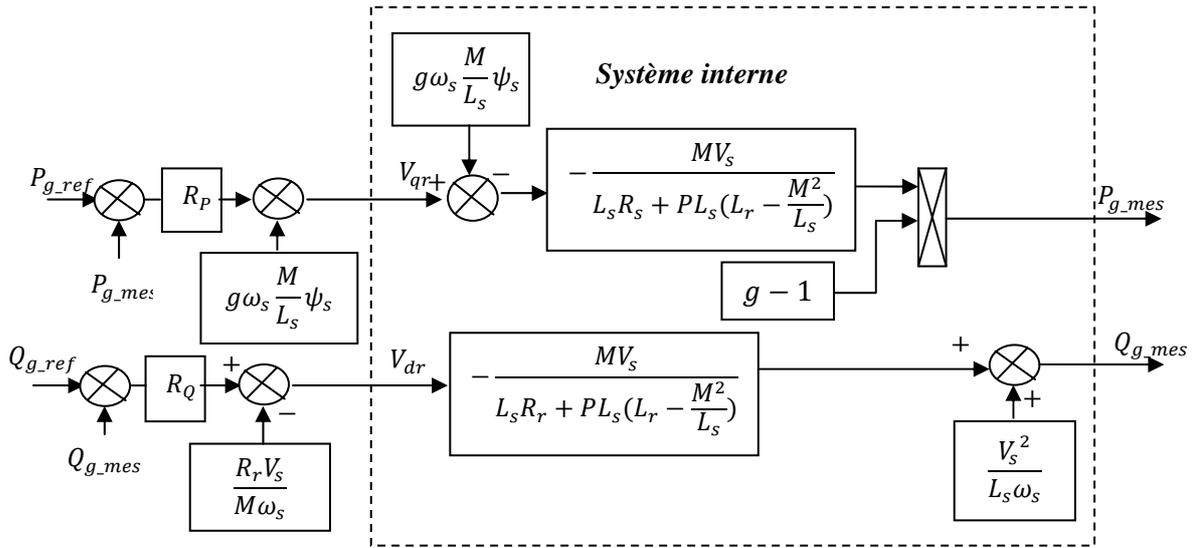


Figure 3.3: Commande vectorielle avec un seul régulateur.

3.7.2 Objectifs du contrôle

Bien que la dynamique du dispositif éolien soit relativement lente par rapport à l'évolution des grandeurs électriques, les régulateurs de la commande vectorielle seront calculés de façon à obtenir les performances les plus élevées possibles tant au niveau de la dynamique qu'à celui de la robustesse et du rejet de perturbations. Ainsi, au cours de la synthèse de ces régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique, ceci dans l'optique de l'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la MADA en génératrice. Les lois de commande élaborées doivent autoriser cette dynamique sans engendrer des dépassements qui peuvent nuire à la durée de vie de la machine et des convertisseurs. Elles devront également opérer un bon rejet des perturbations qui peuvent être nombreuses sur un tel système étant donné la complexité et le nombre important de capteurs mis en jeu. Enfin, elles devront satisfaire aux exigences de robustesse face aux variations de paramètres qui peuvent intervenir dans les machines électriques notamment à cause des variations de température.

3.8 Mise en place de la régulation

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure 3.3 afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation. Nous négligeons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait

de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure 3.4 :

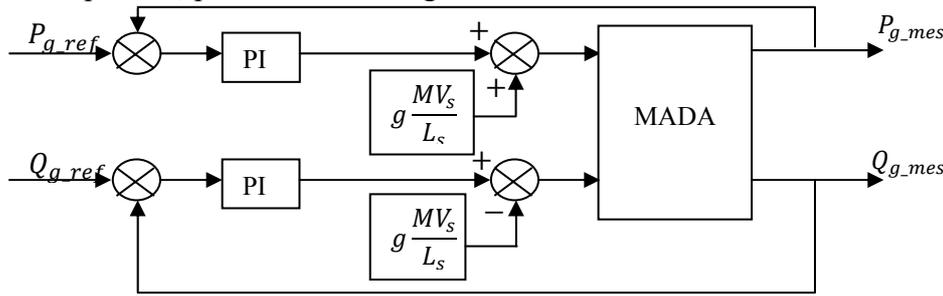


Figure 3.4: Schéma bloc de la commande.

3.8.1 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral pour le contrôle de la puissance

C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre. La figure 3.5 montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI. Dans notre cas, la fonction de transfert est sous la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$ correspond aux régulateurs de la figure 3.4. [6][7][8][11][41][42][43][52].

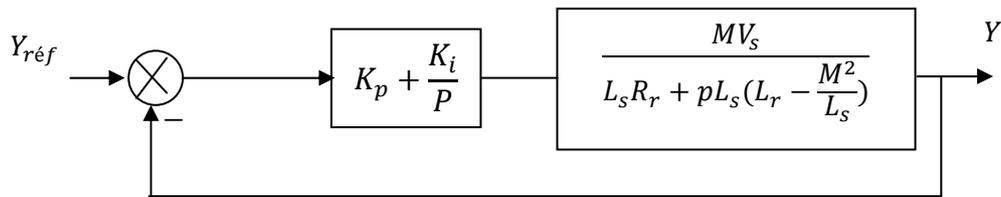


Figure 3.5 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante [8][52]:

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + (L_r - \frac{M^2}{L_s})} \tag{3.23}$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s}) \tag{3.24}$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante.

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \tag{3.25}$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1+\tau_r p} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad 3.26$$

Avec τ_r le temps de repense du système que l'on se fixe de l'ordre de 10ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

Imposer une valeur plus faible n'améliorait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad 3.27$$

Nous avons utilisé la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur *PI*.

La simulation du modèle de la turbine associé au modèle de la MADA en utilisant la commande vectorielle nous a permis de déterminer, pour chaque vitesse de vent la puissance que devait générer la MADA pour permettre à l'éolienne de tourner à vitesse optimale.

3.9 Résultats de simulation

Le modèle mathématique de la commande vectorielle est implémenté sous MATLAB/SIMULINK. Les résultats sont donnés par les figures 3.5, 3.6, sont obtenus pour une consigne de puissance réactive maintenue nulle, $Q_{g_réf} = 0$, et une consigne de puissance active, $P_{g_réf} = -\eta \cdot P_{méc_opt}$.

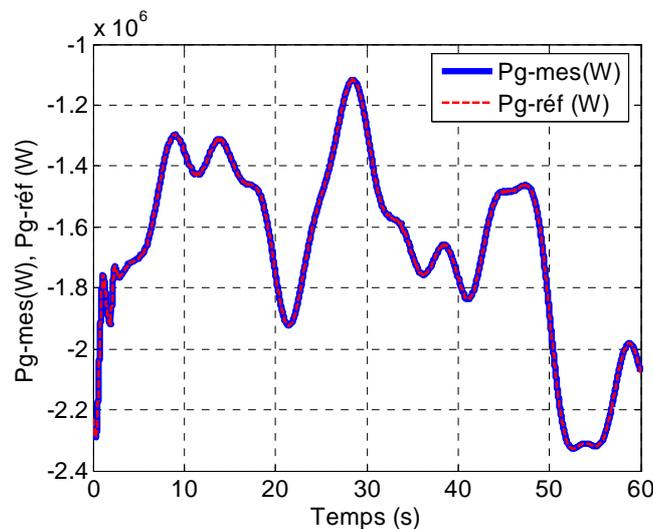


Figure 3.5: Variation de la puissance active mesurée P_{g_mes} et de la puissance de référence $P_{g_réf}$

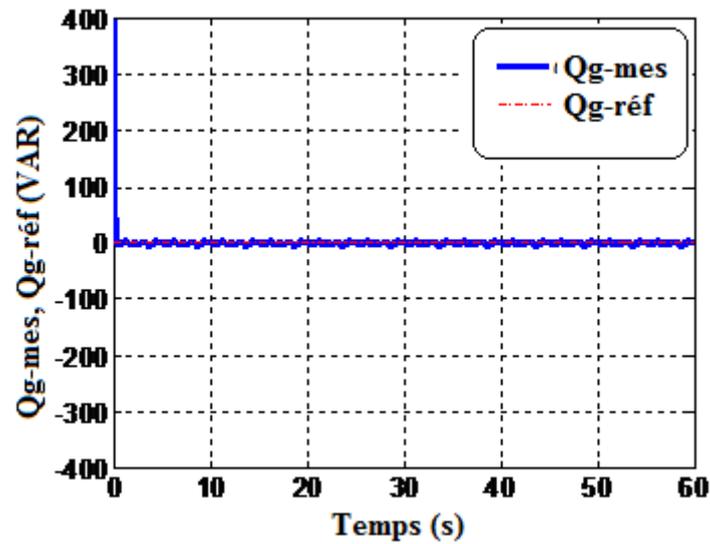


Figure 3.6: Variation de la puissance réactive mesurée Q_{g_mes} et de la puissance de référence $Q_{g_réf}$

Les figures ci-dessus illustrent les performances de la machine asynchrone à double alimentation régulée par une commande vectorielle. Les puissances mesurées P_{g_mes} , Q_{g_mes} suivent parfaitement leurs consignes.

3.9 Conclusion

Cette commande nous permettra la génération des tensions de références qui seront utilisées pour la génération des instants de commutation de l'onduleur de tension.

Les convertisseurs utilisés dans la chaîne du rotor seront étudiés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Modélisation des convertisseurs statiques (AC-DC, DC-AC)

4.1 Introduction

L'avantage principal de l'utilisation de la MADA dans les éoliennes est la possibilité de travailler à vitesse variable, cela grâce à la chaîne rotor constituée d'un onduleur et d'un redresseur liés directement au rotor de la génératrice.

Dans notre travail nous avons utilisé dans la chaîne rotor deux convertisseurs de puissance à structure onduleur de tension à MLI, l'un fonctionnant en redresseur à facteur de puissance unitaire et l'autre en onduleur.

Cette configuration permet un contrôle des grandeurs de sortie comme la puissance active liée à la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance réactive. Le convertisseur n'étant pas sur le chemin principal du flux de puissance, il est dimensionné au voisinage de 25% de la puissance nominale. Le convertisseur statique branché au rotor de la machine est utilisé pour la gestion des puissances actives et réactives de la machine. Le rôle du convertisseur statique branché au réseau est de régler la tension de l'étage continu tout en assurant un facteur de puissance unitaire du côté alternatif. Cette topologie utilise le concept de la *vitesse variable*. Le domaine de puissance de ce type de générateur s'étend de quelques dizaines de kW à quelques MW (grandes puissances envisagées actuellement pour les éoliennes) [13].

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur, mais plutôt la plage de variation de la vitesse. En effet, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour fonctionner en moteur et au dessus pour fonctionner en générateur. Ici c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en *hypo* ou *hyper* synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [6][7].

La figure 4.1 représente la chaîne rotor (redresseur-onduleur) utilisée dans notre travail.

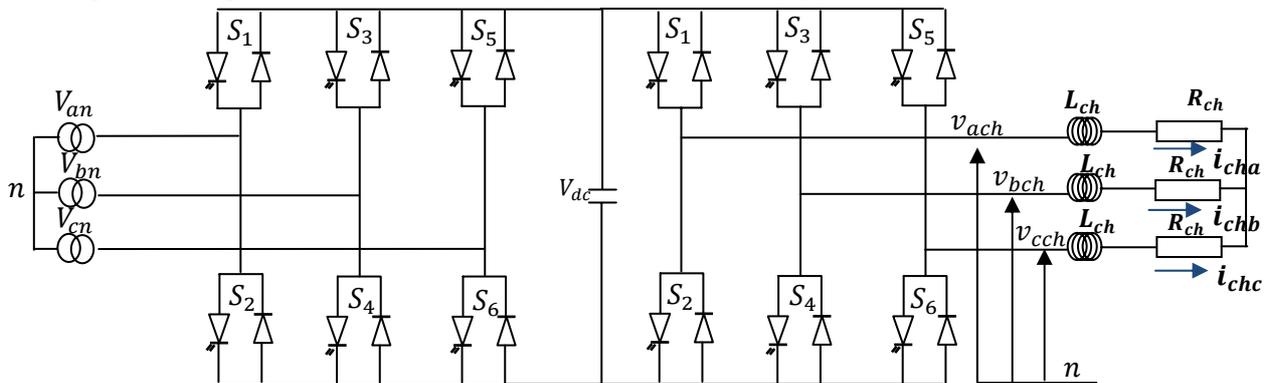


Figure 4.1 : La chaîne rotor : redresseur-onduleur (en anglais « back to back »)

4.2 Etage onduleur

L'onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion est un convertisseur de l'électronique de puissance (*DC-AC*) entièrement commandable qui permet d'imposer à sa sortie des tensions d'amplitude et de fréquence réglables en agissant sur la commande des interrupteurs du convertisseur statique (GTO, transistors bipolaire, MOSFET, IGBT, etc.).

Pour réaliser un onduleur triphasé classique alimenté par une source de tension continue (munie d'un filtrage capacitif), dont le récepteur est une charge alternative se comportant en source de courant, on a besoin de 6 interrupteurs bidirectionnels en courant. Il faut aussi disposer donc de diodes rapides et performantes, montées en antiparallèle avec les transistors. Les techniques dites Modulation de Largeur d'Impulsions, *MLI* ou (Pulse Width Modulation, *PWM*, dans le jargon anglo-saxon) sont utilisées [1],[2],[15],[16]. Ces stratégies de commande s'appuient sur les performances en fréquence de découpage permises par les composants électroniques utilisés. Cette configuration permet d'imposer à la charge (réseau) des courants présentant une faible distorsion harmonique et conduit ainsi à produire une énergie de qualité meilleure.

Plusieurs techniques de modulation de largeur d'impulsion sont utilisées dans la commandes de ce types de convertisseurs afin:

1. De repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite leurs filtrage.
2. De faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

Et pour cela on peut citer les techniques suivantes [21]:

- La solution la plus largement utilisée 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 « *modulation sinus-triangle* ».
- On peut également utiliser une bascule à hystérésis commandée par la différence entre une onde de référence (ou son intégrale) et l'intégrale de la tension en créneaux à la sortie de l'onduleur ; c'est « *la modulation en delta* » ou en sigma delta.
- Dans certaines applications, on calcule au préalable, sur la base d'un critère d'optimisation les instants de commande. Les valeurs calculées sont introduites sous forme de table dans une mémoire morte ; la lecture de celle-ci par un système à microprocesseur assure la génération des signaux de commande des interrupteurs, c'est *la modulation calculée* dite aussi *optimisée*.

- On peut aussi générer la séquence des signaux de commande des interrupteurs de façon à suivre au mieux le vecteur défini par les composantes de Clarke du système de tensions qu'on veut produire ; c'est la **modulation vectorielle**.

Dans ces quelques explications préliminaires nous avons donné les techniques de commandes les plus utilisées dans la commande des onduleurs de tension, pour la suite de cette partie du travail nous détaillerons plus la modulation sinus-triangle ainsi que la modulation vectorielle afin de voir l'impact du choix de la technique de commande sur la qualité de l'énergie délivrée à la sortie de l'onduleur.

4.2.1 Principe de la modulation sinus-triangle

La figure 4.2 représente le modèle d'un onduleur monophasé avec un point milieu mis à la terre coté continu qui joue le rôle d'un diviseur capacitif [21][39].

La figure 4.3 illustre le principe de la modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle.

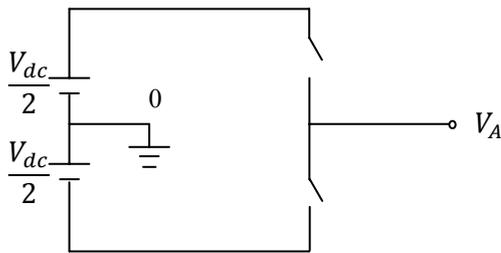


Figure4.2 : modèle d'un onduleur monophasé avec un point milieu

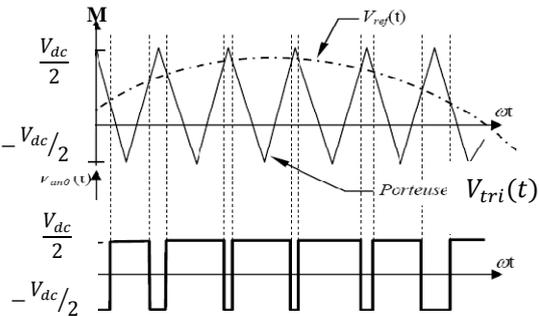


Figure4.3 : Principe de la modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle

Les tensions de sortie de l'onduleur sont déterminées selon la figure 4.3 comme suit :

- Quand : $V_{ref} > V_{tri}$, $V_{A0} = V_{dc}/2$;
- Quand : $V_{ref} < V_{tri}$, $V_{A0} = -V_{dc}/2$.

a) Caractérisation de la modulation

✓ L'indice de modulation m , égal au rapport f_s/f_1 [21][23] ;

f_s : est la fréquence de la porteuse (V_{tri}).

f_1 : est la fréquence de la tension de référence ($V_{réf}$).

✓ Le coefficient de réglage en tension r : égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur de crête $\frac{V_{dc}}{2}$ de l'onde de modulation [21][23].

$$r = \frac{V_{réf}}{V_{tri}} = \frac{\max(V_{A0})_1}{V_{dc}/2}$$

$(V_{A0})_1$: est le fondamental de V_{A0}

b) Injection de l'harmonique trois dans la référence

En triphasé on peut réduire le « déchet de tension » sans diminuer la qualité des tensions de sorties et les courant d'entrée [23].

Puisque les harmoniques de rang trois ou multiple de trois sont éliminés des tensions de sortie, on peut ajouter un harmonique trois à la sinusoïde de fréquence f_1 pour former l'onde de référence. On trouvera l'harmonique trois dans les tensions $V_A - V_0, V_B - V_0, V_C - V_0$ par rapport au point milieu fictif 0 de l'entrée, mais il disparaît dans les tensions simples $V_{Ach}, V_{Bch}, V_{Cch}$ et les tensions composées $V_A - V_B, V_B - V_C, V_C - V_A$ à la sortie.

L'addition d'harmonique trois permet d'augmenter l'amplitude maximale du fondamental dans la référence et, par là, dans les tensions de sortie [21][23][39].

Si la référence est sinusoïdale, $(V_A - V_0)_w$ égale à V'_{1w} ne peut excéder $V_{dc}/2$, du moins si m est grand.

Si la référence est la somme d'un terme fondamental, et d'un harmonique trois de valeur suffisante, les maxima de la référence ne se situent plus au milieu de ces alternances. Sans que la tension $(V_A - V_0)_w$ excède $V_{dc}/2$, on peut obtenir une valeur de V'_{1w} supérieure à $V_{dc}/2$ (voir figure 4.4).

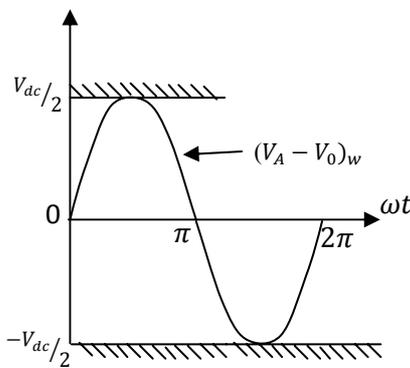


Figure 4.4 : Tension de référence

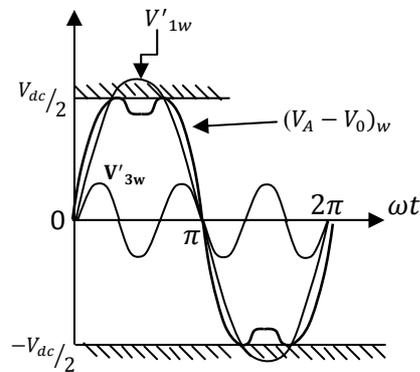


Figure 4.5 Tension de référence avec l'injection de l'harmonique trois

La commande utilisant une tension de référence de la forme suivante :

$$(V_A - V_0)_w = \frac{V_{dc}}{2}(r \sin \omega t + k \sin 3\omega t)$$

est appelée *commande suboptimale* [21].

Pour trouver la valeur de k permettant à r d'atteindre sa valeur maximale, on suppose que la forme d'onde de la référence est toujours la même en écrivant :

$$(V_A - V_0)_w = \frac{V_{dc}}{2} r(\sin \omega t + k' \sin 3\omega t)$$

La dérivée par rapport à t de $(\sin \omega t + k' \sin 3\omega t)$ montre que le premier maximum se produit avant $t = \pi/2\omega$ si $k' > \frac{1}{9}$

Si cette condition est remplie, l'instant de ce maximum est tel que :

$$\cos^2 \omega t = \frac{1}{4} \left(3 - \frac{1}{3k'} \right)$$

La valeur maximale de r correspond au minimum de la qualité $(\sin \omega t + k' \sin 3\omega t)$ à cet instant. On trouve ainsi :

$$r_{max} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155 \text{ [21][23][39][46]}$$

$$\text{Pour } k' = \frac{1}{6} \text{ ou } k = \frac{1}{6} \frac{2}{\sqrt{3}} = 0,1925$$

L'amplitude maximale théorique du fondamental des tensions simples de sortie passe de $\frac{V_{dc}}{2}$, avec la commande sinusoïdale à 1,155 avec la commande suboptimale.

4.2.2 Le principe de la modulation vectorielle

En se basant sur la théorie des phaseurs et à partir des tensions de phase, on peut calculer le phaseur de tension qui représente la tension de sortie souhaitée. Si le phaseur souhaité correspond à un système équilibré de tensions sinusoïdales, il tournera à vitesse constante avec une amplitude également constante [40]. Très souvent dans les compensateurs, la tension à injecter peut contenir des harmoniques et des séquences inverse ou homopolaire ; dans ce cas, ni l'amplitude ni la vitesse du phaseur ne seront constantes. Du fait de la nature discrète des onduleurs de tension, on ne peut pas reconstruire instantanément le phaseur de tension souhaité, mais indirectement, en le remplaçant à chaque période de modulation par un phaseur équivalent. Ce phaseur équivalent est construit à partir des 8 phaseurs spatiaux disponibles dans un onduleur [32][46]. Cette modulation est utilisée par les commandes modernes des machines à courant alternatif [27],[28]. Les tensions de référence sont les tensions simples désirées à la sortie de l'onduleur. Cette technique de MLI est basée sur les principes suivants :

- Le signal de référence est échantillonné sur des intervalles T (MLI régulière),
- Pour chaque phase, on envoie une impulsion de largeur T centrée sur la période (MLI symétrique) dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence à l'instant d'échantillonnage,
- Tous les interrupteurs d'un même demi bras ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période.

Cette MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés pour chaque bras de l'onduleur, mais sur la détermination d'un vecteur de contrôle global approximé sur une période de modulation T_m .

Dans la modulation vectorielle, on représente par un seul vecteur les trois tensions sinusoïdales de sortie que l'on désire. On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteurs complémentaires [21], (S1-S2), (S3-S4), (S5- S6).

✓ **Modèle mathématique de l'onduleur de tension triphasé**

Soit la structure de base d'un onduleur donnée par la figure suivante :

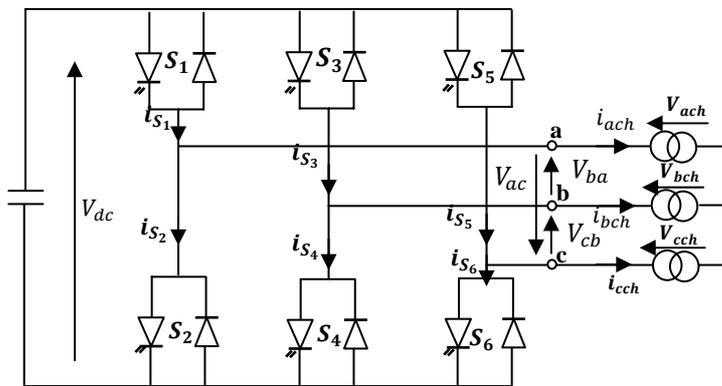


Figure 4.6 : la structure de base d'un onduleur de tension triphasé à MLI alimentant une charge alternative

Dans ce modèle, on considère que tous les éléments de la charge alternative sont linéaires et invariants dans le temps. De même, les interrupteurs et les sources de tension sont considérés comme idéaux. L'état des interrupteurs est indiqué par une fonction de commutation u_k pour l'interrupteur S. L'interrupteur S fermé implique $u_k=1$, inversement $u_k=0$ correspond à l'interrupteur S ouvert. Notons par ailleurs que les interrupteurs d'un même bras sont complémentaires [22].

Pour réduire le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties : le coté continu, la partie discontinue composée par les interrupteurs et, le coté alternatif. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir un lien entre le coté alternatif et le coté continu [22][30].

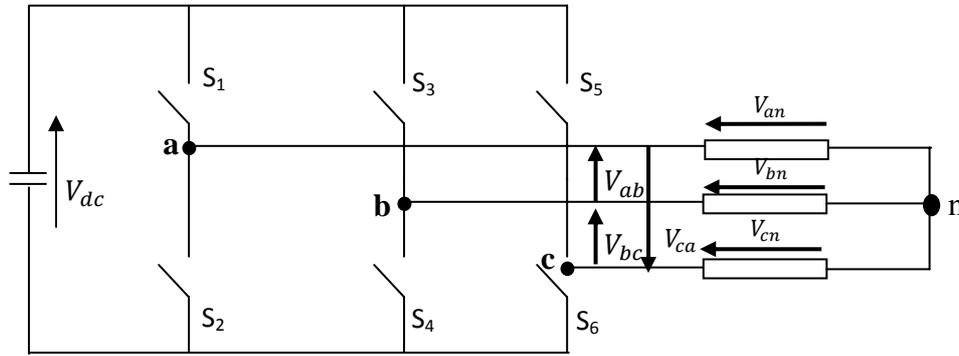


Figure 4.7 : Schéma simplifié d'un onduleur de tension commandé en tension

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} : sont les tension composées.

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : sont les tensions simples.

Egalement, les tensions composées sont définies comme suit :

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \tag{4.1}$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an}$$

➤ **la liaison entre le coté alternatif et le coté continu**

On établira la liaison entre le coté alternatif et le coté continu au travers des interrupteurs. Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$u_k = \begin{cases} +1, & \overline{u_k} = 0 \\ 0, & \overline{u_k} = +1 \end{cases} \text{ Pour } k= 1,2,3 \tag{4.2}$$

On cherchera donc une expression reliant la tension V_{dc} aux tensions (V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) qui soit une fonction de la position des interrupteurs.

A partir de l'équation 4.1, on peut établir les relations suivantes entre V_{dc} et les tensions composées (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}). par exemple, pour la première équation de 4.1 on a :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{dc} \text{ si } u_1 = +1 \text{ et } u_2 = 0 \\ V_{ab} = -V_{dc} \text{ si } u_1 = 0 \text{ et } u_2 = +1 \\ V_{ab} = 0 \text{ si } u_1 \text{ et } u_2 \text{ ont le même signe} \end{cases} \tag{4.3}$$

On note que l'équation 4.3 peut être mise sous la forme compacte suivante :

$$V_{ab} = V_{dc}(u_1 - u_2) \tag{4.4}$$

$$\begin{cases} V_{bc} = V_{dc} & \text{si } u_2 = +1 \text{ et } u_3 = 0 \\ V_{bc} = -V_{dc} & \text{si } u_2 = 0 \text{ et } u_3 = +1 \\ V_{bc} = 0 & \text{si } u_2 \text{ et } u_3 \text{ ont le même signe} \end{cases} \quad 4.5$$

$$V_{bc} = V_{dc}(u_2 - u_3) \quad 4.6$$

$$\begin{cases} V_{ca} = V_{dc} & \text{si } u_3 = +1 \text{ et } u_1 = 0 \\ V_{ca} = -V_{dc} & \text{si } u_3 = 0 \text{ et } u_1 = +1 \\ V_{ca} = 0 & \text{si } u_3 \text{ et } u_1 \text{ ont le même signe} \end{cases} \quad 4.7$$

$$V_{ca} = V_{dc}(u_3 - u_1) \quad 4.8$$

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = v_{dc} \tilde{M} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad 4.9$$

Où : \tilde{M} est donnée par :

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 4.10$$

D'une façon similaire, l'équation 4.1 peut être mise sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \tilde{M} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad 4.11$$

On peut vérifier aisément que l'obtention d'une expression de $[V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^T$ en fonction de l'état des interrupteurs et de la tension continue n'est pas possible en raison de la singularité de \tilde{M} .

D'autre part, le fait d'avoir la somme des tensions et courants coté alternatif égale à zéro implique que $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$. En ajoutant cette équation à 4.11, on obtient le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \tilde{M}' \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad 4.12$$

$$\text{Avec } \tilde{M}' \text{ donnée par :} \quad \tilde{M}' = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 4.13$$

Ainsi, la solution des équations 4.9 et 4.12 pour le vecteur de tensions, nous donne l'expression recherchée :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = V_{dc} \widetilde{M}'^{-1} \widetilde{M} u \tag{4.14}$$

$$= \frac{1}{3} V_{dc} K u \tag{4.15}$$

Avec K donnée par :

$$K = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

Finalement on peut donner le couplage entre le coté continu et le coté alternatif selon l'état des interrupteurs $[u_1 \ u_2 \ u_3]^T$; la relation 4.17 représente les tensions composées et la relation 4.18 représente les tensions simples:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \tag{4.18}$$

Comme illustré sur la figure 4.3, il y'a huit combinaisons possibles selon l'état des six interrupteurs ouverts ou fermés. Selon les deux équations 4.17 et 4.18, on peut déduire les huit vecteurs de commande possibles [23].

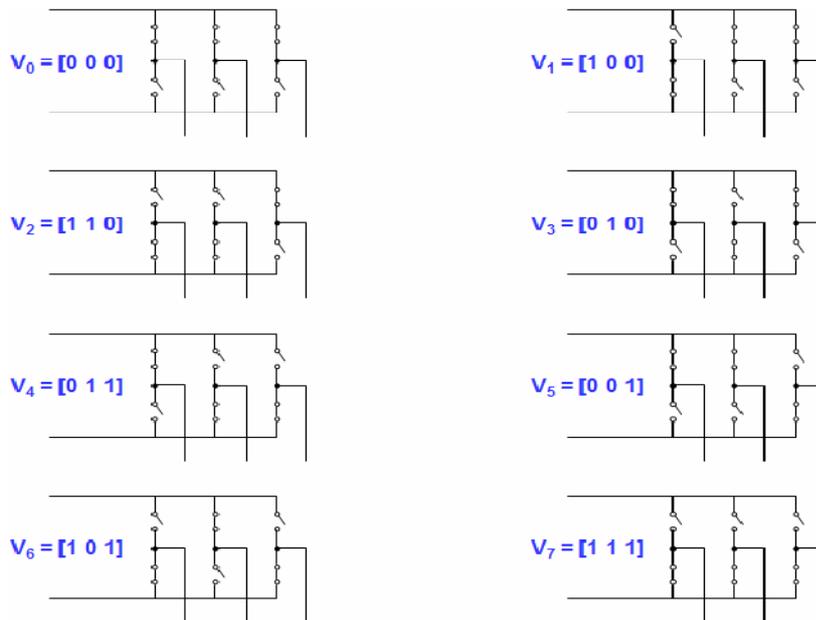


Figure 4.8 : Les huit vecteurs de commande possibles (V_0 à V_7)

Le tableau suivant indique tous les états que peut prendre les six interrupteurs du pont triphasé, les tensions simples et les tensions composées à la sortie de l'onduleur [21][22] [23]:

Vect.de.comm	Etat des interrupteurs			Tensions simples			Tensions composées		
	u_1	u_2	u_3	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
V_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	V_{dc}	0	$-V_{dc}$
V_2	1	1	0	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	0	V_{dc}	$-V_{dc}$
V_3	0	1	0	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-V_{dc}$	0	V_{dc}
V_4	0	1	1	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	0	$-V_{dc}$	V_{dc}
V_5	0	0	1	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	0	$-V_{dc}$	0
V_6	1	0	1	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	V_{dc}	$-V_{dc}$	0
V_7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Tableau 4.1 : tensions simples et tensions composées à la sortie de l'onduleur suivant l'état des interrupteurs

Le principe de cette méthode est la détermination des portions de temps (durée d'ondulation) qui doivent être allouées à chaque vecteur de tension durant la période d'échantillonnage. Cette commande rapprochée permet de déterminer les séquences d'allumages et d'extinctions des composants du convertisseur et de minimiser les harmoniques des tensions injectées dans le réseau et cela tout en utilisant efficacement la tension d'alimentation du côté continu de l'onduleur [23][24].

Dans la plus part des travaux effectués dans le domaine de l'énergie éolienne c'est la MLI vectorielle qui est la plus utilisée puis vient la MLI sinus triangle en deuxième position. Dans notre présent travail nous avons comparé les deux techniques de modulation pour ainsi choisir la plus efficace.

✓ **Implémentation de la modulation vectorielle**

Pour l'implémentation de la modulation vectorielle, on procède à une transformation appelée transformation de Concordia qui consiste à substituer aux trois tensions de phase V_a, V_b, V_c exprimées dans le repère triphasé (abc) leurs composantes V_α, V_β, V_o exprimées dans un système de coordonnées biphasé ($\alpha\beta o$) [23][44][51].

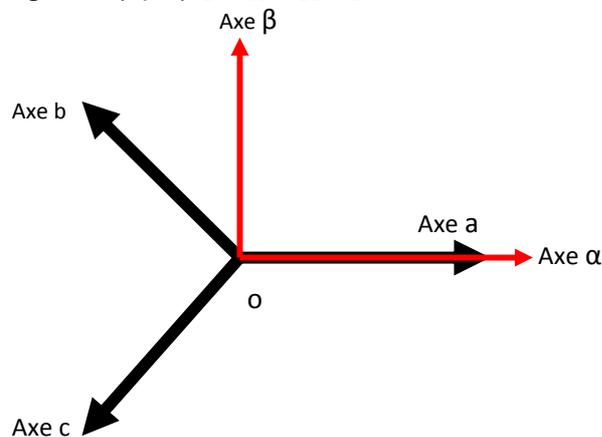


Figure 4.9: Représentation du repère triphasé abc et le repère biphasé $\alpha\beta o$

La relation entre les deux repères est :

$$f_{\alpha\beta o} = C_{\alpha\beta o} f_{abc} \tag{4.19}$$

Tel que :

$$C_{\alpha\beta o} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

$$f_{\alpha\beta o} = [f_\alpha \ f_\beta \ f_o]^T; f_{abc} = [f_a \ f_b \ f_c]^T$$

Note : f peut être soit une tension, un courant ou un flux.

Comme il est décrit sur la figure 4.9, cette transformation est équivalente à une projection orthogonale de $[a \ b \ c]^T$ sur un système bidimensionnel perpendiculaire au vecteur $[1 \ 1 \ 1]^T$ (équivalent au plan $\alpha\beta o$) dans le système de coordonnées triphasé [23][26][44].

Les six vecteurs de commande non nuls obtenus forment un hexagone, l'angle entre deux vecteurs adjacents est de $\frac{\pi}{3}$. Les deux vecteurs nuls (V_0 et V_7) sont à l'origine et impose une tension nulle à la charge. Les huit vecteurs sont appelés vecteurs spatiaux et ils sont notés: $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7$.

La même transformation peut être appliquée à la tension désirée à la sortie de l'onduleur de telle façon à obtenir la tension de référence désirée V_{ref} dans le référentiel $(\alpha\beta o)$ [23][39][44][46][51].

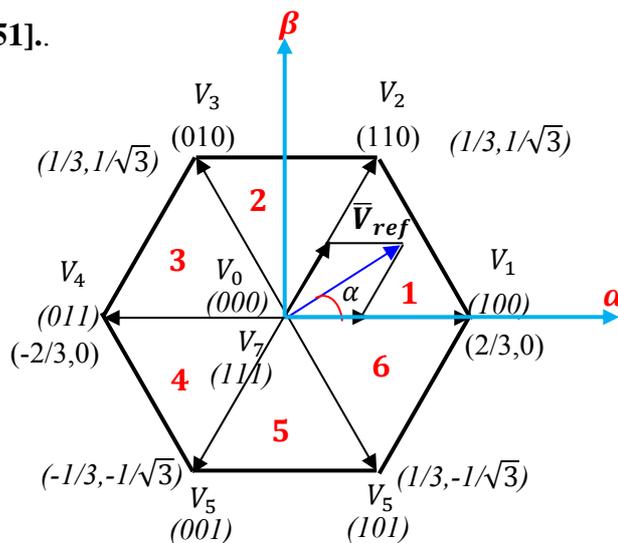


Figure 4.10: représentation des huit vecteurs de tension ainsi que les six secteurs

Donc, la modulation vectorielle peut être implémentée de la manière suivante :

1 étape : détermination des tensions de références V_α , V_β . V_{ref} et l'angle α ;

2 étape : génération des séries d'impulsions T_1 , T_2 et T_0 ;

3 étape : détermination des instants de commutation pour chaque transistor (S1 à S6).

✓ **Étape 1** : la détermination de V_α , V_β . V_{ref} et l'angle α

D'après la figure 4.10 V_α , V_β . V_{ref} et l'angle α sont déterminés comme suit :

$$V_\alpha = V_{an} - V_{bn} \cos 60 - V_{cn} \cos 60 \quad 4.21$$

$$= V_{an} - \frac{1}{2} V_{bn} - \frac{1}{2} V_{cn} \quad 4.22$$

$$V_\beta = 0 + V_{bn} \cos \frac{\pi}{6} - V_{cn} \cos \frac{\pi}{6} \quad 4.23$$

$$= V_{an} + \frac{\sqrt{3}}{2} V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{cn} \quad 4.24$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad 4.25$$

$$|\overline{V_{ref}}| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad 4.26$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_\alpha}{V_\beta}\right) = \omega t = 2\pi f t \quad 4.27$$

f : est la fréquence du fondamental. Axe β

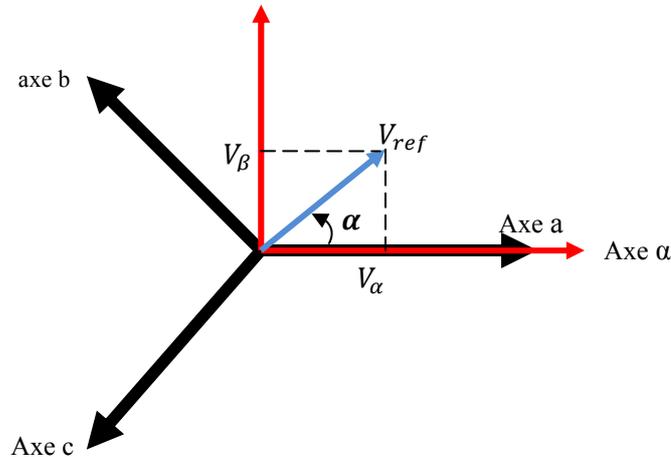


Figure 4.11 : représentation de V_{ref} dans le repère $a\beta$

✓ **Étape 2**: génération des séries d'impulsions T_1 , T_2 et T_0

➤ **Durée des temps de commutation dans le secteur 1**

$$\int_0^{T_z} \overline{V_{ref}} = \int_0^{T_1} \overline{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \overline{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \overline{V}_0 dt \quad 4.28$$

$$T_z \cdot \overline{V_{ref}} = (T_1 \overline{V}_1 + T_2 \overline{V}_2) \quad 4.29$$

$$\Rightarrow T_z \cdot \overline{V_{ref}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} = T_1 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \frac{2}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \quad 4.30$$

Tel que : $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$

$$T_1 = T_z a \frac{\sin(\frac{\pi}{3}-\alpha)}{\sin(\frac{\pi}{3})} \quad 4.31$$

$$T_2 = T_z a \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\frac{\pi}{3})} \quad 4.32$$

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2),$$

$$\text{Tel que : } T_z = \frac{1}{f_z} \text{ et } a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3}V_{dc}} \quad 4.33$$

➤ *Durée des temps de commutation dans un secteur quelconque*

$$\begin{aligned} \diamond T_1 &= \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3}\pi\right) \right) \\ &= \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin\left(n\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \right) \\ &= \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin\frac{n\pi}{3} \cos\alpha - \cos\frac{n\pi}{3} \sin\alpha \right) \end{aligned} \quad 4.34$$

$$\begin{aligned} \diamond T_2 &= \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin\left(\alpha - \frac{n-1}{3}\pi\right) \right) \\ &= \frac{\sqrt{3}T_z|\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(-\cos\alpha \sin\frac{n-1}{3}\pi + \sin\alpha \cos\frac{n-1}{3}\pi \right) \end{aligned} \quad 4.35$$

$$\begin{aligned} \diamond T_0 &= T_z - T_1 - T_2, \\ &(n \text{ allons de } 1 \text{ à } 6 \text{ (égal au nombre de secteurs ; } 0 \leq \alpha \leq 60^\circ \text{)}) \end{aligned} \quad 4.36$$

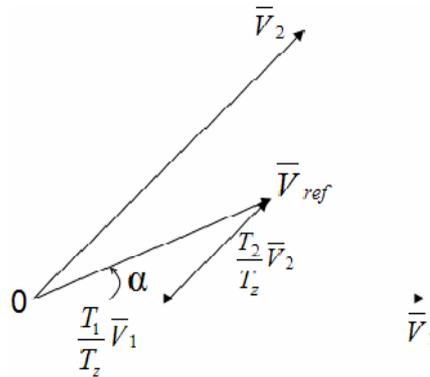


Figure 4.12 : Représentation vectorielle de V_{ref} en fonction de deux tensions adjacentes

✓ **Étape 3:** *détermination des instants de commutation pour chaque transistor (S1 à S6)*

La figure 4.13 montre des portions de temps (durée de l'ondulation) qui doivent être allouées à chaque vecteur de tension à chaque secteur [23][44][46].

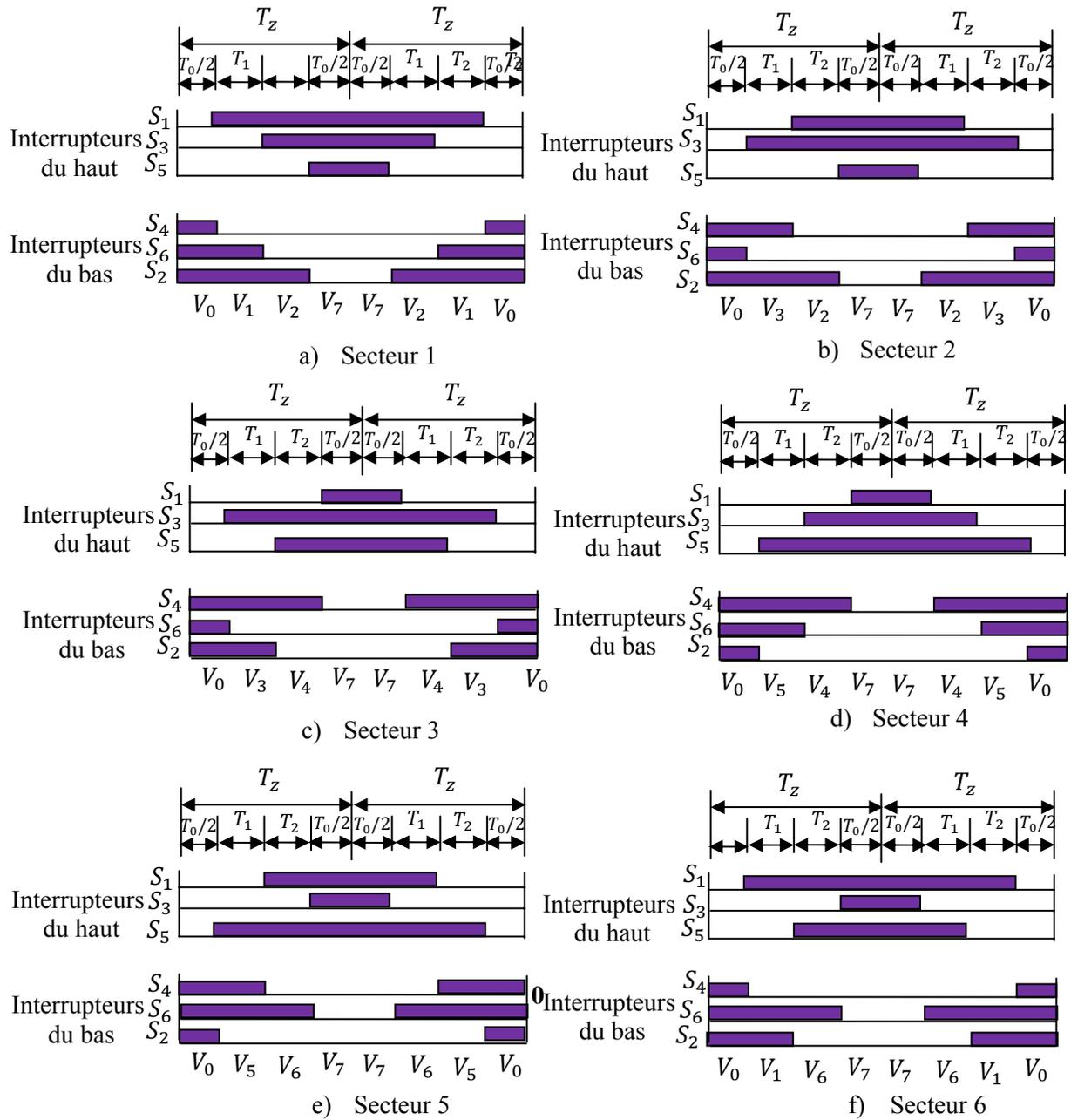


Figure 4.13 : les portions de temps (durée de l'ondulation) qui doivent être allouées à chaque vecteur de tension à chaque secteur

En ce basant sur la figure 4.13, les temps de commutations dans chaque secteur sont résumés dans le tableau suivant [23][44][46]:

Secteurs	Interrupteurs du haut	Interrupteurs du bas
1	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_0/2$
	$S_3 = T_2 + T_0/2$	$S_6 = T_1 + T_0/2$
	$S_5 = T_0/2$	$S_2 = T_1 + T_2 + T_0/2$
2	$S_1 = T_1 + T_0/2$	$S_4 = T_2 + T_0/2$
	$S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_6 = T_0/2$
	$S_5 = T_0/2$	$S_2 = T_1 + T_2 + T_0/2$
3	$S_1 = T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$
	$S_3 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_6 = T_0/2$
	$S_5 = T_2 + T_0/2$	$S_2 = T_1 + T_0/2$
4	$S_1 = T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0/2$
	$S_3 = T_1 + T_0/2$	$S_6 = T_2 + T_0/2$
	$S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_6 = T_0/2$
5	$S_1 = T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_1 + T_0/2$
	$S_3 = T_0/2$	$S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$
	$S_5 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_2 = T_0/2$
6	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0/2$	$S_4 = T_0/2$
	$S_3 = T_0/2$	$S_6 = T_1 + T_2 + T_0/2$
	$S_5 = T_1 + T_0/2$	$S_2 = T_2 + T_0/2$

Tableau 4.2 : les temps de commutations dans chaque secteur

4.2.3 Application de la modulation sin-triangle et la modulation vectorielle pour un onduleur de tension

Dans cette partie du travail nous avons simulé les deux techniques de modulation de largeur d'impulsion à savoir la *MLI vectorielle* et la *MLI sinus triangle*, la connexion du convertisseur à la charge (R,L) est effectuée via un filtre (L,C).

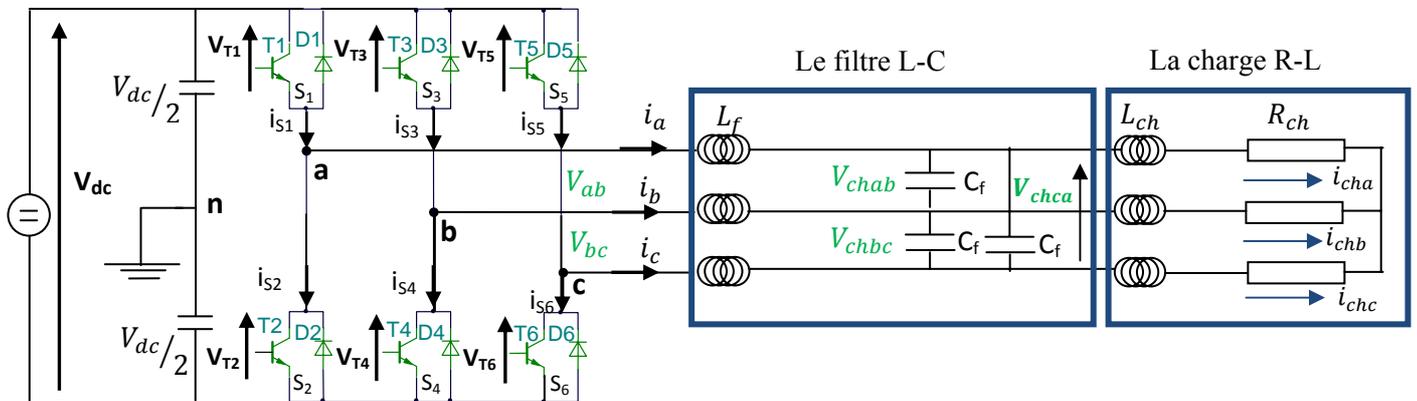


Figure 4.14 : Schéma de l'onduleur de tension connecté à la charge (R,L) via un filtre (L,C).

Les paramètres du convertisseur sont :

- $V_{dc} = 800 \text{ V}$; (tension coté continu)
- $f = 50 \text{ Hz}$, (fréquence du fondamental)
- $f_z = 3.93 \text{ KHz}$, (fréquence de la MLI)
- $a = 0,8$, (indice de modulation)
- $L_f = 800 \mu\text{H}$; $C_f = 400 \mu\text{F}$, (filtre de sortie)

- $R_{ch}=1\Omega$; $L_{ch} = 2mH$, (charge)

Et pour cela nous allons donner le modèle du filtre de sortie ainsi que le modèle de la charge utilisée puis en utilisant Matlab/Simulink, on simule le modèle décrit dans la figure 4.14 et représenter les formes d'ondes pour :

$$V = [V_{ab} \ V_{bc} \ V_{ca}] ; I = [i_a \ i_b \ i_c] ; V_{ch} = [V_{chab} \ V_{chbc} \ V_{chca}] ; I_{ch} = [V_{cha} \ V_{chb} \ V_{chc}]$$

4.2.3.1 Le modèle du filtre R-L et la charge R-L :

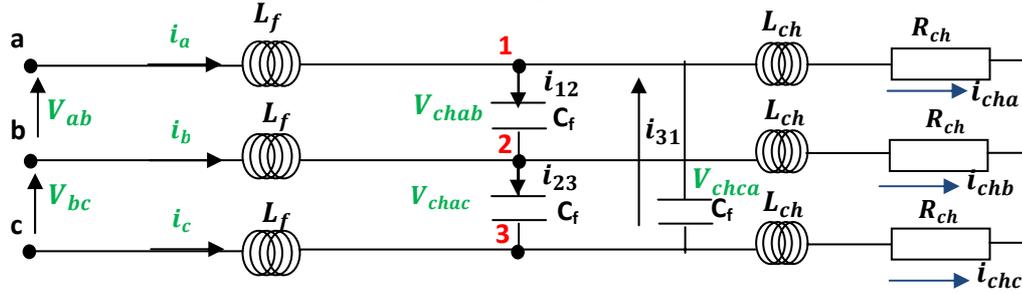


Figure 4.15 : Schéma simplifié du filtre L-C et de la charge R-L.

✓ En utilisant la première loi de Kirchhoff nous obtenons les relations suivantes :

1- Nœuds (1) :

$$i_a + i_{31} = i_{12} + i_{cha} \Rightarrow i_a + C_f \frac{dV_{chca}}{dt} = C_f \frac{dV_{chab}}{dt} + i_{cha} \tag{4.37}$$

2- Nœuds (2) :

$$i_b + i_{12} = i_{23} + i_{chb} \Rightarrow i_b + C_f \frac{dV_{chab}}{dt} = C_f \frac{dV_{chbc}}{dt} + i_{chb} \tag{4.38}$$

3- Nœuds (3) :

$$i_c + i_{23} = i_{31} + i_{chc} \Rightarrow i_c + C_f \frac{dV_{chbc}}{dt} = C_f \frac{dV_{chca}}{dt} + i_{chc} \tag{4.39}$$

Où : $i_{12} = C_f \frac{dV_{chab}}{dt}$; $i_{23} = C_f \frac{dV_{chbc}}{dt}$; $i_{31} = C_f \frac{dV_{chca}}{dt}$

Les équations (4.37), (4.38), (4.39) peuvent être réécrites comme suit :

✓ On soustrait (4.38) de (4.37) :

$$\begin{aligned} i_a - i_b + C_f \left(\frac{dV_{chca}}{dt} - \frac{dV_{chab}}{dt} \right) &= C_f \left(\frac{dV_{chab}}{dt} - \frac{dV_{chbc}}{dt} \right) + i_{cha} - i_{chb} \\ \Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{chca}}{dt} + \frac{dV_{chab}}{dt} - 2 \frac{dV_{chab}}{dt} \right) &= -i_a + i_b + i_{cha} - i_{chb} \end{aligned} \tag{4.40}$$

✓ On soustrait (4.39) de (4.38) :

$$\begin{aligned} i_b - i_c + C_f \left(\frac{dV_{chab}}{dt} - \frac{dV_{chca}}{dt} \right) &= C_f \left(\frac{dV_{chbc}}{dt} - \frac{dV_{chca}}{dt} \right) + i_{chb} - i_{chc} \\ \Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{chab}}{dt} + \frac{dV_{chca}}{dt} - 2 \frac{dV_{chbc}}{dt} \right) &= -i_b + i_c + i_{chb} - i_{chc} \end{aligned} \tag{4.41}$$

✓ On soustrait (4.37) de (4.39) :

$$i_c - i_a + C_f \left(\frac{dV_{Lbc}}{dt} - \frac{dV_{Lca}}{dt} \right) = C_f \left(\frac{dV_{Lca}}{dt} - \frac{dV_{Lab}}{dt} \right) + i_{Lc} - i_{La}$$

$$\Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{chab}}{dt} + \frac{dV_{chbc}}{dt} - 2 \frac{dV_{chca}}{dt} \right) = i_c + i_a + i_{chc} - i_{cha} \quad 4.42$$

Afin de simplifier les relations 4.40 , 4.41, 4.42 nous utiliserons la relation de la somme des tensions de phases égale à zéro:

$$V_{chab} + V_{chbc} + V_{chca} = 0 \quad 4.43$$

En utilisant la relation 4.43 nous pourrions réécrire respectivement les relations 4.40, 4.41, 4.42 sous forme d'équations différentielles de premier ordre :

$$\frac{dV_{chab}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{ab} - \frac{1}{3C_f} (i_{chab})$$

$$\frac{dV_{chbc}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{bc} - \frac{1}{3C_f} i_{chbc} \quad 4.44$$

$$\frac{dV_{chca}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{ca} - \frac{1}{3C_f} (i_{chca})$$

Avec : $i_{ab} = i_a - i_b$; $i_{bc} = i_b - i_c$; $i_{ca} = i_c - i_a$ et $i_{chab} = i_{cha} - i_{chb}$; $i_{chbc} = i_{chb} - i_{chc}$;
 $i_{chca} = i_{chc} - i_{cha}$

✓ En utilisant la deuxième loi de Kirchhoff pour le filtre de sortie nous obtenons les relations suivantes :

$$\frac{di_{ab}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{chab} - \frac{1}{L_f} V_{ab}$$

$$\frac{di_{bc}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{chbc} - \frac{1}{L_f} V_{bc} \quad 4.45$$

$$\frac{di_{ca}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{chca} - \frac{1}{L_f} V_{ca}$$

✓ En utilisant la deuxième loi de Kirchhoff pour la charge nous obtenons les relations suivantes:

$$V_{chab} = L_{ch} \frac{di_{cha}}{dt} + R_{ch} i_{cha} - L_{ch} \frac{di_{chb}}{dt} - R_{ch} i_{chb}$$

$$V_{chbc} = L_{ch} \frac{di_{chb}}{dt} + R_{ch} i_{chb} - L_{ch} \frac{di_{chc}}{dt} - R_{ch} i_{chc} \quad 4.46$$

$$V_{chca} = L_{ch} \frac{di_{chc}}{dt} + R_{ch} i_{chc} - L_{ch} \frac{di_{cha}}{dt} - R_{ch} i_{cha}$$

L'équation 4.46 peut être réécrite comme suit :

$$\frac{di_{chab}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{chab} + \frac{1}{L_{ch}}V_{chab}$$

$$\frac{di_{chbc}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{chbc} + \frac{1}{L_{ch}}V_{chbc} \quad 4.47$$

$$\frac{di_{chca}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{chca} + \frac{1}{L_{ch}}V_{chca}$$

Cependant, les relations 4.44, 4.45 et 4.47 peuvent être réécrites comme suit :

$$\frac{dV_{ch}}{dt} = \frac{1}{3C_f}I - \frac{1}{3C_f}i_{ch} \quad 4.48$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{L_f}V_{ch} - \frac{1}{L_f}V \quad 4.49$$

$$\frac{di_{chca}}{dt} = \frac{1}{L_{ch}}V_{ch} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{ch} \quad 4.50$$

Où :

$$V_{ch} = [V_{chab} \quad V_{chbc} \quad V_{chca}]^T ; I = [i_{ab} \quad i_{bc} \quad i_{ca}]^T = [i_a - i_b \quad i_b - i_c \quad i_c - i_a]^T ;$$

$$V = [V_{ab} \quad V_{bc} \quad V_{ca}]^T ;$$

$$I_{ch} = [i_{chab} \quad i_{chbc} \quad i_{chca}]^T = [i_{cha} - i_{chb} \quad i_{chb} - i_{chc} \quad i_{chc} - i_{cha}]^T$$

Finalement les relations 4.48, 4.49, 4.50 peuvent être réécrites sous forme d'équation d'état comme suit :

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \quad 4.51$$

$$\text{Où : } X = \begin{bmatrix} V_{ch} \\ I \\ I_{ch} \end{bmatrix}_{9 \times 1}, A = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & \frac{1}{3C_f}I_{3 \times 3} & -\frac{1}{3C_f}I_{3 \times 3} \\ -\frac{1}{L_f}I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ \frac{1}{L_{ch}}I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -\frac{R_{ch}}{L_{ch}}I_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{9 \times 9} ; B = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ -\frac{1}{L_f}I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, u = [V]_{3 \times 1}$$

Noter que V_{ch} représente les tensions composées de la charge, I est le courant de sortie de l'onduleur et I_{ch} est le courant de charge est al variable d'état du système, et V représente les tensions composées à la sortie de l'onduleur est la variable de contrôle (u).

4.2.3.2 Spectre de fréquences

Le spectre de fréquence d'une onde non sinusoïdale est une représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur fréquence. La courbe est un graphe de barre; il n'existe aucune fréquence entre les droites représentées.

Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive [31][40]. Deux taux de distorsion harmonique sont distingués [29]:

- le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD_i ,
- le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD_v .

Le premier s'exprime sous la forme :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_{cn}}{I_{c1}}\right)^2}$$

I_{cn} : valeur efficace de l'harmonique de rang n du courant de charge ;

I_{c1} : valeur efficace du fondamental du courant de charge.

Le THD_i ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le THD_v est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_{cn}}{V_{c1}}\right)^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{Z_{sc}^n |I_{cn}|}{V_{c1}}\right)^2}$$

V_{c1} : désigne la valeur efficace de v_{c1}

Ainsi, plus les impédances Z_{sc}^n ($n > 1$) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible. v_{c1} et v_{cn} désignent respectivement la tension au point de raccordement entre le réseau et la charge pour la fréquence fondamentale et harmonique de rang n [29].

4.2.3.3 Application de la MLI vectorielle à l'onduleur de tension

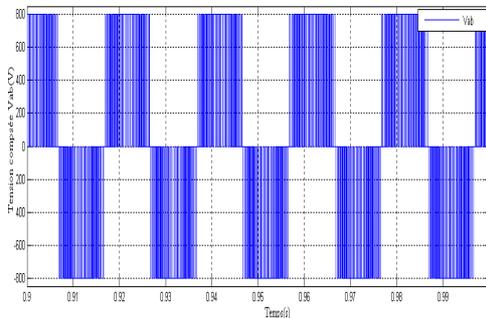


Figure 4.16-a- : Tensions composée Vab à la sortie du convertisseur.

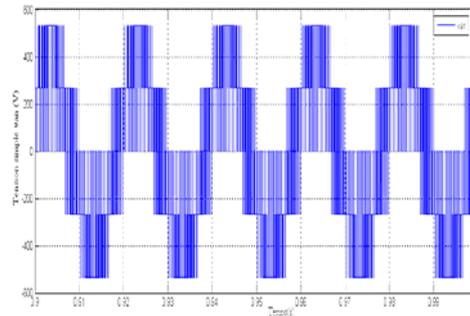


Figure 4.16-b- : Tensions simple van à la sortie du convertisseur.

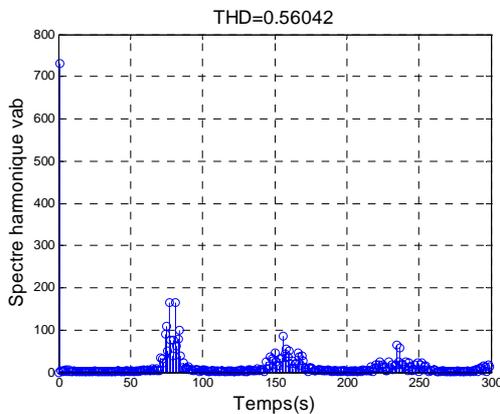


Figure 4.16-c- : Spectre harmonique de la tension composée à la sortie d'une du convertisseur vab.

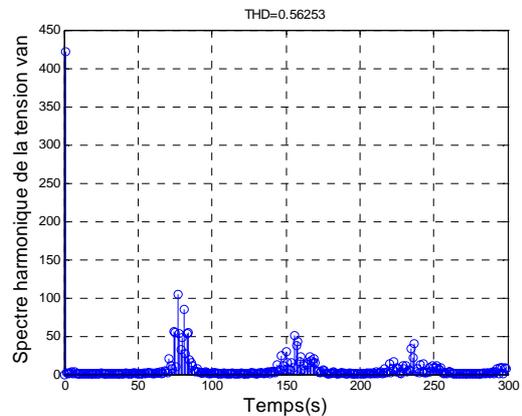


Figure 4.16-d- : Spectre harmonique de la tension simple à la sortie du convertisseur van.

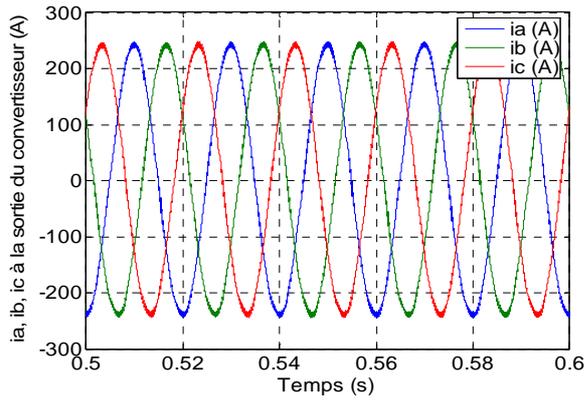


Figure 4.16-e : Courants à la sortie du convertisseur ia, ib, ic.

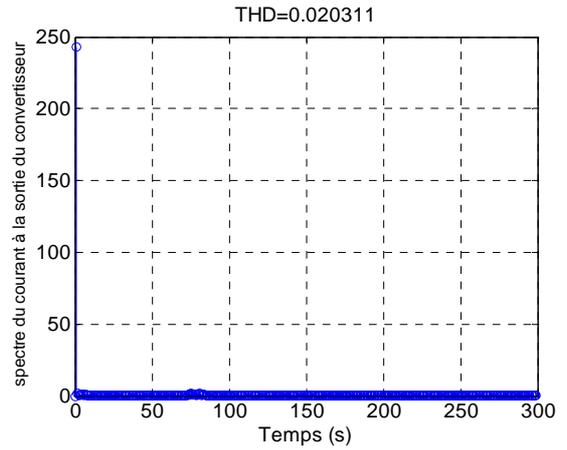


Figure 4.16-f : Spectre harmonique du courants à la sortie d'une du convertisseur ia.

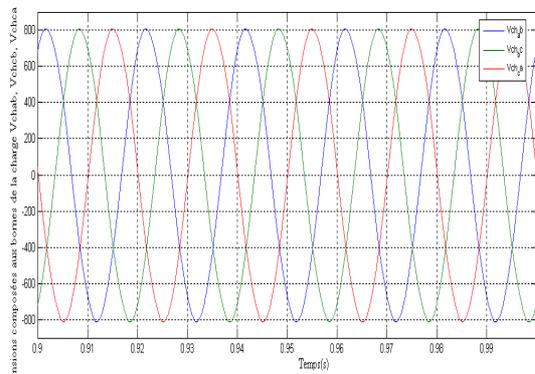


Figure 4.16-g : Tensions aux bornes de la charge Vchab, Vchbc, Vchca.

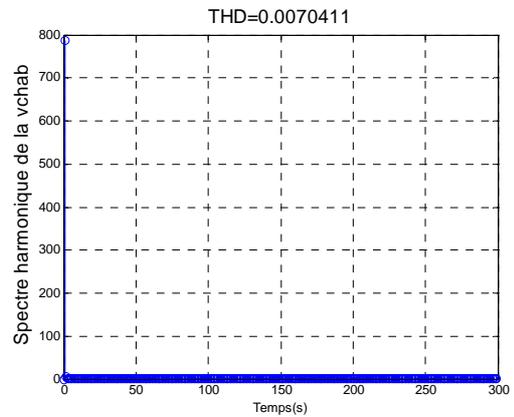


Figure 4.16-h : Spectre harmonique de la tension composée aux bornes de la charge vchab.

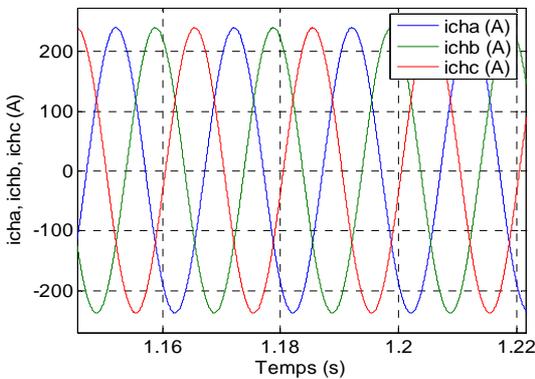


Figure 4.16-i : Courants aux bornes de la charge icha, ichb, ichc.

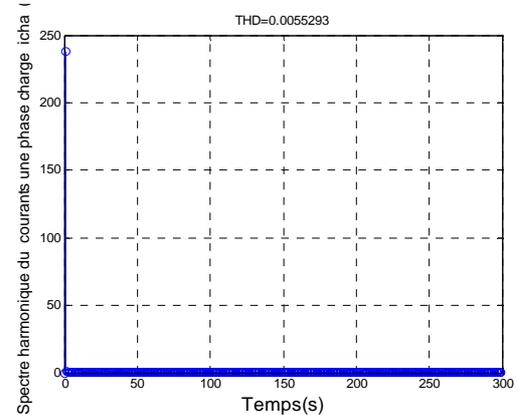


Figure 4.16-j : Spectre harmonique du courants une phase charge icha,.

Figure 4.16: Résultats de simulation de la MLI vectorielle.

4.2.3.4 Application de la MLI sinus triangle à l'onduleur de tension

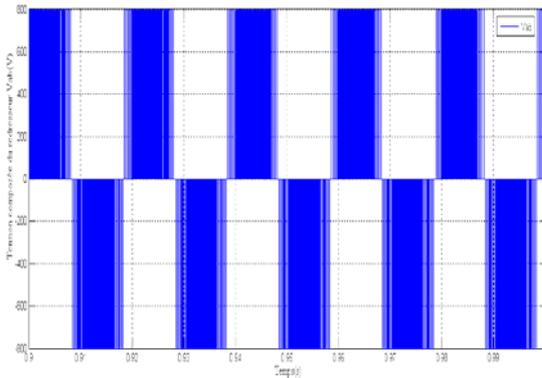


Figure 4.17-a-: Tensions composée V_{ab} à la sortie du convertisseur.

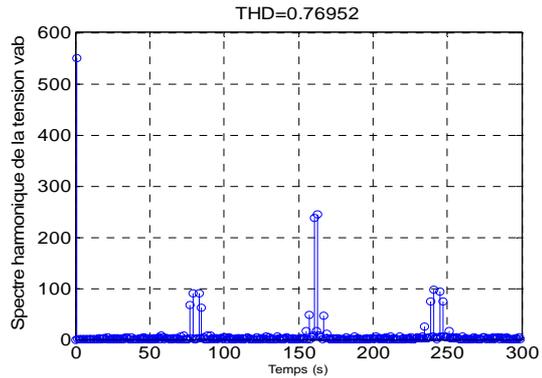


Figure 4.17-b-: Spectre harmonique de la tension composée à la sortie d'une du convertisseur v_{ab} .

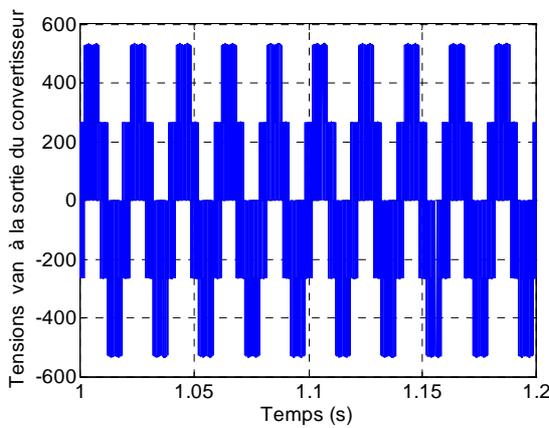


Figure 4.17-a-: Tensions composée V_{ab} à la sortie du convertisseur.

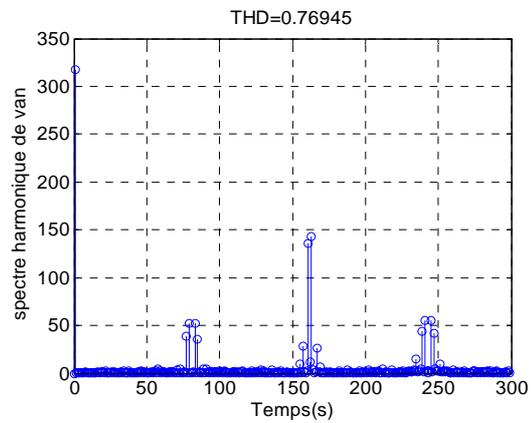


Figure 4.17-b-: Spectre harmonique de la tension composée à la sortie d'une du convertisseur v_{ab} .

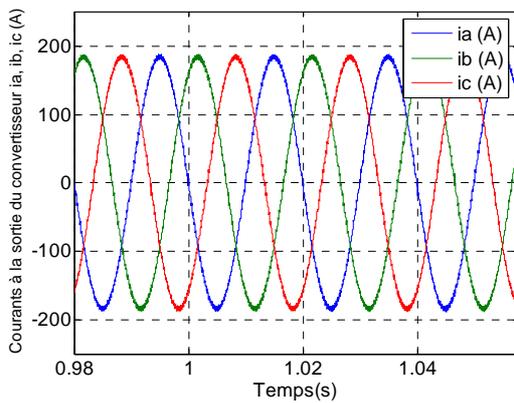


Figure 4.17-c-: Courants à la sortie du convertisseur i_a, i_b, i_c .

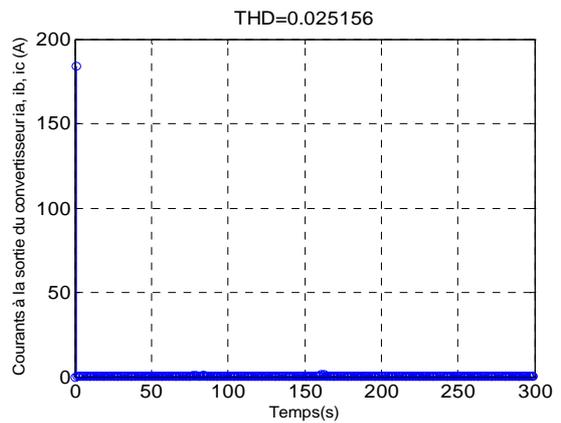


Figure 4.17-d- : Spectre harmonique du courants à la sortie d'une du convertisseur i_a .

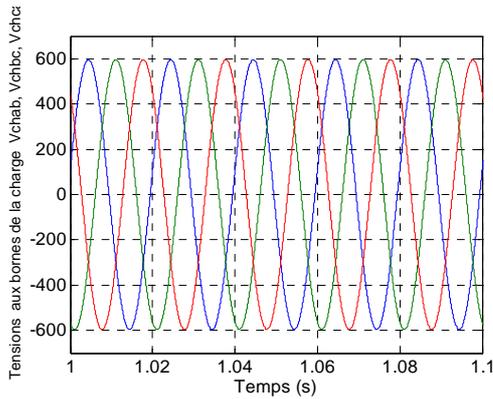


Figure 4.17-e : Tensions composées aux bornes de la charge V_{chab} , V_{chbc} , V_{chca} .

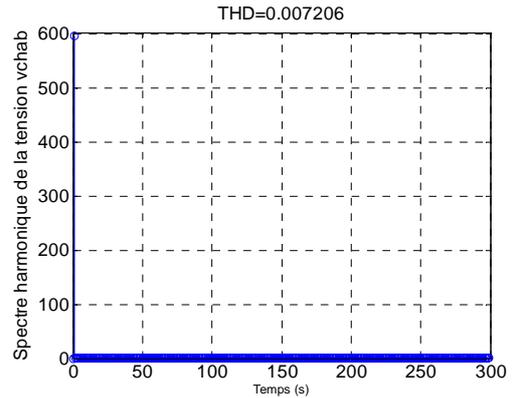


Figure 4.17-f : Spectre harmonique de la tension composée aux bornes charge v_{chab} .

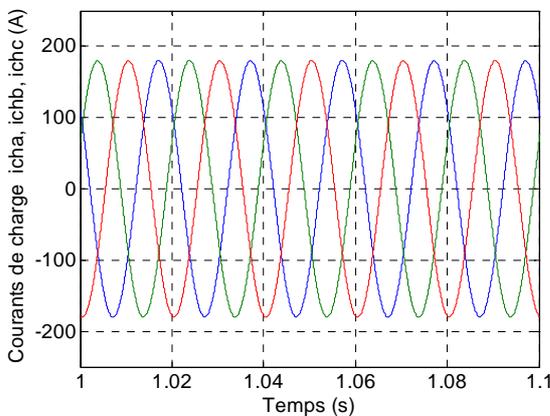


Figure 4.17-i: Courants aux bornes de la charge ich_a , ich_b , ich_c .

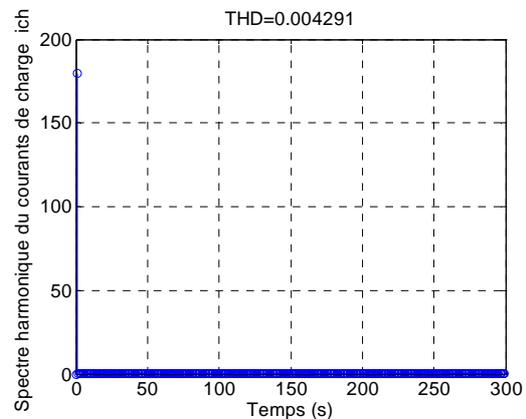


Figure 4.17-j: Spectre harmonique du courants de phase de la charge ich_a .

Figure 4.17: Résultats de simulation de la MLI sinus triangle.

Les résultats des simulations sont résumés dans le tableau suivant :

	Tension composée du convertisseur V_{ab}		Courant à la sortie du convertisseur i_a		Tension composée de la charge V_{chab}		Courant de charge ich_a	
	amplitude	THD	amplitude	THD	amplitude	THD	amplitude	THD
MLI vectorielle	730 V	0.56042	249 A	0.0203	800 V	0.00704	248.5 A	0.0055
MLI sinus triangle	550 V	0.7695	158 A	0.0251	600 V	0.0072	158 A	0.0042

Tableau 4.2 : Résumé des résultats obtenu.

Dans la simulation effectuée, nous constatons que pour les mêmes fréquences d'échantillonnage la MLI vectorielle donne de meilleurs résultats sur le plan valeurs du fondamental et sur le plan harmonique après l'analyse spectrale, ajouter à cela, les temps de simulation sont réduits en utilisant la MLI vectorielle.

Ces résultats justifient notre choix d'utiliser la MLI vectorielle dans la commande du convertisseur utilisé dans le système de conversion d'énergie.

4.3 L'étage redresseur

4.3.1 Redresseur à commutation forcée à facteur de puissance unitaire

Ce sont des convertisseurs statiques de l'électronique de puissance à commutation forcée qui assurent la conversion alternative continue et vice versa. Alimentés par une source de tension monophasée ou triphasée, ils permettent d'alimenter en courant continu sous tension réglable le récepteur branché à leur sortie, tout en assurant un facteur de puissance presque unitaire du côté alternatif [18][34][35][36].

Un redresseur (ou convertisseur alternatif - continu (AC-DC), en anglais *rectifier*) est un dispositif de l'électronique de puissance à commutation forcée destiné à produire des tensions ou des courants continus à partir d'une source alternative de tension ou de courant. Les redresseurs MLI dit redresseurs commandés à absorption sinusoïdale de courant sont finalement des onduleurs utilisés "à l'envers" (comme un redresseur à diode muni d'un filtre) mais en absorbant sur le dit réseau des courants sinusoïdaux, à facteur de puissance unitaire. Ils sont, comme nous l'avons déjà souligné, entièrement réversibles. La contrainte de commande sera donc d'imposer que Q (puissance réactive) et les harmoniques de courants absorbés par l'onduleur soient nuls [18][36].

L'objectif principal de ces convertisseurs c'est de corriger le facteur de puissance du côté alternatif.[18][34][38]

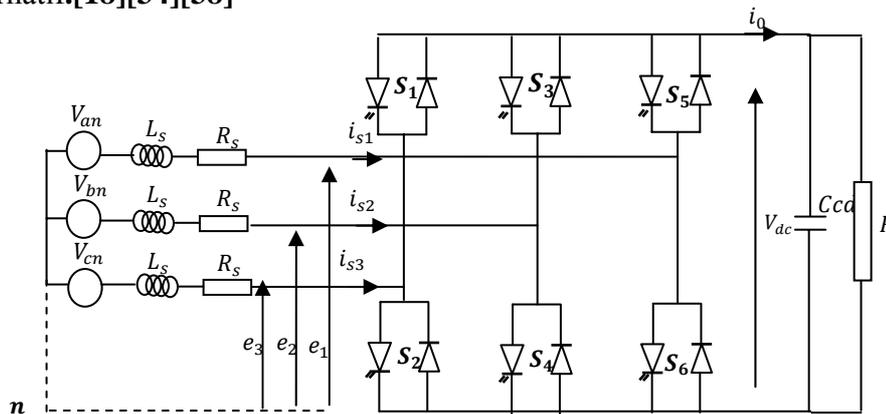


Figure 4.18 : la structure de base d'un redresseur de tension triphasé

4.3.2 Mise en équation du système

Dans l'hypothèse d'avoir un système équilibré, les tensions du côté alternatif sont définies comme :

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= V_m \sqrt{2} \cos(\omega_r t). \\
 V_{bn} &= V_m \sqrt{2} \cos\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}\right). \\
 V_{cn} &= V_m \sqrt{2} \cos\left(\omega_r t - \frac{4\pi}{3}\right).
 \end{aligned}
 \tag{4.37}$$

Où V_m et ω_r sont, respectivement, l'amplitude de la tension simple et la pulsation des tensions rotoriques.

$$L' \text{ hypothèse d'un système équilibré implique : } \sum V_{(a,b,c)n} = 0 \tag{4.38}$$

Les équations des phases (a, b, c) du circuit montré dans la figure 4.18 peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= L_s \frac{di_{s1}}{dt} + R_s i_{s1} + e_1 \\
 V_{bn} &= L_s \frac{di_{s2}}{dt} + R_s i_{s2} + e_2 \\
 V_{cn} &= L_s \frac{di_{s3}}{dt} + R_s i_{s3} + e_3
 \end{aligned}
 \tag{4.40}$$

Où $e_{1,2,3}$ sont les tensions par rapport au point neutre n de la figure 4.18; de manière condensées on utilisera la représentation matricielle suivante :

$$L_s \frac{di_s}{dt} = V_s - R_s i_s - e \tag{4.41}$$

$$\text{Où : } i_s = [i_{s1} \ i_{s2} \ i_{s3}]^T, V_s = [V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^T \text{ et } e = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T$$

L'ensemble des équations de tension modélisant le système peut être écrit dans le repère (d, q) peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 L_s \frac{di_d}{dt} &= V_d - R_s i_d - \omega L_s i_q - e_d \\
 L_s \frac{di_q}{dt} &= V_q - R_s i_q + \omega L_s i_d - e_q
 \end{aligned}
 \tag{4.42}$$

Note : le modèle mathématique de ce type de redresseur est identique à celui de l'onduleur étudié en partie étage onduleur.

4.3.3 Stratégie de contrôle du facteur de puissance unitaire

La plus part des charges industrielles ont un facteur de puissance inductif (elles absorbent de l'énergie réactive) ainsi le courant tend à dépasser la valeur nécessaire à une absorption d'énergie active seule. On réalité, seule l'énergie active est utilisée dans la conversion de l'énergie, un courant de charge excessif représente une perte pour le consommateur qui n'a pas seulement à payer le surdimensionnement du câblage mais aussi l'excès de pertes Joules produites dans les câbles. De plus, les convertisseurs AC-DC conventionnels absorbent des courants alternatifs très déformés par rapport à la fonction

sinusoïdale consommant ainsi une puissance dite déformante qui implique une atténuation considérable du facteur de puissance [18][34].

Les entreprises d'électricité ont de bonnes raisons à ne pas transporter une énergie réactive inutile des alternateurs vers les charges, car leurs alternateurs et réseau de distribution ne peuvent pas être utilisés à plein rendement, et la régulation de la tension dans différents points du réseau devient très compliquée.

Considérons la structure de base d'un redresseur de tension triphasé de la figure 4.18, son circuit principal est similaire à celui d'un onduleur de tension relié au réseau électrique par l'intermédiaire d'une inductance de fuite par phase L_r et une résistance par phase R_r représentant les pertes actives du rotor de la MADA et du redresseur.

La partie continue, C_{dc} représente la capacité du condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie, monté en parallèle avec la charge R qui représente l'onduleur.

4.3.4 Asservissement de la tension de sortie et du courant d'entrée

Pour la commande de ce type de convertisseur ; on distingue deux techniques de commandes (l'une en tension et l'autre en courant) [18][34][36]:

- La première commande est la commande en tension, la plus courante est la modulation sinus-triangle.
- La deuxième est basée sur le réglage de courant d'entrée par la *MLI* à hystérésis, c'est la technique utilisée dans notre travail.

La figure 4.19 représente le schéma de principe d'un redresseur de tension triphasé *MLI* commande en courant [35]. La commande est réalisée en mesurant les courants de phase instantanés et faire en sorte à ce qu'ils soient des courants sinusoïdaux qui seront considérés comme i_{ref} . [35][38][50]

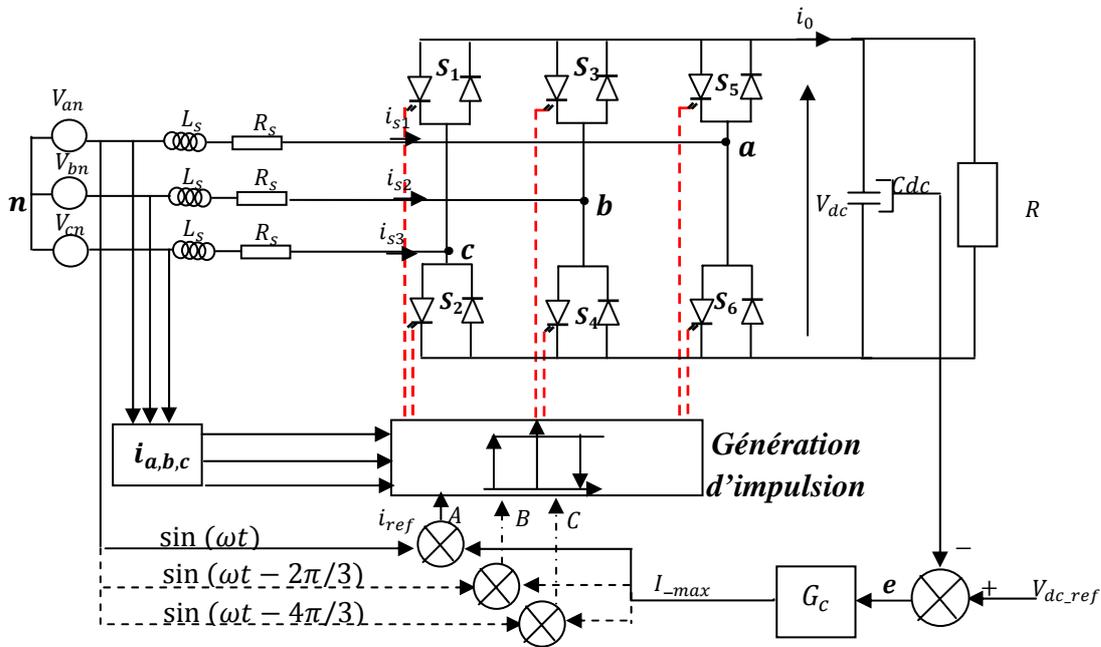


Figure 4.19 : schéma de principe d'un redresseur de tension triphasé MLI commande en courant

L'amplitude du courant de référence est calculée suivant la formule suivante:

$$I_{max} = G_c e = G_c (V_{dc_ref} - V_{dc}) \tag{4.43}$$

Où G_c : représente un régulateur PI, P .

I_{max} sera ensuite comparée à la fonction sinus avec la même fréquence que la source et un angle de déphasage φ désiré. Le signal obtenu sera synchronisé avec les courants des lignes et de là on génère la MLI.

La boucle de réglage qui assure la commande de la tension de sortie du redresseur et la régulation de courant d'entrée fait généralement partie d'une structure de régulation en cascade. Le courant de référence appliquée à l'entrée du comparateur à hystérésis provient d'un régulateur principal qui assure le réglage de la tension de sortie V_{dc} . [18][30][50]

Cette technique de commande est basée sur une comparaison du courant d'entrée $i(t)$ au courant de référence $i_{ref}(t)$. Celle-ci permet d'imposer une différence entre ces deux courants comprise dans une bande à hystérésis $\pm\Delta i$.

Les états des interrupteurs du montage de la figure 4.19 sont déterminés ainsi [18][34]:

Si $i_{ref}(t) - i(t) \geq +\Delta i$ les interrupteurs S_1 et S_4 sont fermés et les interrupteurs S_2 et S_3 sont ouverts.

Si $i_{ref}(t) - i(t) \leq -\Delta i$ les interrupteurs S_1 et S_4 sont ouverts et les interrupteurs S_2 et S_3 sont fermés.

La figure 416 représente la technique de génération des impulsions de la MLI hystérésis [35]

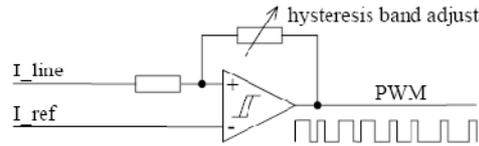


Figure 4.16 : Principe de génération de la commande par hystérésis

Dans ce cas la fréquence de la commande n'est pas déterminée. La valeur max que peut atteindre cette commande est donnée par la formule suivante [35] :

$$F_s^{max} = \frac{V_{dc}}{4hL_s} \tag{4.44}$$

Où h : est la largeur de la bande d'hystérésis.

4.3.5 Synthèse du correcteur PI

La boucle de régulation de la tension du bus continu est nécessaire pour limiter $V_{dc}(t)$, à cause du caractère élévateur du montage. En outre, réguler $V_{dc}(t)$ revient à régler la puissance fournie à la charge. Si l'on veut un réglage linéaire, il faut réguler $V_{dc}^2(t)$ [18][35] puisque la puissance moyenne du coté continu est donnée par :

$$P_c(t) = \frac{V_{dc}^2(t)}{R}$$

D'autre part, la référence du courant $i_{ref}(t)$, est fournie par un multiplicateur, est s'exprime par :

$$i_{ref}(t) = V_e V' \sin(\omega t)$$

L'amplitude de courant $i(t)$ est imposée par la sortie du régulateur de tension pour adapter la puissance absorbée par le redresseur à la puissance dissipée dans la charge. La limitation de V_e fixe la valeur maximale du courant alternatif.

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par [8][52]:

$$FT_{PI} = K_p + \frac{K_i}{p} = K_f \left(1 + \frac{1}{TP}\right) \tag{4.45}$$

De plus, la fonction de transfert en boucle ouverte du régulateur PI associée à la fonction de transfert du coté continu est :

$$FTBO = K_f \left(1 + \frac{1}{TP}\right) \left(\frac{1}{C_{dc}p}\right) \tag{4.46}$$

En prenant $T = C_{dc}$, cette fonction de transfert en boucle ouverte se simplifie et se réduit alors à :

$$FTBO = K_f \left(\frac{1+TP}{T^2 p^2}\right) \tag{4.47}$$

D'où la fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \left(\frac{1+TP}{1+TP+\frac{T^2}{K_f}p^2} \right) \tag{4.48}$$

Pour une première estimation des paramètres du correcteur, on choisit K_f pour que le système se comporte comme un système du premier ordre. Il suffit donc que $T \gg \frac{T^2}{K_f}$; ce qui est facilement obtenu avec un choix convenable du facteur K_f du correcteur. Les paramètres du correcteur PI sont définis comme suit :

$$K_p = K_f ; K_i = \frac{K_f}{C_{dc}} \tag{4.49}$$

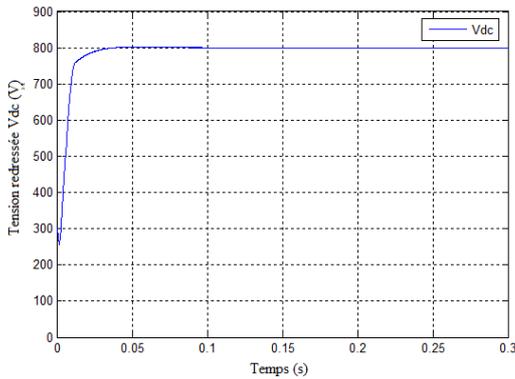


Figure 4.20 : Tension du bus continu V_{dc}

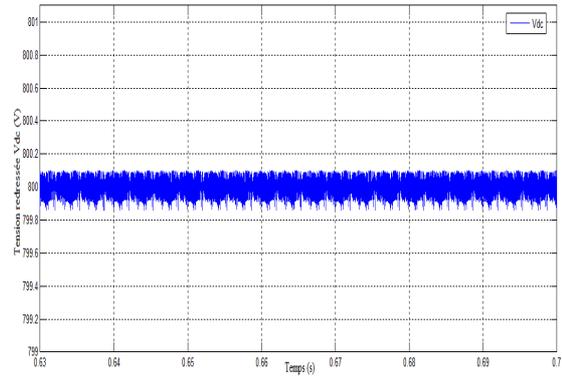


Figure 4.21 : Zoom de la tension du bus continu V_{dc}

4.4 Conclusion

La modélisation de la commande vectorielle élaborée dans le troisième chapitre, nous permet de déterminer les signaux de commande du convertisseur relié au rotor. Ce dernier est alimenté par celui connecté au réseau, nous pouvons évaluer le comportement de la cascade basée sur une machine asynchrone à double alimentation et deux convertisseurs classiques à deux niveaux, l'ensemble est associé à la turbine.

Dans le chapitre cinq nous associerons les différentes parties du système étudiées dans les chapitres précédents à savoir : la MADA de puissance 1,5MW, entraînée à une vitesse variable issue de la turbine, les tensions d'amplitudes de $\sqrt{2} * 690$ imposées par réseau sont appliquées au stator, les tensions rotoriques sont imposées par les convertisseurs statiques.

Chapitre 5

Résultats des simulations sous Matlab/ Simulink

5.1 Introduction

Après que nous avons étudié le système éolien partie par partie dans les chapitres précédents, les résultats du système global seront donnés dans ce présent chapitre.

5.2 Schéma synoptique du dispositif étudié

Le schéma synoptique donné dans la figure 5.1 représente les différentes parties du dispositif étudié à savoir la partie mécanique qui est la turbine ainsi que les dispositifs de transmission, la partie électromécanique qui est une machine asynchrone à double alimentation, la partie électronique de puissance constituée de deux convertisseurs statiques connectés au rotor de la machine.

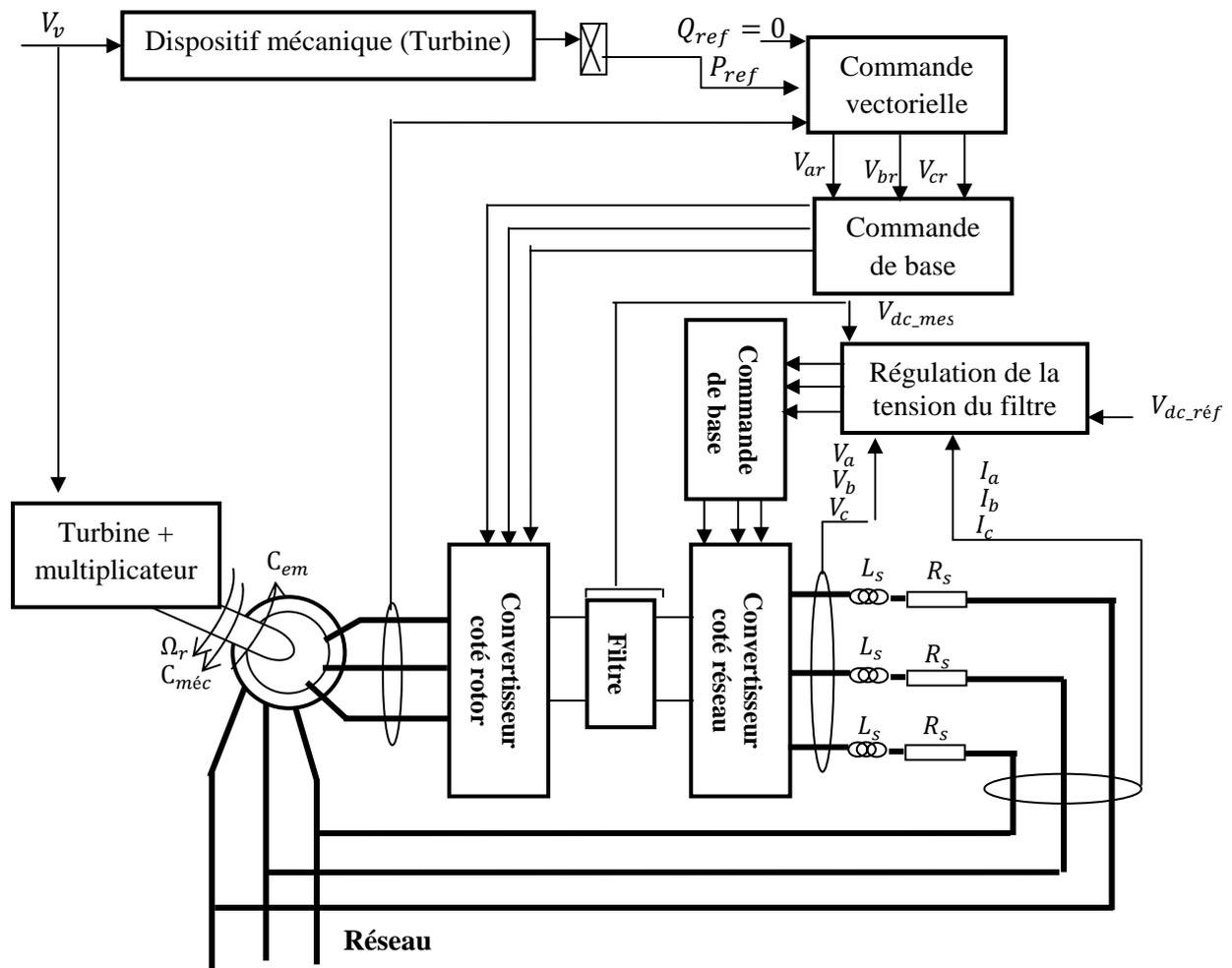


Figure 5.1 : Schéma structurel du système éolien global.

5.3 Résultats de simulation du système complet: Redresseur de courant -Onduleur de tension à deux niveaux – MADA -Turbine

Pour commander l'onduleur à deux niveaux on applique la MLI vectorielle. Le redresseur à deux niveaux est commandé par : la stratégie à hystérésis en courant pour la boucle de courant, et par un régulateur PI pour la boucle de tension. La valeur efficace des courants de références du réseau est imposée par la boucle de tension, mais leur fréquence est celle du réseau électrique 50Hz.

Les paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée, et ceux de la turbine sont donnés en annexe I.

Les différents résultats du système global sous MATLAB SIMULINK sont donnés par les figures ci-dessous.

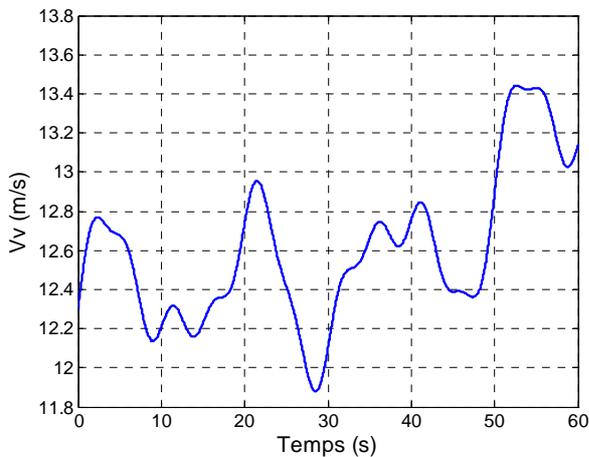


Figure 5.1 : allure du vent simulé

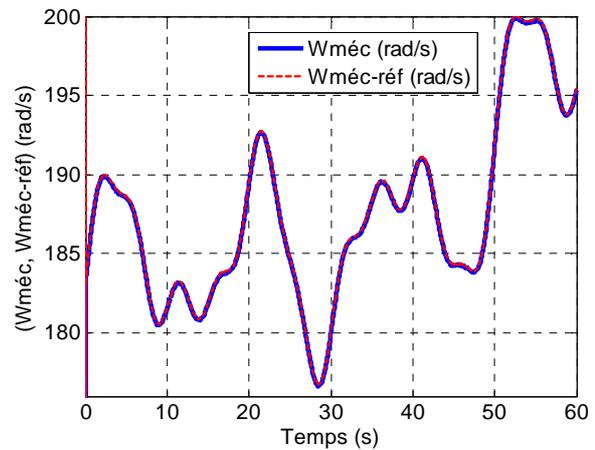


Figure 5.2 : la vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice et la vitesse mécanique de référence.

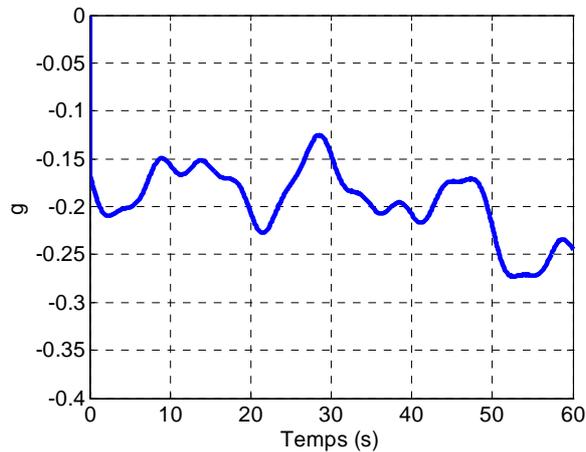


Figure 5.3: Allure du glissement

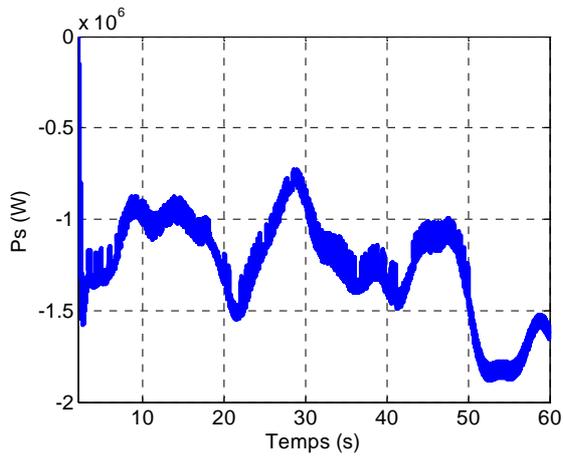


Figure 5.4 : Puissances réactive statorique

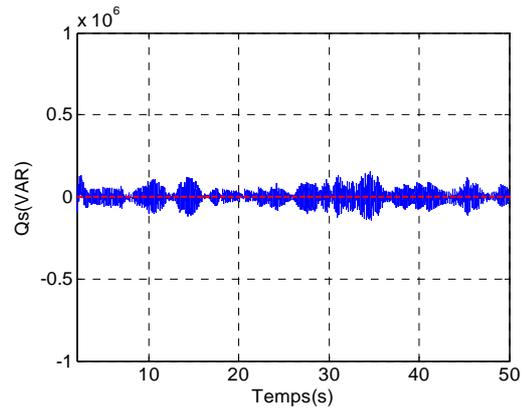


Figure 5.5 : Puissances active statorique

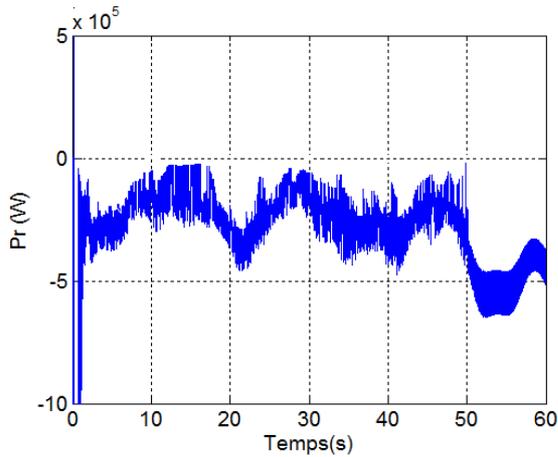


Figure 5.6 : Puissances active rotorique

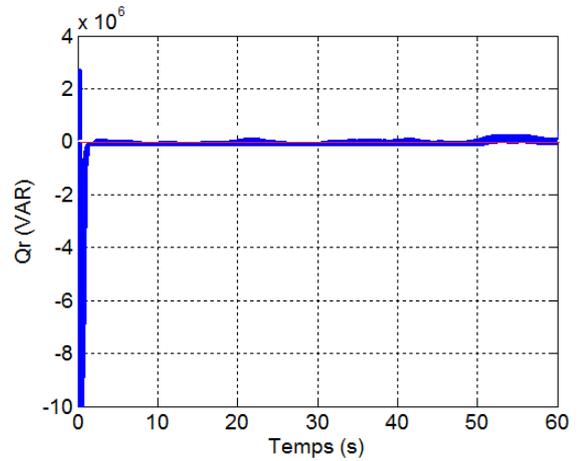


Figure 5.7 : Puissances réactive rotorique

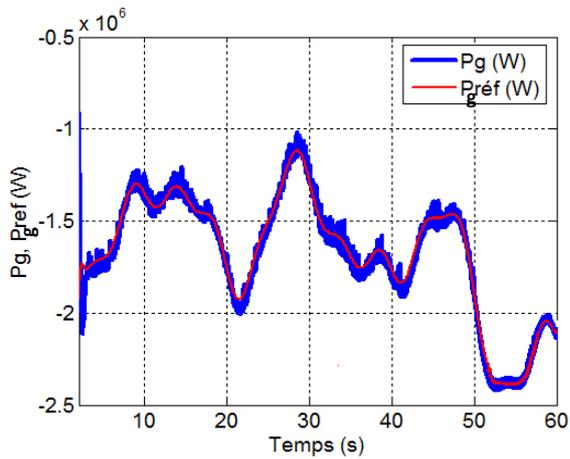


Figure 5.8: Puissances active de l'aérogénérateur

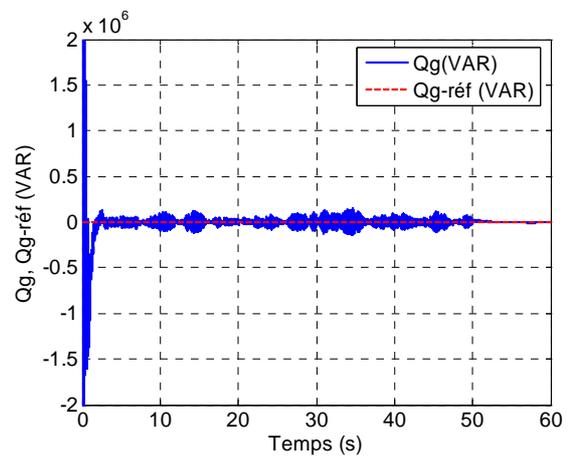


Figure 5.9: Puissances réactive de l'aérogénérateur

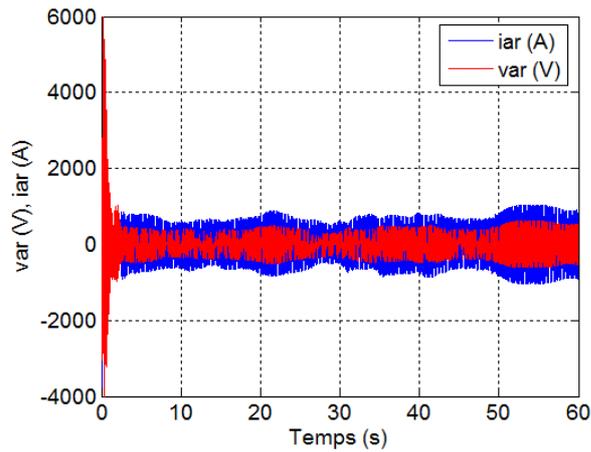


Figure 5.10: Tension et courant rotorique.

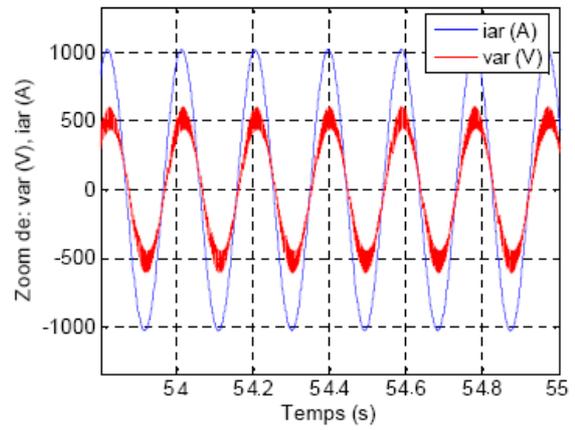


Figure 5.11: Zoom de la tension et du courant rotorique.

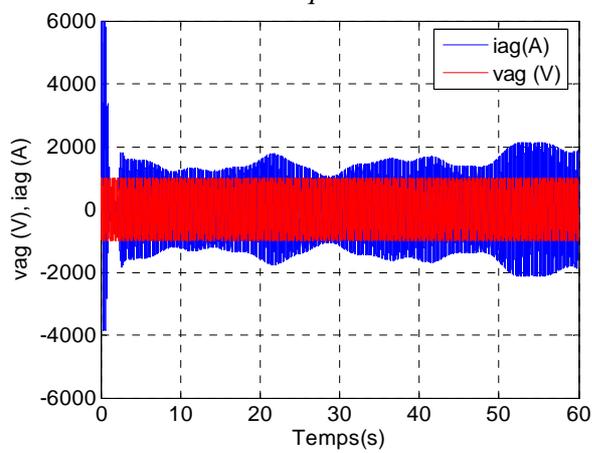


Figure 5.12 : la tension et courant du réseau

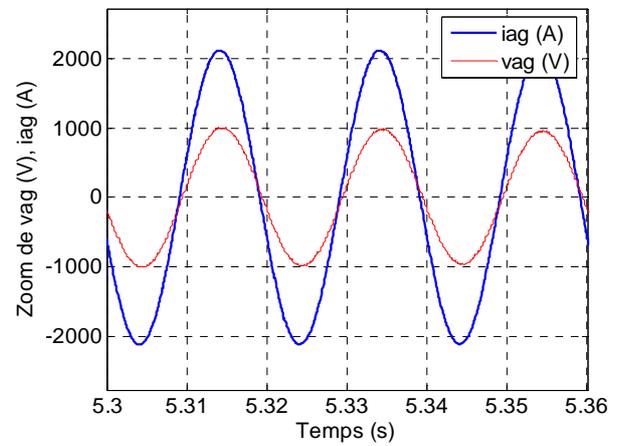


Figure 5.13 : Zoom de la tension et du courant du réseau

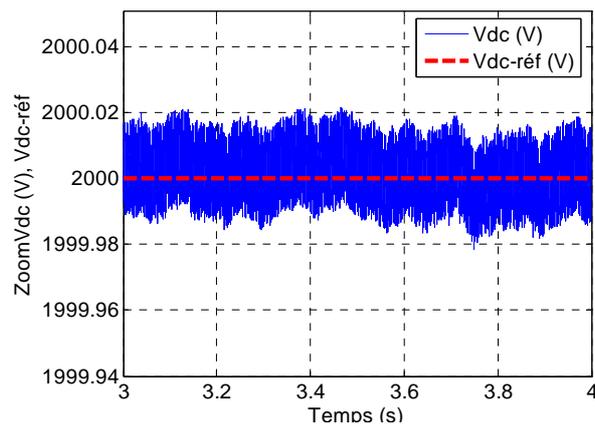


Figure 5.14 : Zoom de la tension du bus continu

5.4 Interprétations des résultats

La vitesse du vent est représentée par la figure 5.1, la vitesse mécanique de la MADA, suit parfaitement celle issue de l'asservissement de vitesse, ce fait est illustré sur la figure 5.2.

La figure 5.3 illustre l'allure du glissement qui est l'image de la vitesse du vent et ($g < 0$).

Les figures 5.4 et 5.5 montrent les puissances active et réactive statoriques produites par le stator de la machine, la puissance active est de signe négatif cela justifie que le stator génère de la puissance active quelque soit la valeur du glissement.

Les figures 5.6 et 5.7 montrent les puissances active et réactive respectivement mises en jeu entre le rotor et le réseau, leurs sens d'écoulement dépendent du signe du glissement, pour ($g < 0$) les puissances sont transmises du rotor vers réseau (mode génératrice hypersynchrone).

Les figures 5.8 et 5.9 montrent les puissances active et réactive produites par l'aérogénérateur, ces dernières suivent parfaitement les grandeurs de références et on remarque que la puissance active est transmise de l'aérogénérateur au réseau et la puissance réactive est nulle.

Les figures 5.10 et 5.11 montrent l'allure de la tension ainsi que celle du courant rotorique et le déphasage entre ces deux grandeurs est nul ($\varphi = 0$).

Les figures 5.12 et 5.13 montrent l'allure de la tension ainsi que celle du courant de l'aérogénérateur.

La figure 5.14 représente la tension du bus continu régulé de manière à avoir une puissance donnée du côté du réseau et de le maintenir à une référence donnée.

5.5 Conclusion

Après que nous avons modélisé et simulé les différentes parties du système partie par partie dans les chapitres précédents, dans ce chapitre nous avons associé toutes les parties, mécanique, électromécanique, convertisseurs, les résultats sont donnés dans les figures ci-dessous. Ces différents résultats sont donnés pour un fonctionnement génératrice hypersynchrone et nous avons obtenu un bon suivi de toutes les grandeurs de références. L'écoulement de la puissance rotorique, dépend du signe de glissement qui est négatif dans notre cas, et celle statorique est totalement indépendante de ce dernier.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, appelée MADA, de son Alimentation et de sa Commande, ainsi que l'apport que pourrait apporter son application dans une chaîne de production d'énergie éolienne.

Pour se faire, dans le premier chapitre, on a présenté un état de l'art sur les différents types d'éoliennes existantes, les différentes génératrices utilisées dans ce domaine. Ensuite on s'est particulièrement intéressé à la machine asynchrone à double alimentation. La structure la plus répandue est celle qui comporte un système de convertisseurs indirects connectés au rotor de la génératrice (MADA) dont le stator est lié directement au réseau électrique.

Après le choix de la génératrice et sa structure d'alimentation, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet du deuxième chapitre ainsi que la mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiée, ces équations nous ont permis d'établir un modèle mathématique équivalent, dont la complexité a été réduite, en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices. Les résultats de simulation de ce modèle sous Matlab/simulink nous confirment la possibilité de la double alimentation grâce à la stabilité des différentes grandeurs de la machine étudiée. Dans ce chapitre la modélisation de la turbine qui entraîne la génératrice a été prise en compte.

La génératrice asynchrone est destinée à la production d'énergie dans le domaine éolien. la notion de puissance sous toutes ces formes est primordiale. Il est donc très utile de raisonner en termes de puissance. Pour cela, la commande vectorielle élaborée dans le troisième chapitre est en puissance active et réactive au niveau statorique. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, où on a exprimé les grandeurs statoriques de la machine asynchrone à double alimentation en fonction des grandeurs rotoriques dans le but du pilotage de la MADA par le rotor. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances active et réactive statoriques par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée.

Dans le quatrième chapitre nous avons étudié les différentes techniques de modulation de largeurs d'impulsion appliquées pour la commande des différentes structures d'onduleur. L'étude de l'asservissement d'un redresseur à MLI, structure onduleur de tension comme dispositif pour générer la source de tension pour l'alimentation de l'onduleur a été effectué.

Dans le cinquième chapitre, on a présenté les résultats de simulation obtenus, ainsi qu'une interprétation de ces derniers.

Une conclusion générale clos notre mémoire.

Annexe

Annexe I

Paramètres de la turbine :

$K=90$;

$R =33$ m.

Paramètres de la MADA:

$R_s=0.012(\Omega)$;

$R_r=0.021(\Omega)$;

$L_s=L_r = 0.0137$ (H) ;

$M = 0.0135$ (H) ;

$P=2$;

$f= 0.071$ (N.m.s/rd) ;

$V_s=690$ (V).

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, H. BEN AHMED** « *Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne* ». JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [2] **Bernard MULTON** « *Production d'énergie électrique par sources renouvelables* » Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D4005, 2003.
- [3] **Adam MIRECKI**, « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* », thèse doctorale, préparée au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH. Unité Mixte de Recherche CNRS N° 5828, soutenue le 5 avril 2005.
- [4] **Liuchen CHANG** « *Systèmes de conversion de l'énergie éolienne* ».IEEE Canadian Review été 2002.
- [5] **Haritza CAMBLONG** « *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génératrice d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variables* ». Thèse doctorale, Ecole nationale Supérieure d'Art et Métiers Centre de Bordeaux, soutenue le 18 décembre 2003.
- [6] **Frédéric POITIERS** « *Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Machine asynchrone à cage autonome. Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau* » thèse doctorale, école polytechnique de l'Université de Nantes, soutenue le 19 décembre 2003.
- [7] **Armand BOYETTE** « *Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* » thèse doctorale, université Henri Poincaré, Nancy I, soutenue le 11 décembre 2006.
- [8] **Boukas EL-KEBIR** « *Système asservis* », Editions de L'école Polytechnique De Montréal, 1995.
- [9] **H. Semmache et al.**, « *Développement des Performances des Systèmes Energétiques dans la Production d'Energie Eolienne* » Laboratoire 'Interaction Réseau Commande', Dpt. électrotechnique, Université Djillali Liabbès, Sidi Bel Abbès. 1999.
- [10] **A. A. Lotfi NEYESTANAK** « *Wind Energy Developments in Manjil and Roodbar (Iran)* » IEEE Canada Electrical Power Conference 2007.
- [11] **Saci TARAFT** « *Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation* » Mémoire de Magister, Université A/MIRA de Bejaïa, soutenu le 14/05/2008.
- [12] **Ludovic LECLERCQ**, « *Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes* ». Thèse doctorale Université de Lille, France, 2004.

[13] **Davide AGUGLIA**, « *Conception Globale des générateurs asynchrones à double alimentation pour éoliennes* ». Thèse doctorale, université Laval (faculté des sciences et de génie), Québec, décembre 2005.

[14] **Jean CHATELIN**, « *Machines électriques, volume X* », traité d'électricité de l'école polytechnique fédérale de Lausanne. Edition GEORGI 1983.

[15] **Boubekeur BOUKHEZZAR**, « *Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de la puissance des éoliennes à vitesse variables* ». Thèse doctorale, université Paris XI, soutenue le 23 février 2006.

[16] **Nicolas LAVERDURE** « *Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires* ». Thèse doctoral, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 9 décembre 2005.

[17] **B. BOUKHEZZAR and H. SIGUERDIDJANE**, "Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines for Power Regulation," in *Proc. 2005 IEEE CCA*. Toronto, Canada, aout, 2005.

[18] **M'hemed BIRAME**, « *commande floue d'un convertisseur AC-DC à UPF en cascade avec un convertisseur DC-DC double étage alimentant un système de biberonnage par supercapacités d'un véhicule électrique* ». Mémoire de magister, université de BATNA (faculté des sciences de l'ingénieur, département d'électrotechnique). Soutenue en 2003.

[19] **Sejir KHOJET EL KHIL**, « *Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) : Optimisation des pertes dans les convertisseurs Reconfiguration de la commande pour un fonctionnement sécurisé* ». Thèse doctoral, de l'institut national polytechnique de Toulouse & de l'école nationale d'ingénieurs de Tunis. Soutenue le 04 Décembre 2006.

[20] **Paul-Etienne VIDAL**, « *Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation* » Thèse doctoral, de l'institut national polytechnique de Toulouse, soutenue le 14 décembre 2004.

[21] **Guy SEGUIER; Francis LABRIQUE; Robert BAUSIERE** « *Les convertisseurs de l'électronique de puissance, tome 4, 2^{ème} édition -La conversion Continu-alternatif* ».

[22] **Aaron SARINANA TOLEDO** « *Commande directe et observation des convertisseurs de puissance : Application à l'onduleur de tension triphasé* ». Thèse doctorale ; Institut national polytechnique Grenoble ; soutenue le 28/11/2000.

[23] **JIN-WOO JUNG, PH.D STUDENT** « *Space vector PWM inverter* » mechatronic systems laboratory department of electrical and computer engineering the Ohio state university. 20/04/ 2005.

[24] **S.RAFA. H.ZEROUG. L.HOCINE. K.BOUDJIT** « *Simulation sur Matlab/Simulink et implémentation sur DSP/FPGA de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents (PMSM) alimenté par un onduleur de tension a Modulation vectorielle (SVM)* ». Laboratoire des systèmes électriques industriels. Faculté d'Electronique et d'Informatique. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. BP N°32 El Alia, Alger, Algérie.

[25] **Tariq MASOOD.CH** : Qatar Petroleum (**Dukhan Qatar**); **Dr. Abdel-Aty Edris** : Manager Power Delivery R & D (EPRI USA); **Prof. Dr. RK Aggarwal** University of Bath

(Bath _ UK); Prof. Dr. Suhail A. Qureshi :University of Engineering & Technology(Lahore Pakistan); **Prof. Dr. Abdul Jabber Khan** Rachna College of Engineering &Technology (Gujranwala Pakistan); **Yacob Y. Al-Mulla** IEEE Chair (Doha Qatar).

«*Space Vector (PWM) Digital Control and Sine (PWM) Pulse Width Modulation modeling, simulations Techniques & Analysis by MATLAB and PSIM (Powersys)*».

[26] **Zhenyu Yu et David Figoli** “*AC Induction Motor Control Using Constant V/Hz Principle and Space Vector PWM Technique with TMS320C240*” Digital Signal Processing Solutions April 1998.

[27] **AMEUR AISSA** «*Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants*», thèse de magister en Électrotechnique Option : *Machines Électriques*, Soutenue le 25/10/2005 Université BATNA.

[28] **G. Guy, et C. Guy**, "*Actionneurs Electriques, Principes Modèles Commande*", Edition Eyrolles, 2000.

[29] **Antti TARKIAINEN**, "*Power quality improving with virtual flux based voltage source line converter* " thèse doctorale, université Lappeenranta des technologies,Finland; Soutenue le 11/03/2005.

[30] **Riku PÖLLÄNEN**, "*Converter flux based current control of voltage source PWM rectifiers- Analysis and implementation*" thèse doctorale, université Lappeenranta des technologies,Finland; Soutenue le 12/12/2003.

[31] **Thierry GOURAUD**, « *Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique* » thèse doctorale, école doctorale sciences pour l'ingénieur de Nantes, soutenue le 7 Janvier 1997.

[32] **Ion ETXEBERRIA-OTADUI**, « *Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – application a la qualité de l'énergie* », thèse doctorale, institut national polytechnique de Grenoble, soutenue le 26 septembre 2003.

[33] **B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed**, "*Aérogénérateurs électriques*", Techniques de l'ingénieur D3960, Novembre 2004.

[34] **Pisit LIUTANAKUL**; "*Stabilité des réseaux embarqués. Interaction puissance – Structure- Commande*" ; thèse doctorale. Institut national Polytechnique de Lorraine.Soutenue le 25/01/2007.

[35] **MUHAMMAD H. RASHID**; Ph.D., Fellow IEE, Fellow IEEE; Professeur et Directeur de l'université de Floride (University of West Florida) "*Power electronics handbook*"; Copyright ; 2001 par -Academic press-.

[36] **Nicolas BERNARD, Bernard MULTON, Hamid BEN AHMED** "*le redresseur MLI en absorption sinusoidale de courant*". Ecole Normale Supérieure de Cachan, Antenne de Bretagne. Campus de Ker Lann – 35 170 BRUZ nom@bretagne.ens-cachan.fr.

[37] Sasikanth Manipatruni ; Vishal R Merani " Control of Voltage Source Converters"
BACHELOR OF TECHNOLOGY Department of Electrical Engineering Indian
Institute of Technology, Delhi INDIA Mai 2005.

[38] J. Rodriguez, Senior Member, IEEE, J. Dixon, J. Espinoza, Member, IEEE, and P. Lezana "PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art".

[39]: Seyed Saeed Fazel "Investigation and Comparison of Multi-Level Converters for Medium Voltage Applications" thèse doctorale, institut polytechnique Berlin, soutenue le 23.08.2007.

[40]: Zhong Du "Active Harmonic Elimination in Multilevel Converters", thèse doctorale, université Tennessee USA, soutenue en mai 2005.

[41] : Farid MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une MachineAsynchrone à Double Alimentation (Applicationà l'énergie éolienne) ». Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique, Soutenu le 30/06/2007.

[42] : Salma EL AIMANI, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » thèse doctorale, université des sciences et technologies de lille, Soutenue le 06/12/2004.

[43] : Kaci GHEDAMSI, « Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence Application à la conduite de la machine asynchrone », Ecole Nationale Polytechnique Laboratoire de Commande des Processus, Soutenue le 14 / 12 / 2008.

[44] : RAMAN NAIR HARISH GOPALA PILLAI "Design And Development Of Embedded DSP Controllers For Power Electronic Applications" Mémoire de magister, université Arlington,Texas, Soutenu Mai 2006.

[45] : Mohamed Adjoudj, Mohamed Abid, Abdelghani Aissaoui,Youcef Ramdani, Houria Bounoua, « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne », Laboratoire IRECOM Faculté des sciences de l'ingénieur,Département d'électrotechniqueUniversité Djillali Liabes, SIDI BEL ABBES. Revue « Nature et Technologie ». n° 02/Janvier 2010. Pages 27 à 34.

[46]: Stephan Meier,"System Aspects and Modulation strategies Of an VDC-Based converter System For Wind Farms" institut royal de technologies, école du genie électrique, Stockholm 2009.

[47]: Carlos E. A. Silva, René T. Bascopé, Demercil S. Oliveira Jr «Three-Phase Power Factor Correction Rectifier Applied To Wind Energy Conversion Systems » IEEE 2008.

[48]: Alain RICAUD « L'électricité Photovoltaïque », SARL CYTHELIA Expertise et Conseil, document de synthèse 2009.

[49] : M. PETIBON Stéphane « *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques* », thèse doctorale, université de Toulouse, Présentée et soutenue le 20 Janvier 2009.

[50] : Tao ZHOU « *Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d'Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau* », thèse doctorale, l'Ecole Centrale de Lille Soutenue le 30 Juin 2009.

[51]: Adrian CONSTANTIN, “*Advanced Modeling and Control of Wind Power Systems*”, these de master, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, juin 2009.

[52]: Marek ZELAZNY, Fouad GIRI, Taieb BENNANI , « *Système asservis : commande et régulation, Tome 2, Synthèse Applications Instrumentation* », édition EYROLLES 1994.

[53 :] Dr. Hermann Scheer « *Vent du Rapport mondial de l'énergie 2009* » ,Mars 2010
<http://www.wwindea.org/home/index.php>

Mots clés :

Energie éolienne, convertisseur statique, machines à induction, analyse harmonique

Résumé :

L'énergie éolienne renouvelable et pure représente une alternative potentielle à d'autres énergie plus polluantes et moins friendly envirenmental. Le convertisseur statique représente une partie essentielle du système d'entraînement électrique de génération de la dite énergie. Reliant ainsi la génératrice au réseau. Sachant de l'existence d'une panoplie de type de convertisseurs dans la pratique, cette étude est dédiée à choisir (ou proposer) parmi les convertisseurs statiques existants celui le plus convenant à cette tache. Une étude détaillée de ce convertisseur ainsi son impacte sur la machine et (ou) le réseau sera présentée.