

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



FACULTE : **Sciences de l'Ingéniorat**
DEPARTEMENT : **Électrotechnique**

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : **Sciences et Technologies**

FILIERE : **Électrotechnique**

OPTION : **Electronique de Puissance**

Thème

***Amélioration de la Qualité de l'énergie dans
Un système de production éolienne
à base d'une machine synchrone a aimant
permanent***

Présenté par:

SOUAIA Tarek

Dirigé par:

Pr. OMEIRI Amar

Jury de soutenance:

- | | | | |
|-----------------|------------|-------|---------------------|
| - SOLTANI Fatma | Président | MCA | Université d'Annaba |
| - OMEIRI Amar | Rapporteur | Prof. | Université d'Annaba |
| - MERABET Leila | Examineur | MCB | Université d'Annaba |

Promotion : juin 2017

Remerciements

Mon remerciement s'adresse en premier lieu à ALLAH le tout puissant pour la volonte et La sante et la patience.

Je tiens aussi à remercier mon encadreur **Mr Omeiri** qui m'a apportée une aide précieuse. Je lui exprime ma gratitude pour sa grand disponibilité ainsi que pour sa compréhension et les encouragements qu'il ma apportés.

Mes remerciement vont aussi à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation et a tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail

A mes parents

A ma femme qui ne m'a jamais lâchée dans les moments difficiles

A mes fils Youcef & Açi

A mes frères

Résumé

La mise en œuvre des énergies renouvelables nécessite une connaissance des Moyens de production et de conversion de l'énergie. Dans ce contexte, deux Systèmes de conversion d'énergie intermittente éolienne est modélisés avec des lois de comportement fines.

La modélisation d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une Génératrice synchrone à aimants permanent(CAP) est présentée. L'utilisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents rend les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesses variables plus attractifs que ceux à vitesses fixes à cause de la possibilité d'extraction optimale de l'énergie dans les différentes conditions de fonctionnement. A cause de la nature fluctuante du vent qui provoque une variation fréquente de la fréquence à la sortie du GSAP, il est nécessaire de lier ce dernier avec la charge par des convertisseurs statiques.

L'utilisation de ces dispositifs d'électronique de puissance engendre des problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques de la charge. La pollution harmonique constatée en sortie a été réduite grâce à un filtre passif permettant d'obtenir un THD < 5 , donc dans les normes internationales, assurant ainsi une bonne qualité d'énergie électrique fournie à la charge.

Liste des Symboles et Notations

Symboles

C_p	Coefficient de puissance aérodynamique
	Masse volumique de l'air
S	Surface active de l'éolienne
V_v	Vitesse du vent
Ω	Vitesse angulaire de rotation
	Rapport de la vitesse périphérique en bout de pale et la vitesse du vent
E_c	Energie cinétique
R_t	Rayon de la surface balayée en m
t	Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s
T_t	Couple de la turbine éolienne
A	Valeur moyenne de la vitesse du vent
u_k	Amplitude de l'harmonique de l'ordre K
w_k	Pulsation de l'harmonique de l'ordre K
i	Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.
J	L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice. C_{em}
	Couple électromagnétique développé par la génératrice. C_g
	Couple issu du multiplicateur.
C_f	Couple résistant dû aux frottements.
f	Coefficient de frottement total du couplage mécanique.
K_p	Coefficient proportionnel du régulateur
K_i	Le gain de l'intégrateur
ξ_n	Facteur d'amortissement
w_n	Pulsation propre
ψ_f	Flux inducteur
L_d	Inductance statorique sur l'axe d
L_q	Inductance statorique sur l'axe q
i_d	Courant statorique selon l'axe d
i_q	Courant statorique selon l'axe q
P	Nombre de paires de pôles
e_d	f.e.m de la machine sur l'axe d

e_q	f.e.m de la machine sur l'axe q
T_e	Constante de temps électrique
(θ)	Transformation de Park
$(\theta)^{-1}$	Transformation inverse de Park
G_0	Gain statique
(t_0)	la tension à l'instant t_0 .
ω_0	La fréquence angulaire (rad /s)
$i_{a,}$	Courants des phases statorique
R_s	Résistance d'une phase d'enroulement statorique
σ	Coefficient de dispersion
T_r	Constante de temps rotorique
$\ \Phi_s\ $	Module du vecteur flux stator
$\ \Phi_r\ $	Module du vecteur flux rotor
θ_{sr}	Angle entre les vecteurs flux stator et flux rotor.
$(\Gamma_{em})_{ref}$	Couple de référence
$\Delta\Gamma_{em}$	Bande d'hystérésis du correcteur
C_i	Contrôleur de courant
P	Puissance active
Q	Puissance réactive

Notations

MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
MPPT	Maximum Power Point Tracking
CCM	Convertisseur côté machine
CCG	Convertisseur côté génératrice
CCR	Convertisseur côté réseau
MAS	Machine asynchrone
MLI	Modulation largeur d'impulsion
THD	Total Harmonic Distortion
DTC	Direct Torque control
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor

Liste des Figures

Figure chapitre I

Figure I- 1 Carte du gisement éolien en Algérie (CDER)	4
Figure I- 2 Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	5
Figure I- 3 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus).....	6
Figure I- 4 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).....	7
Figure I- 5 Eoliennes tripales et multi-pales	8
Figure I- 6 Configurations à axe horizontal.....	8
Figure I- 7 Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de	9
Figure I- 8 Composition d'une éolienne	10
Figure I- 9 Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne	11
Figure I- 10 Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne.....	11
Figure I- 11 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne	13
Figure I- 12 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne	14
Figure I- 13 Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants.....	15
Figure I- 14 f.é.m et inductance cyclique d'une MSRB.....	15
Figure I- 15 Différents types de rotors d'une MSAP	17
Figure I- 16 Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents	17
Figure I- 17 MSAP classique et discoïde.....	18
Figure I- 18 MSAP à rotor discoïde et double stator	19
Figure I- 19 MSAP discoïde avec stator et double rotor.....	19
Figure I- 20 MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor	20
Figure I- 21 MSAP à rotor extérieur	21
Figure I- 22 Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents.....	22
Figure I- 23 Machine synchrone avec redresseur à diodes.....	23
Figure I- 24 Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....	23
Figure I- 25 Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont	24
Figure I- 26 Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI.....	24
Figure chapitre II	
Figure 2-1 : colonne d'air animée d'une vitesse	27
Figure 2-2: Tube de courant autour d'une éolienne.....	28
Figure 2-3 : Vitesse de vent (v) et vitesse tangentielle de l'aubage (ωR_t).....	29
Figure 2-4 : Allures des coefficients C_p et C_m en fonction de la vitesse spécifique et l'angle de calage.....	32

<i>Figure 2-4 : puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent</i>	33
<i>Figure 2-5 : Représentation du système éolien</i>	34
<i>Figure 2-6 : Modèle simplifié de la turbine éolienne</i>	35
<i>Figure 2-7 : synoptique du montage éolien étudié</i>	35
<i>Figure 2-8 : organigramme de simulation de la turbine éolienne</i>	37
<i>Figure 2-9: caractéristiques puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation</i>	
<i>(a) puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent</i>	
<i>(b) puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation</i>	38
<i>Figure 2-10 : Caractéristiques vitesse de rotation, vitesse de vent</i>	39
<i>Figure 2-11 : caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation</i>	41
<i>Figure 2-18 : Résultats de simulation</i>	42
Figures chapitre III	
<i>Figure 3-1: Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux</i>	45
<i>Figure 3-2-a: Circuit magnétique associé à un aimant</i>	45
<i>Figure 3-2-b : Exemple d'une machine synchrone à aimants</i>	45
<i>Figure 3-3 : Détermination du point de fonctionnement</i>	46
<i>Figure 3-6 : Structures d'inducteurs à aimants dans les machines à champ radial.</i>	48
<i>Figure 3-8 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park</i>	49
<i>Figure 3-9 : Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) De Park</i>	50
<i>Figure 3-10: circuit équivalent de MSAP –convention moteur</i>	51
<i>Figure 3-11: Modèle de PARK pour la GSAP</i>	52
<i>Figure 3-13: bloque de simulation d'un gsap en charge</i>	55
<i>Figure 3-14: GSAP sur une charge séparée</i>	58
Figure Chapitre IV	
<i>Figure 4.1 Creux et coupures de tension</i>	61
<i>Figure 4.2 Fluctuations de tension</i>	61
<i>Figure 4.3 Déséquilibre du système triphasé de tension</i>	62
<i>Figure 4.4 Variation de fréquence</i>	63
<i>Figure 4.5 Les harmoniques</i>	63
<i>Figure 4.6 Représentation d'un harmonique</i>	65
<i>Figure 4.7 Filtre passif</i>	70
<i>Figure 4.8 Configuration du filtre hybride de puissance</i>	71
<i>Figure 4.9 Chaîne de conversion d'énergie éolienne connectée avec la charge</i>	72
<i>Figure 4.10 Système étudié en détails</i>	73
<i>Figure 4.11 Représentation du redresseur triphasé à diode</i>	73

<i>Figure 4.12 Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale</i>	74
<i>Figure 4.13 Tensions de phases et tension redressée</i>	75
<i>Figure 4.14 Courants de phases en amont du pont de diodes</i>	76
<i>Figure 4.15 Courant redressé I_{dc} en aval du pont de diode</i>	76
<i>Figure 4.16 Tension redressée avec phénomène d'empiètement</i>	78
<i>Figure 4.17 Schéma électrique du bus continu</i>	78
<i>Figure 4.18 Effet de la capacité de filtrage sur la tension de sortie</i>	78
<i>Figure 4.19 Représentation de l'onduleur de tension</i>	79
<i>Figure 4.20 Principe de commande en MLI sinus-triangulaire</i>	81
<i>Figure 4.21 Circuit équivalent d'un filtre LC</i>	83
<i>Figure 4.22 Schéma équivalent de l'impédance de la charge</i>	86
<i>Figure 4.23 Modèle Simulink de la chaîne de conversion d'énergie éolienne</i>	88
<i>Figure 4.24 Couple électromagnétique</i>	89
<i>Figure 4.25 Vitesse de rotation du GSAP</i>	89
<i>Figure 4.26 Courant simple de la GSAP (phase A)</i>	90
<i>Figure 4.27 Tension simple de la GSAP (phase A)</i>	91
<i>Figure 4.28 Tension en sortie du redresseur</i>	92
<i>Figure 4.29 Courant simple à la sortie de l'onduleur</i>	91
<i>Figure 4.30 Tension simple à la sortie de l'onduleur</i>	91
<i>Figure 4.31 Spectre harmonique de tension avant filtrage</i>	92
<i>Figure 4.33 Tension simple fournie à la charge</i>	93
<i>Figure 4.34 Spectre harmonique de tension après filtrage</i>	93

Sommaire

Chapitre I Etat de l'art sur la conversion de l'énergie éolienne

Introduction générale	1
Introduction	3
I L'énergie éolienne	3
I.1.1 Principe et théorie d'une éolienne	4
I.1.2 Différents types des turbines éoliennes	6
I.1.2.1 Eolienne à axe verticale	6
a) Aéro-générateurs à rotor de Darrieus	6
b) Aéro-générateurs à rotor de Savonius	7
I.1.2.2 Eolienne à axe horizontal	8
I.1.3 Eléments constitutifs d'une éolienne	10
I.1.4 Modes de fonctionnement des éoliennes	11
I.1.4.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	11
I.1.5 Les éoliennes à vitesse fixe	11
I.1.6 Les éoliennes à vitesse variable	12
I.2 Aéro-générateur synchrone	14
I.2.1 Machine synchrone à rotor bobiné	14
I.2.2 Machines synchrones à aimants permanents	15
I.2.2.1 Principe de fonctionnement de la MSAP	17
I.2.2.2 Machine synchrone à aimants permanents à flux axial	18
I.2.2.2.1 Types de machines synchrones à aimants permanents à flux axial ...	18
I.2.2.2.2 MSAP discoïde avec deux stators et un rotor	18
I.2.2.2.3 MSAP discoïde avec deux rotors et un stator	19
I.2.2.2.4 MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor	19
I.2.2.2.5 MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté stator	20
I.2.2.2.6 Machine synchrone à aimants permanents à rotor extérieur	20
I.2.3 Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP)	21
I.2.3.1 Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) Connecté au réseau électrique	21
I.2.3.2 Les éoliennes à base de la génératrice synchrone à aimant permanent en fonctionnement isolé et autonome	22

A. Structure avec redresseur à diodes	22
B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur	23
C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont	24
D. Structure avec redresseur à MLI	24
I.2.4 Avantages des éoliennes à base des machines synchrone à aimants permanents par rapport aux autres types de machines	25
Conclusion	26

Chapitre II Modélisation des turbines éoliennes

II.1 Introduction	27
II.2 Conversion de l'énergie éolienne	27
II.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	27
II.2.2 Loi de Betz	28
II.2.3 La vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio)	29
II.2.4 Coefficient de puissance	30
II.2.5 Coefficient de couple	31
II.2.6 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes	31
II.2.7 Production d'énergie mécanique	32
II.3 Modélisation du système éolien	33
II.3.1 Introduction	33
II.3.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	35
II.3.3 Modèle de la turbine	36
II.3.4 Modèle du multiplicateur	36
II.3.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission	36
II.4 Stratégies de commande de la turbine éolienne	38
II.5 Système de contrôle de l'aéroturbine	40
II.6 Méthodes de recherche du point maximum de puissance	40
II.7 Résultats de simulation	42
II.8 Conclusion	43

Chapitre III Modélisation et simulation de la génératrice à aimant permanent	
III.1 Introduction	44
III.2 Matériaux pour aimants	44
III.3 Modélisation d'un aimant « rigide »	45
III.3.1 Point de fonctionnement d'un aimant	45
III.4 Comparaison entre la machine synchrone classique et la machine synchrone à aimant permanent	47
III.5 Type des MSAP à flux radial	47
III.6 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents	48
III.6.1 Modèle de la MSAP	48
III.6.1.1 Equations électriques	49
III.6.1.2 Equations magnétiques	51
III.6.1.3 Equations mécaniques	53
III.7 Simulation de la GSAP	53
III.7.1 L'influence d'une charge séparée (R_{ch} , L_{ch})	53
III.7.2 Equations d'état	54
III.7.3 Bloc de simulation	55
III.7.4 Résultats de simulation	56
III.8 Conclusion	58
Chapitre IV Qualité de l'énergie électrique fournie par un système éolienne	
IV.1 Introduction	59
IV.2 Paramètres de la qualité de l'énergie produite	60
IV.2.1 Creux et coupures de tension	60
IV.2.2 Fluctuations de tension	61
IV.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension	62
IV.2.4 Variation de fréquence	62
IV.2.5 Harmoniques et inter harmoniques	63
IV.3 Définition des harmoniques	64
IV.4 Interprétation des harmoniques	64
IV.5 Sources des harmoniques et leurs effets	65
IV.5.1 Sources des harmoniques	65
IV.5.2 Effets des harmoniques	67
IV.6 Mesures et prévention des harmoniques	67

IV.6.1 Mesures des harmoniques	67
IV.6.2 Facteur de puissance	68
IV.7 Solutions pour diminuer la pollution harmonique	69
IV.7.1 Filtrage passif	70
IV.7.2 Filtrage actif	70
IV.8 Intégration d'un système éolien avec la charge	71
IV.8.1 Étude de connexion	72
IV.8.1.1 Description du système	72
IV.8.2 Modélisation des éléments de connexion avec la charge	73
IV.8.2.1 Modélisation du redresseur triphasé à diode	73
IV.8.2.2 Modélisation du bus continu	77
IV.8.2.3 Modélisation de l'onduleur (MLI)	78
IV.8.2.4 Modélisation du filtre LC	82
IV.9 Résultats de simulation	88
IV.9.1 Avant filtrage	91
IV.9.2 Après filtrage	93
IV.10 Conclusion	95
Conclusion générale	96

Introduction Générale

Introduction Générale

L'énergie, Un vrai sujet d'actualité que l'univers n'a connue depuis longtemps. Il est clair que notre dépendance aux énergies fossiles ne peut continuer indéfiniment, surtout avec l'épuisement croissant des gisements des ressources énergétiques traditionnelles. Ces dernières, principalement d'origine fossiles contribuent à la détérioration continue de l'environnement et l'écosystème mondial.

Par ailleurs, la demande mondiale en énergie électrique, sans cesse croissante, a contraint certains pays développés à combler leur déficit énergétique par l'utilisation des centrales nucléaires. L'énergie nucléaire a l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique, mais le risque d'accident, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels. Ce qui rend cette énergie de moins en moins attractive pour le futur.

Devant ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à d'autres sources d'énergie non polluantes et sans danger pour l'homme et l'environnement. Ainsi, dans le souci de se prémunir des problèmes environnementaux, dus aux énergies fossiles, tout en s'assurant un approvisionnement continu en énergie, les gouvernements de la majorité des pays du monde se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables : le solaire, l'éolien, la biomasse, la géothermie, la marémotrice...etc.

Actuellement, l'énergie éolienne est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique, aussi bien pour des sites isolées que comme appoint pour les réseaux connectés. Elle peut être une alternative compétitive contribuant à la réduction de la demande de plus en plus galopante de l'électricité.

Le développement et la multiplication de l'utilisation de chaînes de conversion de l'énergie éolienne ont conduit les industriels et les scientifiques à s'investir dans l'amélioration des indices technico-économiques de cette conversion et la qualité de l'énergie fournie.

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude de systèmes de commande d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) à vitesse variable. Ce choix est justifié par l'intérêt que portent les chercheurs et les industriels à ce type de structures d'éoliennes. En effet, le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques permet une meilleure utilisation des génératrices synchrones à aimant permanent et à moindre coût pour la construction de grandes et puissantes éoliennes. Pour ce faire, l'étude en détails d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent est effectuée pour les cas d'un réseau autonome (site isolé) et connectée au réseau électrique. Le fonctionnement en générateur autonome se distingue par ses contraintes et ses spécificités qui sont autres que celles rencontrées dans le cas des centrales éoliennes connectées au réseau de distribution électrique. En effet, la préoccupation principale de ce type de fonctionnement est le maintien de l'amplitude et la fréquence de la tension générée à des valeurs constantes, quelles que soient la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance demandée.

Dans le but d'approfondir chacun des points mentionnés ci-dessus, le mémoire est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art sur les chaînes de conversion de l'énergie éolienne. Il y est décrit les différentes architectures adoptées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique et isolés ou autonomes. L'intérêt de l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne est abordé minutieusement.

Le second chapitre est dédié à l'étude du système de conversion aérodynamique comportant essentiellement les caractéristiques et stratégies de fonctionnement de l'éolienne. Des modèles analytiques de la turbine éolienne et du système de régulation, ont été conçus en utilisant différentes méthodes d'optimisation de puissance.

Le troisième chapitre est consacré à la description et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents à flux radial, essentiellement, l'aspect technologique des aimants permanents avec leur modèle électrique équivalent. Un modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents a été établi et appliqué pour différents modes de fonctionnement.

Le dernier chapitre traite l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique fournie par un système éolien à la charge.

Chapitre I

Etat de l'art sur la

conversion de l'énergie

Introduction

Les ressources énergétiques fossiles proviennent de la combustion des matières premières comme le pétrole, le gaz et le charbon. Ces dernières sont polluantes, leurs réserves déclinantes et malheureusement non renouvelables. Par ailleurs, il existe une forte opposition politique contre le renforcement de l'énergie nucléaire dans de nombreuses parties du monde.

Pour répondre à une demande mondiale continuellement croissante de l'énergie, les industriels s'investissent de plus en plus dans les énergies renouvelables.

Le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable ou l'éolien occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ce qui se traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien.

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants de l'aérogénérateur sont présentés. Les différents types, les stratégies de fonctionnement (vitesse fixe, vitesse variable) et les différentes topologies utilisées pour la conversion éolienne sont abordées. Vu ses avantages incontestés pour la conversion éolienne, la machine synchrone à aimant permanent est particulièrement étudiée en détail dans ce chapitre.

I L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

L'électricité produite par le vent à travers le monde a atteint, à la fin de 2004, 48 GW, représentant 0,57% de l'offre mondiale d'électricité totale. Le chiffre peut ne pas sembler impressionnant, mais par rapport à d'autres technologies d'énergie renouvelable, il devient clair que l'énergie éolienne est la plus prometteuse. A titre d'exemple l'énergie électrique produite par conversion éolienne reste minime sur le marché européen, soit 2,4% de sa production totale d'électricité. Dans sa nouvelle politique énergétique, l'Union européenne a

décidé pour rendre l'énergie éolienne, une source de production majeure d'électricité, avec une part de marché de 12% en 2020 et 20% en 2030.

L'Algérie compte s'investir dans le domaine de la production électrique par conversion éolienne pour atteindre 3% de la production nationale à l'horizon 2027. Dans ce cadre, le groupe Sonelgaz a confié la réalisation d'une première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français Vergnet. L'énergie produite par cette ferme, sera injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar.

Le potentiel éolien en Algérie est très diversifié. La carte de la figure I.1 publiée par le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER) montre que le sud du pays et particulièrement le sud-ouest sont caractérisés par des vitesses qui varient entre 4 m/s et 6 m/s, tandis que les sites côtiers d'Oran, de Bejaïa et d'Annaba, les hauts plateaux des régions de Tiaret et El Kheiter et la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au sud, sont prometteurs en termes de production si la hauteur des éoliennes est bien choisie.

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour l'installation des parcs éoliens pour alimenter certaines régions isolées et leur permettre, grâce à l'énergie éolienne d'avoir une autonomie énergétique.

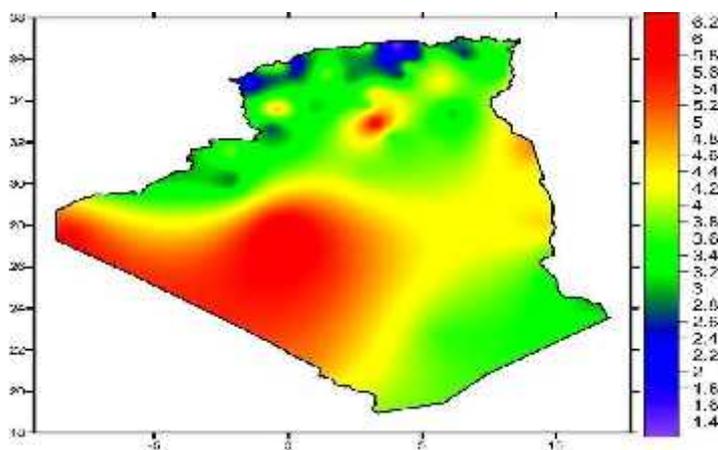


Figure I- 1 Carte du gisement éolien en Algérie (CDER)

I.1.1 Principe et théorie d'une éolienne

Un aérogénérateur, couramment appelé «éolienne», est un système qui capte l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique. D'une manière générale, une chaîne de conversion éolienne est constituée d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors

connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome. Le schéma synoptique est représenté par la figure I.2.

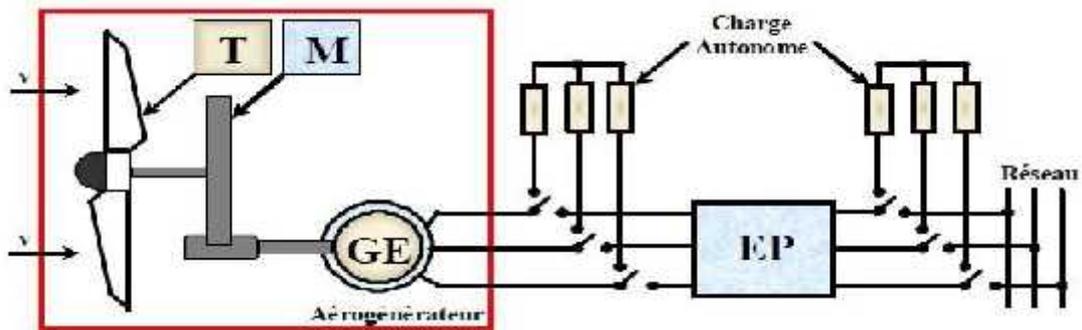


Figure I- 2 Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [07].

La puissance aérodynamique capturée par une turbine s'exprime par [08] :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_p V V^3 \quad (I.1)$$

Où

- C_p est le coefficient de puissance aérodynamique,
- ρ la masse volumique de l'air (environ $1,2 \text{ kg/m}^3$),
- S la surface active de l'éolienne et V_v la vitesse du vent.

Le coefficient C_p ne peut théoriquement pas dépasser la limite dite de Betz:

$$C_{p_limite} = 0.59 \quad (I.2)$$

Une turbine est typiquement caractérisée par sa courbe $C_p = f(\lambda)$ Avec :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_v} \quad (I.3)$$

Où

- Ω est la vitesse angulaire de rotation,
- λ est le rapport de la vitesse (linéaire) périphérique en bout de pale sur la composante normale de la vitesse du vent.

Les turbines sont généralement placées face au vent (par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel). V_v est la vitesse du vent supposée constante (hors turbulences).

I.1.2 Différents types des turbines éoliennes

Les éoliennes se divisent en général en deux grands groupes selon l'axe sur lequel est montée à l'hélice :

- Eolienne à axe verticale
- Eolienne à axe horizontal.

I.1.2.1 Eolienne à axe verticale

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour, mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles : les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924).

a) Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig. I.3). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

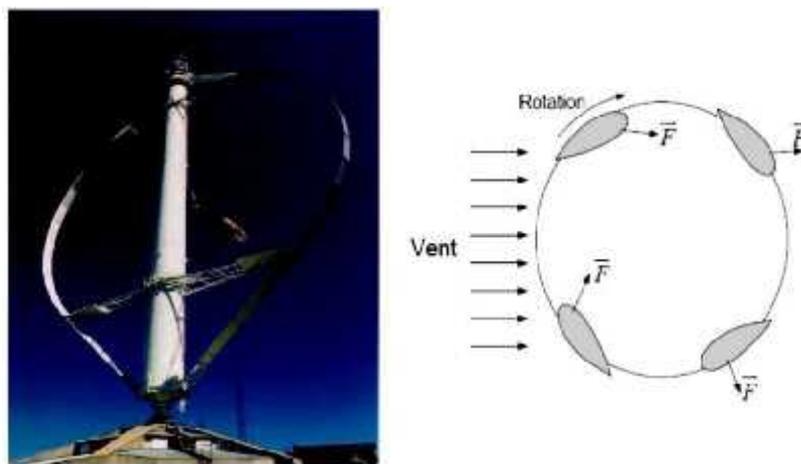


Figure I- 3 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus).

b) Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Figure I.4).

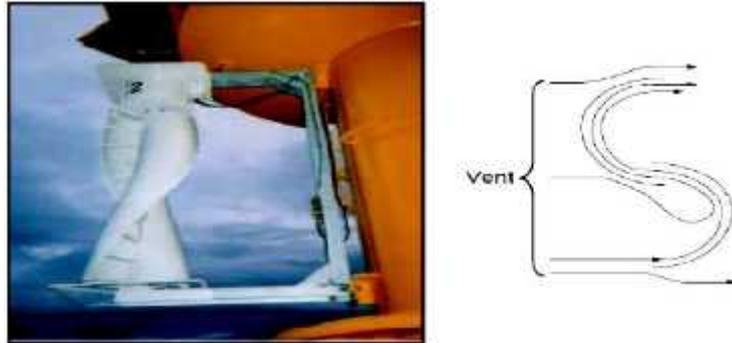


Figure I- 4 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius).

Avantages

- Faible encombrement,
- Intégrable au bâtiment, esthétique,
- Démarre à de faibles vitesses de vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus,
- Système peu bruyant,
- Pas de contraintes sur la direction du vent.

Inconvénients

- Faible rendement,
- Masse non négligeable.

I.1.2.2 Eolienne à axe horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi-pâles (Figure I-5).



Figure I- 5 Eoliennes tripales et multi-pales [11].

La voile peut être placée avant la nacelle (Eolienne « amont ») 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 tout dispositif mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (Eolienne « aval »). 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 qui sont dues au passage des pales derrière le mat. La figure (1-6) montre les deux procédés.

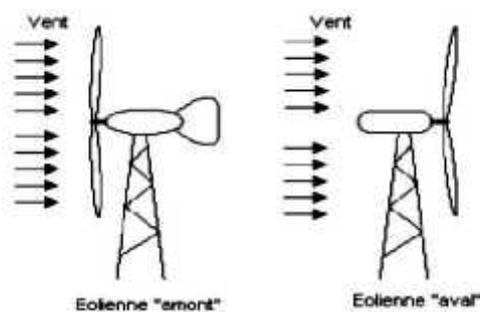


Figure I- 6 Configurations à axe horizontal.

Sur le plan aérodynamique, les différents types de turbines peuvent être comparés selon leurs coefficients aérodynamiques de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ . Il est à noter que :

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

Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les « axes horizontaux » à faible nombre de pales (1, 2,3) (Figure I-7) par rapport aux « axes verticaux » ou aux multi-pales.

Elles sont donc moins sensibles aux variations de λ autour de λ_{opt} .

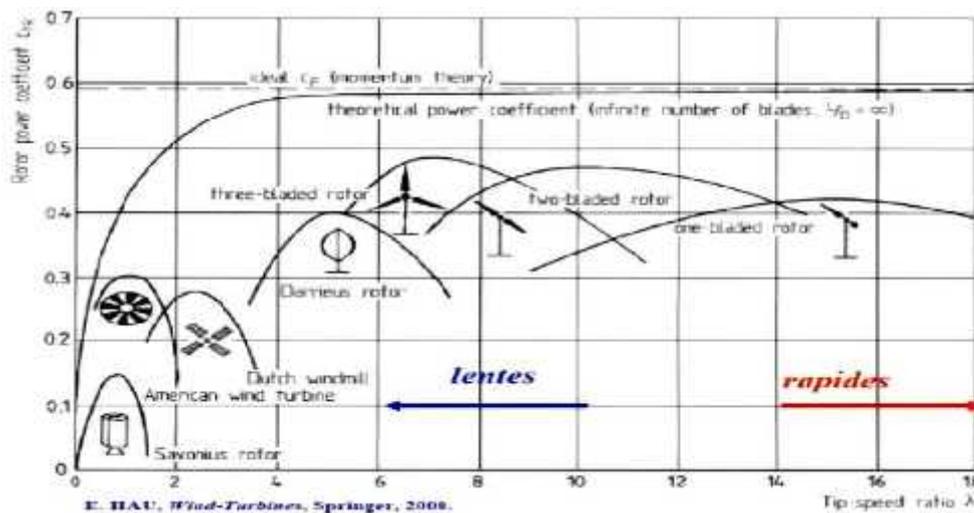


Figure I- 7 Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des Pales.

Avantages

- Coût limité,
- Peu de contraintes mécaniques,
- Grande efficacité.

Inconvénients

- Bruit conséquent,
- Vibrations non négligeables,
- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation

1.1.3 Eléments constitutifs d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments représentés sur la Figure I-8 :

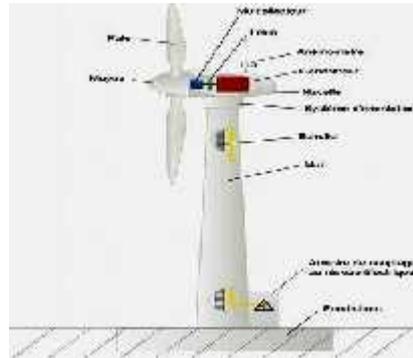


Figure I- 8 Composition d'une éolienne.

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).
- 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 s'ajoute 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 étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

I.1.4 Modes de fonctionnement des éoliennes

I.1.4.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

L'énergie cinétique du vent, captée par les pales, est transformée en énergie mécanique. La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est assurée par un générateur de type synchrone ou asynchrone.



Figure I- 9 Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne.

I.1.5 Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure. I-10). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système d'orientation des pales (pitch contrôle). La machine fonctionne alors en hypersynchronisme à une vitesse $\Omega_s(1 - g)$ avec Ω_s vitesse de synchronisme (souvent $n_s=1500 \text{ tr/min}^{-1}$) et g le glissement, avec $g < 0$ pour un fonctionnement en génératrice et $|g| \leq 1\%$ en moteur. La rotation des pales par des actionneurs, hydraulique ou électrique, permet l'augmentation de l'angle de calage. La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lors de forts vents, cette technique permet la mise en drapeau des pales ($\alpha = 90^\circ$).

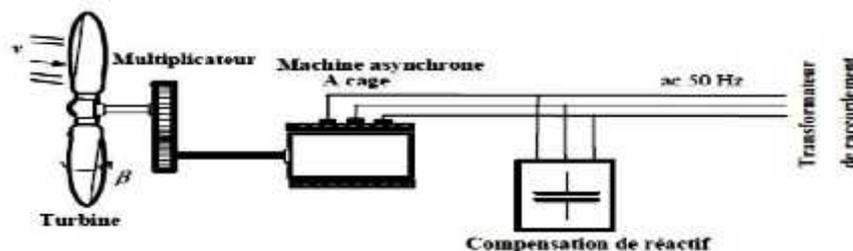


Figure I- 10 Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne.

La conception des turbines éoliennes à vitesse fixe est fortement liée aux caractéristiques aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines de ces parties se situe dans la gamme de la dizaine de millisecondes. En conséquence, en cas de rafales de vent, on peut observer une variation rapide et importante de la puissance électrique générée.

Cette configuration présente les inconvénients suivants :

- Un dispositif consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone,
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité, Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau, Impossibilité de réglage de la puissance générée. Les avantages principaux de ce type :
 - système électrique plus simple,
 - faible coût,
 - pas besoin de système électronique,
 - plus fiable (moins d'entretien).

I.1.6 Les éoliennes à vitesse variable

Selon les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ , il y a nécessité d'un réglage de la vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (λ_{opt}).

La Figure I-11 montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques. Il existe différents ensembles de convertisseurs-machines utilisés ou utilisables dans la génération éolienne d'énergie électrique.

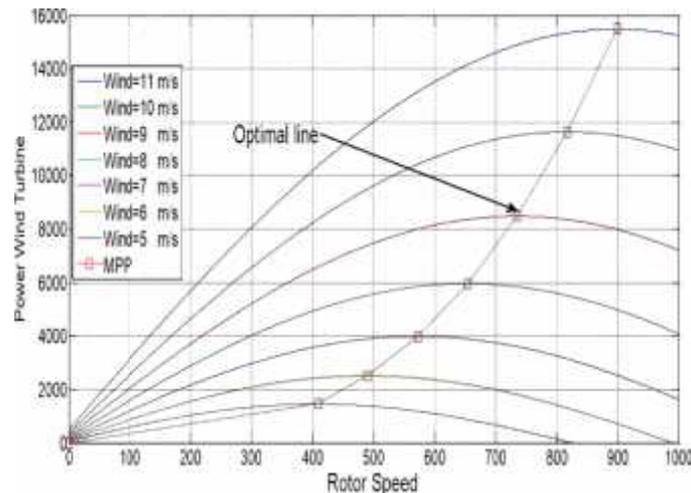


Figure I- 11 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Avantages

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Obtention d'une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité
- Réduction des bruits acoustiques.

Inconvénients

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée par la figure I.12.

Trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées :

- **La zone A** correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance.
- **La zone B** correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer.
- **La zone C** correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale.

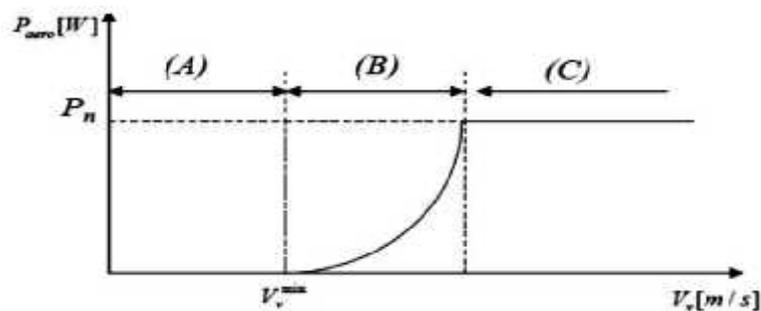


Figure I- 12 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

I.2 Aérogénérateur synchrone

Les deux types de machines utilisées dans les systèmes éoliens sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. Les différents types de la machine synchrone ainsi que les topologies utilisées seront abordées dans cette section.

I.2.1 Machine synchrone à rotor bobiné

Ce genre de machine est constitué d'un rotor qui comporte des bobines. Ces bobines sont alimentées par des courants continus par l'intermédiaire de contacts glissant balais-bagues pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. Il y a deux types de machines synchrones à rotor bobiné : les machines à pôles lisses et les machines à pôles saillants. La machine à pôles lisses a une inductance constante quelle que soit la position du rotor. Par contre, la machine à pôles saillants a un entrefer magnétique variable suivant la position des

pôles, ce qui entraîne une variation d'inductance. L'alternateur d'automobile à griffes est considéré comme une machine à pôle saillant.

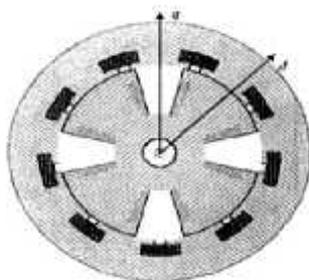
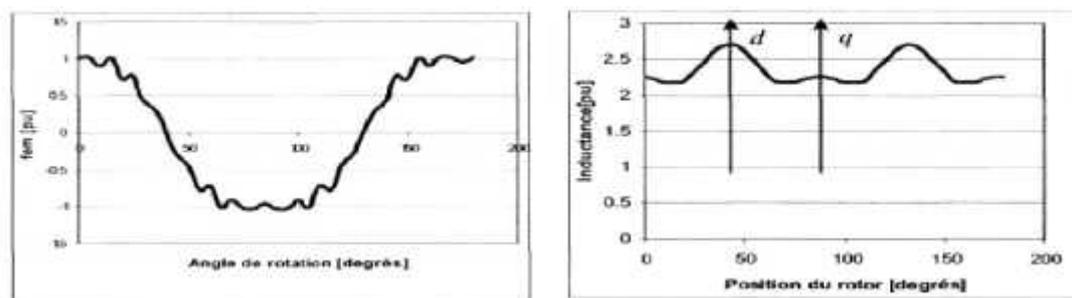


Figure I- 13 Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants.

Dans l'exemple de la figure I.14, il est à remarquer que la variation de la valeur de l'inductance, selon l'angle de rotation, est relativement faible bien que cette structure soit à pôles saillants, bien que l'inductance selon l'axe d soit plus grande que l'inductance selon l'axe q, contrairement aux machines à aimants permanents.



a) *Forme de la f.é.m*

b) *Variation de l'inductance cyclique*

Figure I- 14 f.é.m et inductance cyclique d'une MSRB.

I.2.2 Machines synchrones à aimants permanents

Aujourd'hui, les machines synchrones représentent une partie importante du marché des convertisseurs électromécaniques d'énergie et couvrent une gamme de puissance très large qui s'étend de quelques MW jusqu'à 1GW environ. Traditionnellement, les fortes puissances restent le domaine réservé pour la production d'électricité. En fonctionnement moteur, en revanche, les puissances installées dépassent rarement quelques dizaines de MW. Le moteur synchrone fonctionnant en vitesse variable, le plus puissant connu à ce jour, à une puissance d'environ 100 MW, il est conçu pour une soufflerie de la NASA.

Une machine synchrone est une machine électrique dont les vitesses de rotation du rotor et du champ magnétique tournant du stator sont égales. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est génère soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position de ce champ est alors fixe par rapport au rotor, ce qui entraîne le synchronisme entre le champ magnétique tournant statorique et le rotor. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques.

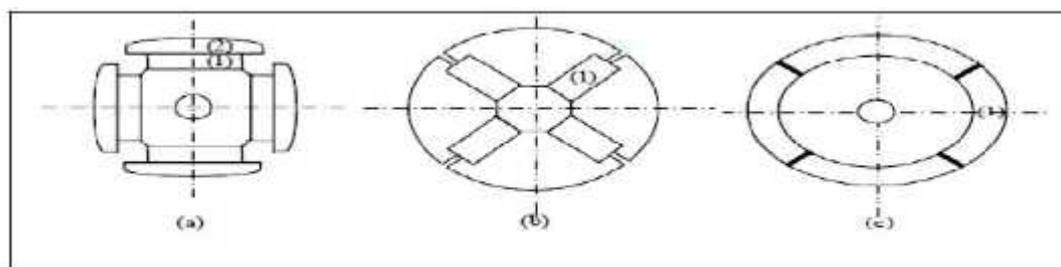
$$\omega_r = \frac{\omega}{p} \quad (\text{I.4})$$

Le stator, partie fixe de la machine, où sont logés est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de $\frac{2\pi}{3}$ Ces enroulements sont reliés à une source d'alimentation électrique triphasée.

Le rotor, partie mobile de la machine, est composé d'aimants permanents. Les aimants permanents apportent beaucoup de simplicité comme l'élimination des balais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable. Le rotor possède différentes configurations. La figure (I.15) montre trois cas typiques pour un rotor à tetrapolaire :

- Une configuration du rotor à pôles saillants possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux (Fig. I.15.a). Les aimants permanents sont magnétisés dans le sens radial.
- Les aimants permanents sont disposés radialement (aimants noyés dans le rotor). Les aimants sont magnétisés tangentiellement (Fig.I.15.b).
- Les aimants permanents sont distribués uniformément sur la surface cylindrique du rotor.

L'aimantation des aimants est radiale Fig.1.15.c).



- a) aimants permanents (1) et pièce polaire saillante (2), b) aimants permanents (1) noyés,
c) aimants permanents (1) distribués sur la surface du rotor.

Figure I- 15 Différents types de rotors d'une MSAP.

I.2.2.1 Principe de fonctionnement de la MSAP :

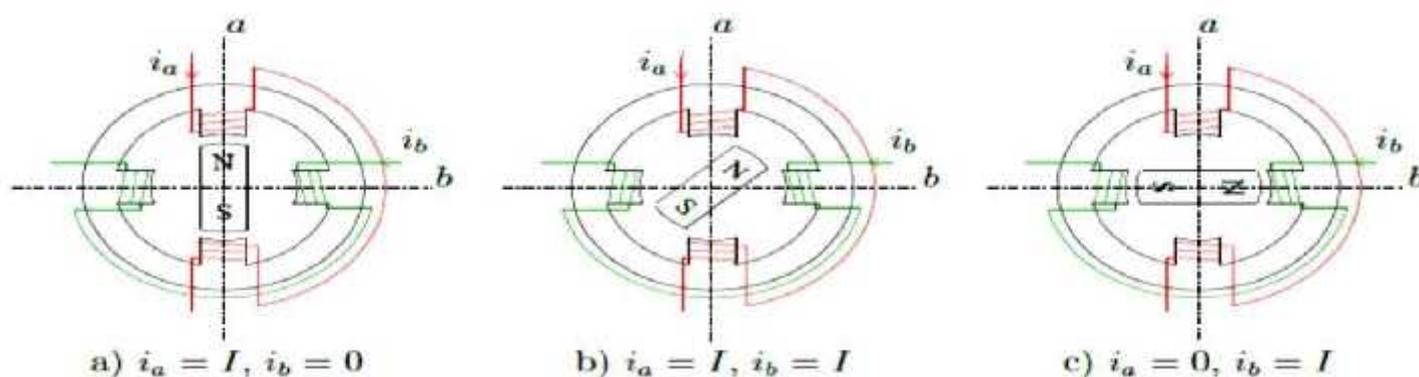


Figure I- 16 Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents.

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Le champ créé par les enroulements du stator interagit avec les aimants du rotor et oriente ce dernier. La Figure I.15 représente un moteur ayant un rotor bipolaire et un stator tétrapolaire. Les phases a et b sont portées par des enroulements opposés. La présence de courants dans les phases oriente le rotor. On définit un “pas” élémentaire p comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à la suivante. Nous obtenons pour cette structure $p = 90$. Ceci correspond au passage de la figure I.16.a à la figure I.16.c. Les demi- pas sont obtenus en alimentant deux phases à la fois (figure I.16.b). De nombreux moteurs sur le marché utilisent ce genre de structure.

I.2.2.2 Machine synchrone à aimants permanents à flux axial

Cette machine possède la particularité d'avoir un champ magnétique axial contrairement à la machine synchrone classique où le champ est radial (figures I.17-18) . L'interaction engendrée par le courant traversant une bobine statorique, et le flux créé par les aimants permanents, produit une force magnétomotrice sur la périphérie du rotor qui le fait tourner.

I.2.2.2.1 Types de machines synchrones à aimants permanents à flux axial

Parmi les machines synchrones à aimants permanents à flux axial, on trouve:

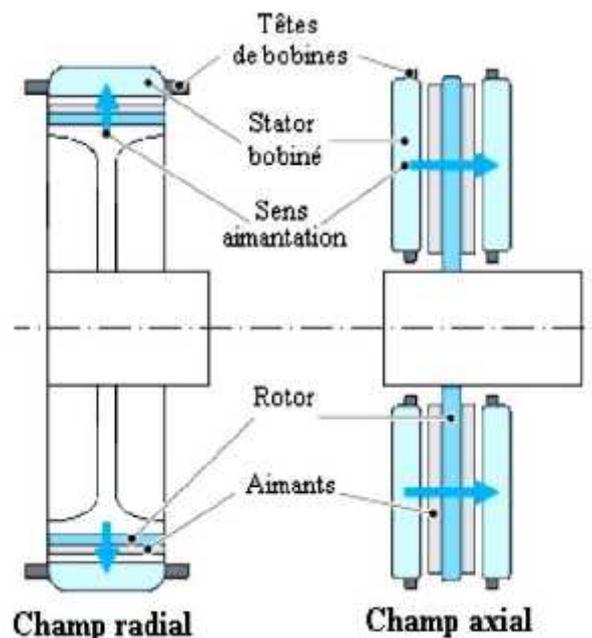


Figure I- 17 MSAP classique et discoïde.

I.2.2.2.2 MSAP discoïde avec deux stators et un rotor

La structure de cette machine est illustrée sur la figure I.18. Elle est composée d'un disque rotorique entouré par deux disques statoriques . Le disque rotorique est constitué d'un circuit magnétique torique portant les aimants permanents sur une ou deux faces. Le disque statorique est constitué d'un circuit magnétique torique à section rectangulaire portant les bobinages statoriques. Ces derniers peuvent être enroulés autour du tore statorique, ou encore, ils peuvent être logés dans des encoches disposées radialement tout au long de l'entrefer. Cette structure axiale permet de réaliser une machine modulaire en disposant plusieurs étages les uns à côté des autres et en les connectant en parallèle.

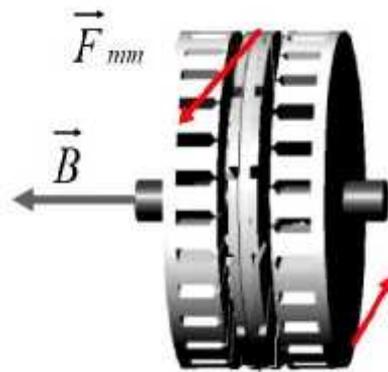


Figure I- 18 MSAP à rotor discoïde et double stator.

I.2.2.2.3 MSAP discoïde avec deux rotors et un stator

Cette configuration consiste en un disque statorique entouré par deux disques rotoriques comme le montre la Figure I.19.

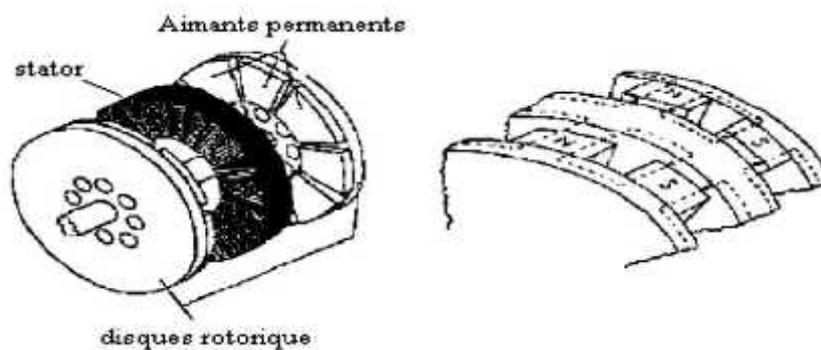


Figure I- 19 MSAP discoïde avec stator et double rotor.

I.2.2.2.4 MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor

Dans cette configuration simple, on ne trouve qu'un seul stator et un seul rotor. Cependant, une grande force d'attraction est appliquée entre le stator et le rotor. Pour créer une force de contre réaction et éviter ainsi le déplacement axial du rotor, il est nécessaire de placer un contrepoids de l'autre côté du rotor (Fig.I.20).

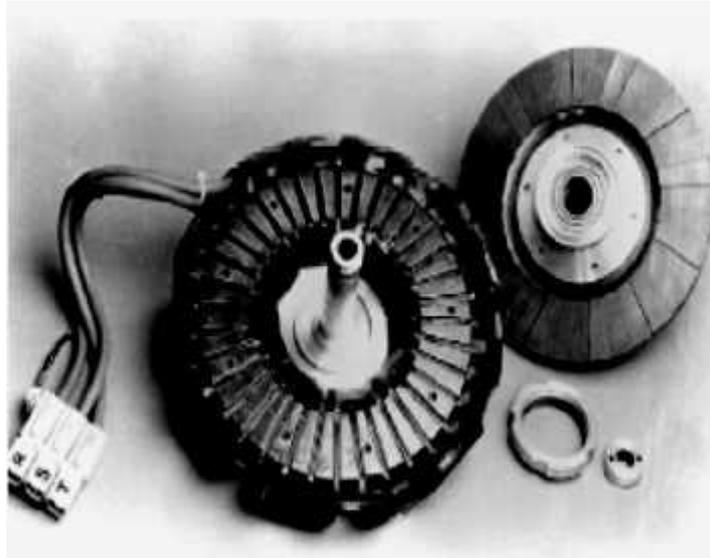


Figure I- 20 MSAP discoïde unilatérale avec contreponds du côté rotor.

I.2.2.2.5 MSAP discoïde unilatérale avec contreponds du côté stator

Cette configuration est similaire à la précédente, à l'exception que dans ce cas, le contreponds est remplacé par un rotor additif.

I.2.2.2.6 Machine synchrone à aimants permanents à rotor extérieur

Comme illustré par la figure I.20, le bobinage statorique est fixé dans le centre de la machine, tandis que les aimants du rotor sont placés régulièrement le long de la circonférence interne du tambour rotatif, et sont ainsi exposés directement au vent, ce qui améliore leur refroidissement. Les pales de la turbine éolienne sont bien boulonnées sur le tambour, ce qui réalise un accouplement direct entre la turbine et la génératrice. La périphérie étendue du rotor, offre la possibilité de prévoir des structures multi pôles.

Ces machines sont conçues spécialement pour être employées dans un ensemble éolien à axe vertical de type Savonius. Compte tenu de la gamme de vitesse de rotation de l'éolienne, le nombre élevé de pôles sert à obtenir une fréquence électrique suffisante sans avoir recours au multiplicateur mécanique, ce qui permet de réduire les pertes mécaniques et d'augmenter la durée de vie du système. La génératrice est conçue pour un fonctionnement vertical; elle est équipée d'un jeu de roulements internes adaptés.

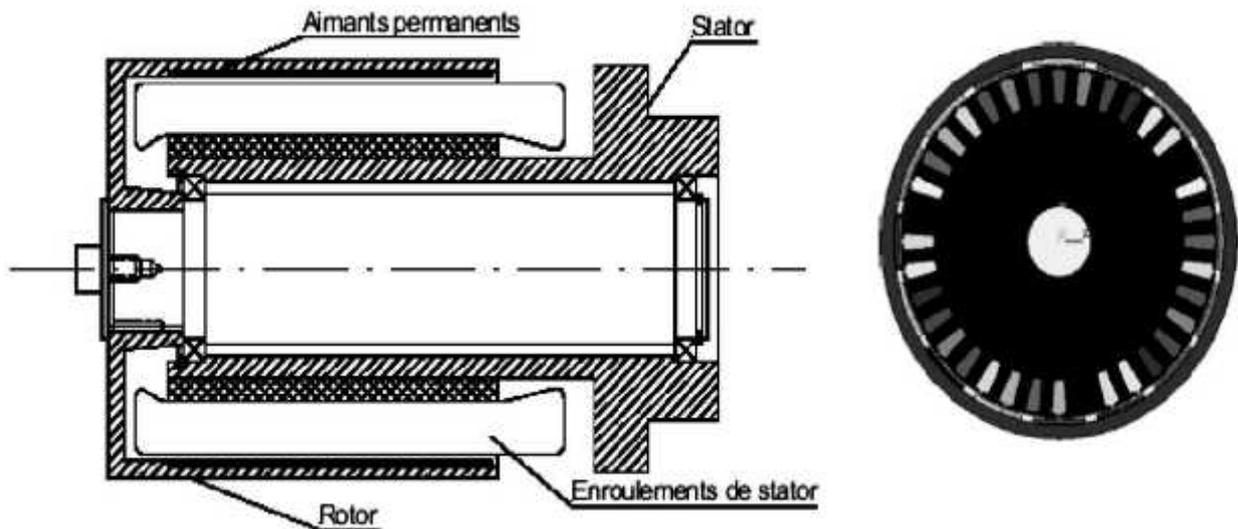


Figure I- 21 MSAP à rotor extérieur.

I.2.3 Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP)

I.2.3.1 Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) Connecté au réseau électrique

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs. 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) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur. La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau (figure. I.22). Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que celui connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration.

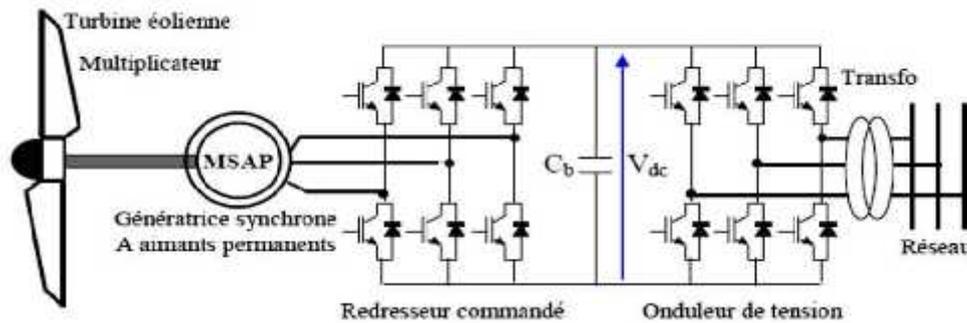


Figure I- 22 Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents À fréquence variable.

I.2.3.2 Les éoliennes à base de la génératrice synchrone à aimant permanent en fonctionnement isolé et autonome

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages cités précédemment (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent.

A. Structure avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure I.23. Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est « naturel

» mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée

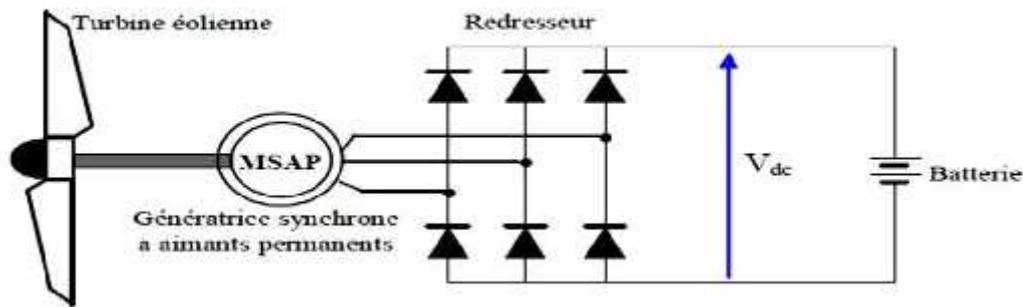


Figure I- 23 Machine synchrone avec redresseur à diodes.

B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (figure. I.24).

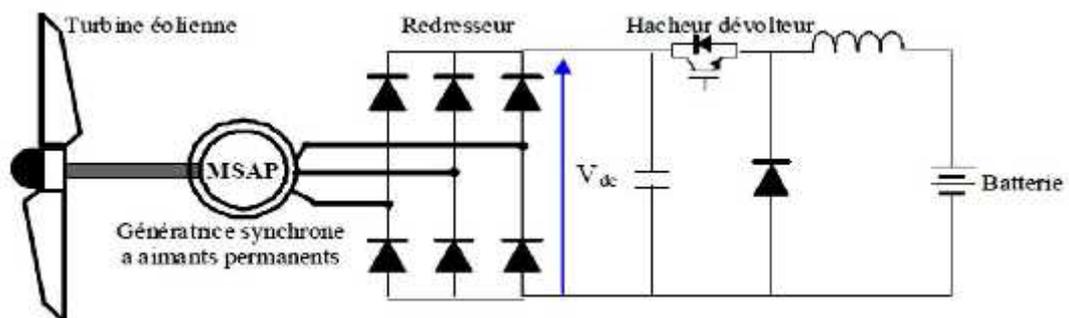


Figure I- 24 Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.

C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T1 et T2. Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées.

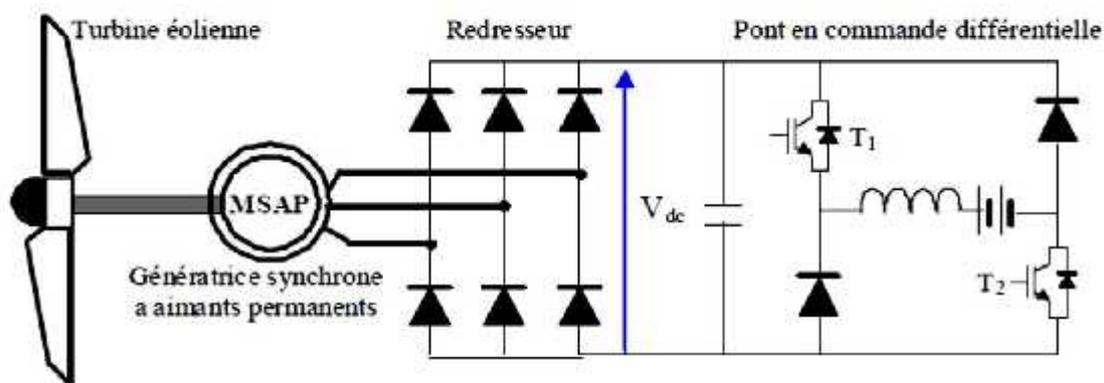


Figure I- 25 Machine synchronisée avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.

D. Structure avec redresseur à MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure I.26, il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchronisée ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position.

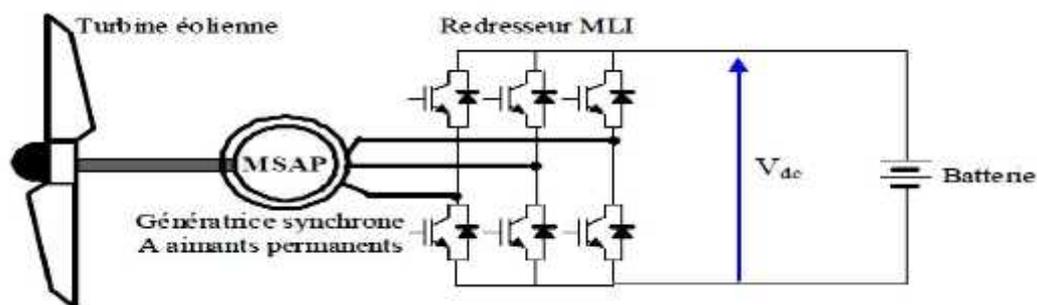


Figure I- 26 Machine synchronisée connectée à un redresseur à MLI.

I.2.4 Avantages des éoliennes à base des machines synchrones à aimants permanents par rapport aux autres types de machines

Un avantage évident de l'utilisation des aimants au niveau de la production du flux est la suppression des pertes par effet joule du système inducteur. Il est aisé de démontrer que dans le cas des machines classiques l'importance relative des pertes par effet joule par rapport à la puissance utile est d'autant plus élevée que la machine est de taille réduite.

Un autre avantage de l'excitation par aimants, concerne l'amélioration de la sécurité de fonctionnement. Les moteurs synchrones à aimants sont intéressants du point de vue puissance, rendement, facteur de puissance et moment d'inertie pour les gammes accessibles à leurs utilisations (coût et fiabilité). Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation.

Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple), ainsi la présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

Conclusion

Dans ce chapitre, une brève description de chaînes de conversion de l'énergie éolienne est donnée. Quelques notions sur la conversion mécanique de l'énergie éolienne ont été introduites. Un aperçu succinct des deux grandes familles d'éoliennes, leurs avantages et inconvénients, a été donné.

Dans la seconde partie, les différents constituants d'une éolienne sont présentés. Les systèmes éoliens basés sur la machine synchrone à aimant permanent et les différentes topologies qui existent ont été abordés. Après l'étude avantages des éoliennes à base des machines synchrone à aimants permanents par rapport aux autres types de machines, l'idée de consacrer la suite des recherches sur un système utilisant une machine synchrone à aimant permanent MSAP a été retenue. Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la présentation et la modélisation mathématique des différentes parties constituant une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une GSAP fonctionnant à vitesse variable.

Chapitre II

Modélisation des turbines éoliennes

II.1 Introduction

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Dans ce chapitre, On s'intéresse essentiellement à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne. Dans la première partie, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ces principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance et de couple, et la limite de BETZ.

Différentes stratégies de commande sont décrites dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine, et limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent devient trop élevée. Des modèles analytiques de la turbine éolienne seront réalisés et comparés en utilisant différentes méthodes d'optimisation de puissance. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à la modélisation du système de régulation de l'angle de calage.

II.2 Conversion de l'énergie éolienne

II.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (figure 2-1) s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2$$

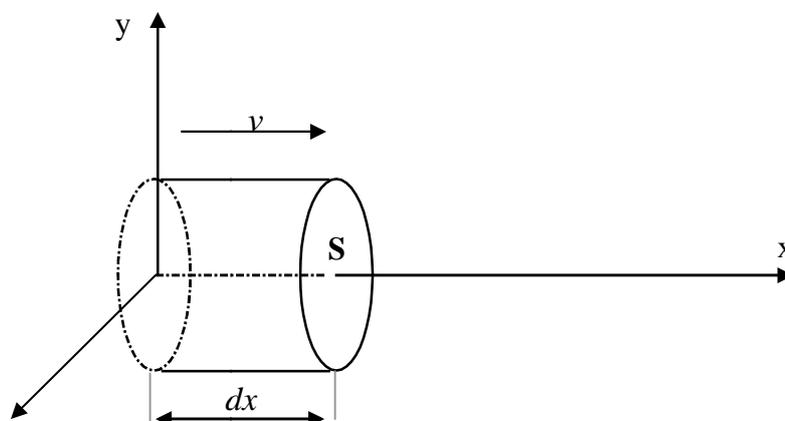


Figure 2-1 : colonne d'air animée d'une vitesse v

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant $dx=vdt$, on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3 \quad (2-2)$$

ρ : masse volumique de l'air (en Kg/m³). v : vitesse instantanée du vent (en m/s).

E_c : en joules.

II.2.2 Loi de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de **Betz** pour la première fois. Considérons le système de la figure 2-1 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

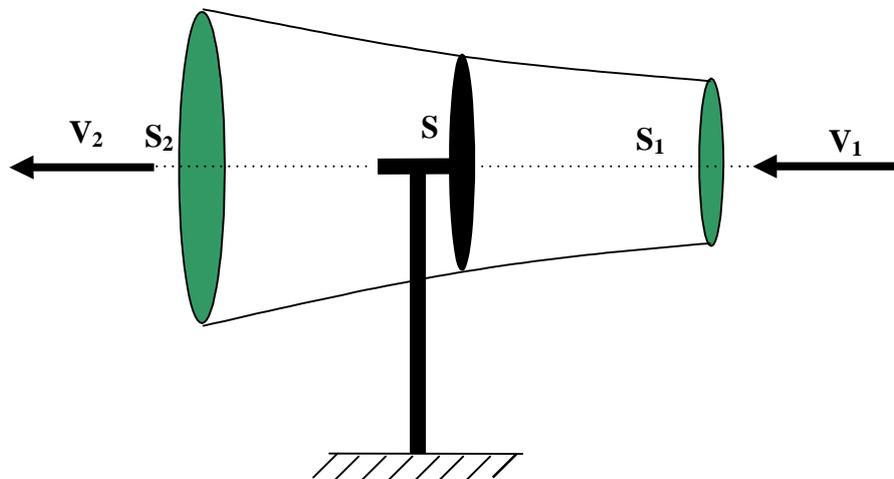


Figure 2-2: Tube de courant autour d'une éolienne

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne .

$$m_0 = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (2-3)$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval [7].

$$P_m = \frac{m_0(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (2-4)$$

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (2-5)$$

Soit en remplaçant m_0 par son expression dans (2.4) :

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $V_2=0$ dans l'expression (2-5) :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (2-6)$$

II.2.3 La vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio)

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine $\Omega_t R_t$ sur la vitesse instantanée de vent V (figure 2-3) et donné par l'expression suivante.

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V}$$

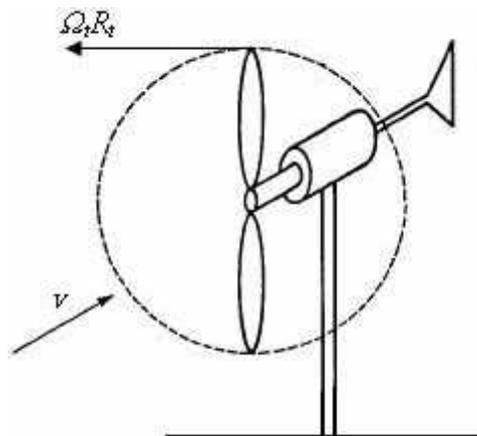


Figure 2-3 : Vitesse de vent (v) et vitesse tangentielle de l'aubage ($\Omega_t R_t$)

R_r : Rayon de la surface balayée en m.

V : Vitesse de vent en m/s.

ω : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

II.2.4 Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible :

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

Le coefficient C_p est variable, il est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine ω , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de **Betz**, est de $16/27$ soit 0.593 [7].

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de **BETZ** ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p \max}$$

aérodynamique :

$C_{p \max}$ étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale

ω_n .

II.2.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle.

En combinant les équations (2.6), (2.7), et (2.8), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (2.10)$$

Avec:
$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_1} \quad (2.11)$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda v} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v^2 \quad (2.12)$$

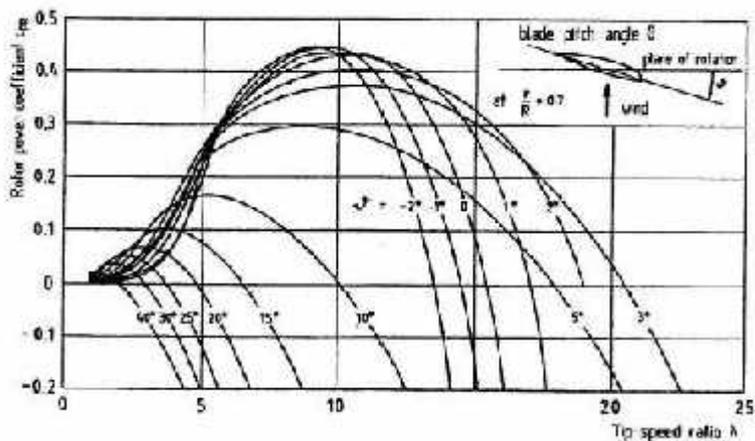
La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V^2} \quad (2.13)$$

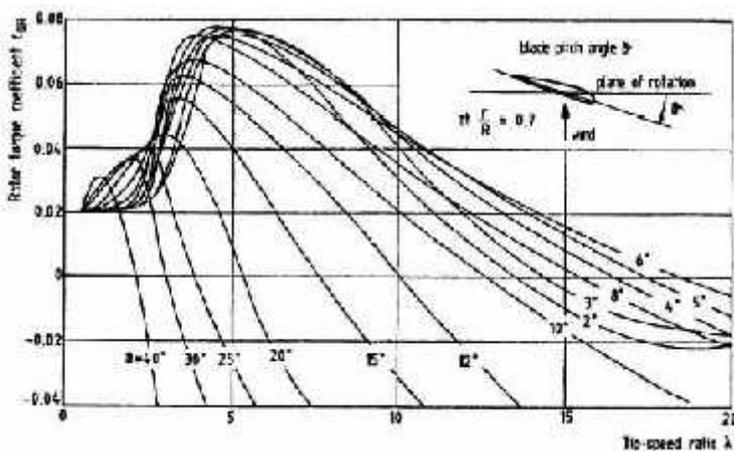
T_t : couple de la turbine éolienne.

II.2.6 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes

Les courbes essentielles caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les coefficients de puissance C_p et de couple C_m en fonction de la vitesse spécifique λ . En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. L'allure des coefficients C_p et C_m change donc pour chaque angle de calage comme représenté à la figure 2.4.



- $C_p = f(\lambda, \beta)$



- $C_m = f(\lambda, \beta)$

Figure 2-4 : Allures des coefficients C_p et C_m en fonction de la vitesse spécifique et l'angle de calage.

II.2.7 Production d'énergie mécanique

En tenant compte du rapport du multiplicateur G , et à partir des équations (2.10) et (2.11), l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_t R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (2.14)$$

Cette expression permet d'établir un réseau de courbes donnant cette puissance en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent (figure 2-4).

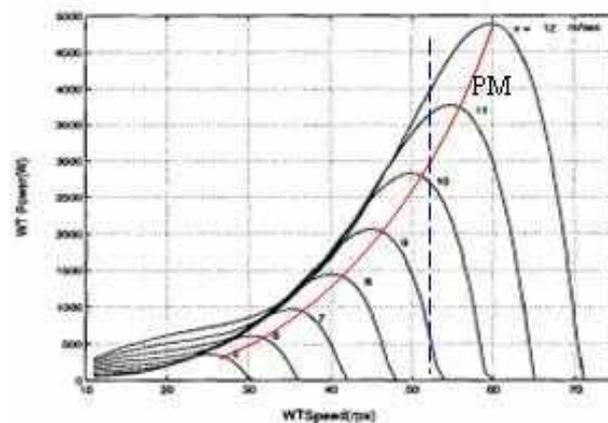


Figure 2-4 : puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent.

Au regard de la courbe repérée PM, qui joint les points de puissances maximales, il apparaît que pour pouvoir optimiser le transfert de puissance pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner à vitesses variables.

II.3 Modélisation du système éolien

II.3.1 Introduction

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine.

Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues.

Le système mécanique de l'éolienne est composé de quatre organes et peut être représenté comme illustré sur la figure (2-5).

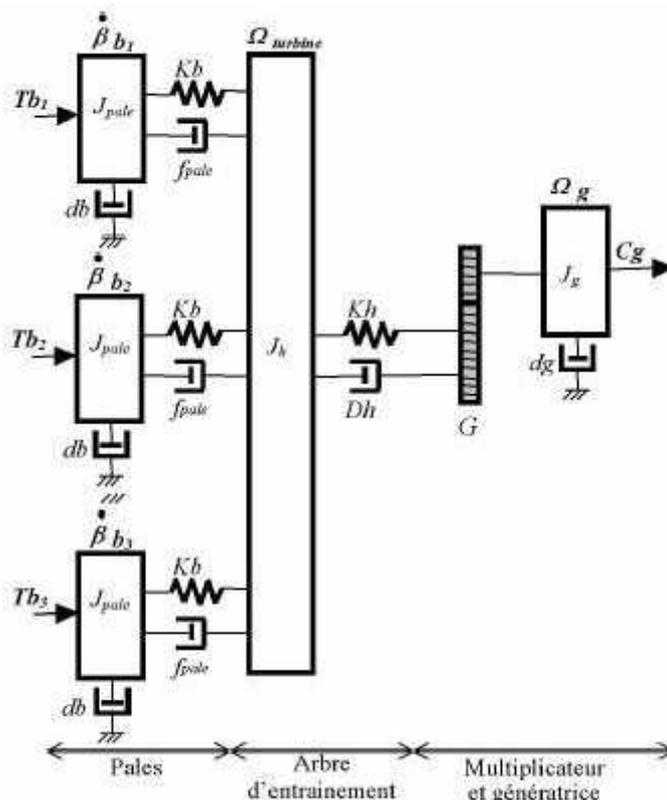


Figure 2-5 : Représentation du système éolien.

1- Trois pales considérées de conception identique et ayant les mêmes paramètres à savoir l'inertie J_{pale} , élasticité K_b , et coefficient de frottement db . Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta} b_1, \dot{\beta} b_2, \dot{\beta} b_3$.

Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [18].

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

) son inertie J_h

) son élasticité K_h

) son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

3- le multiplicateur de vitesse, de gain G . 4- Le rotor de la génératrice possède :

) une inertie J_g

) un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse Ω_g mec.

II.3.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes:

- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré.
- Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice.

On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple (figure 2-6).

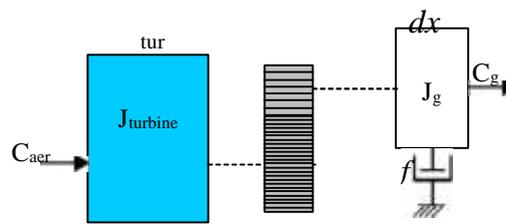


Figure 2-6 : Modèle simplifié de la turbine éolienne.

Le système étudié est composé d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un réducteur de vitesse de gain G . (Figure 2-7).

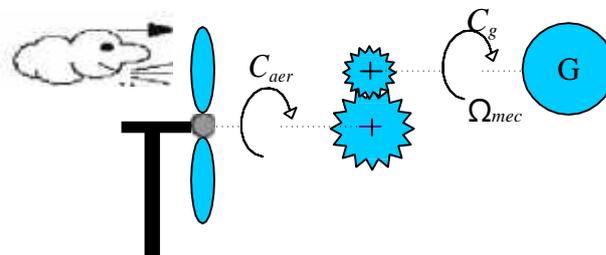


Figure 2-7 : synoptique du montage éolien étudié

II.3.3 Modèle de la turbine

Les variables d'entrée et sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit : 1- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.

2- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.

3- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlées en variant les quantités d'entrée précédentes.

II.3.4 Modèle du multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_g} \quad (2-15)$$

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{tur}} \quad (2-16)$$

II.3.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2-17)$$

J : l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres, et du multiplicateur.

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (2-18)$$

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \tag{2-19}$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc: le couple issu du multiplicateur

C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

L'organigramme de simulation de la turbine peut se représenter comme suit :

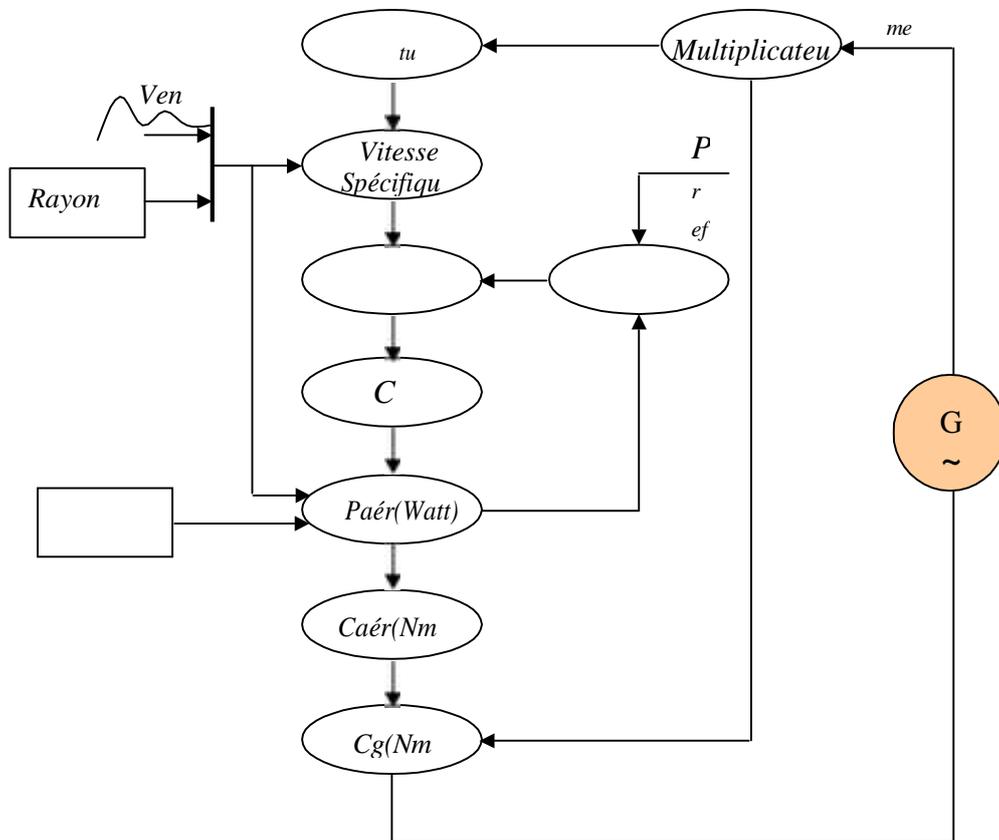


Figure 2-8 : organigramme de simulation de la turbine éolienne.

II.4 Stratégies de commande de la turbine éolienne

Les stratégies de commande des systèmes de génération éoliens de moyenne et grande puissance à vitesses variables et à régulation de puissance « pitch » utilisées notamment pour les aérogénérateurs Vestas et Gamesa de dernière génération sont basées sur les deux courbes illustrées sur la figure 2-9, qui sont déduites des données aérodynamiques de la turbine.

- Puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent.
- Puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.

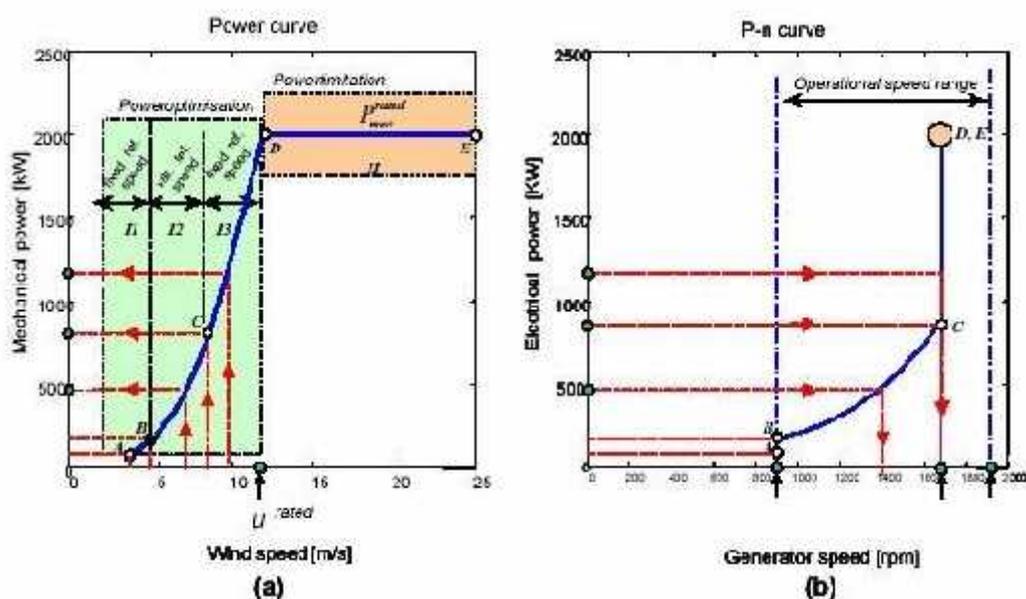


Figure 2-9: caractéristiques puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation.

- puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent
- puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation

La figure (2-10) représente une autre caractéristique de la turbine éolienne, qui est la vitesse de rotation de l'aérogénérateur en fonction de la variation de vitesse de vent.

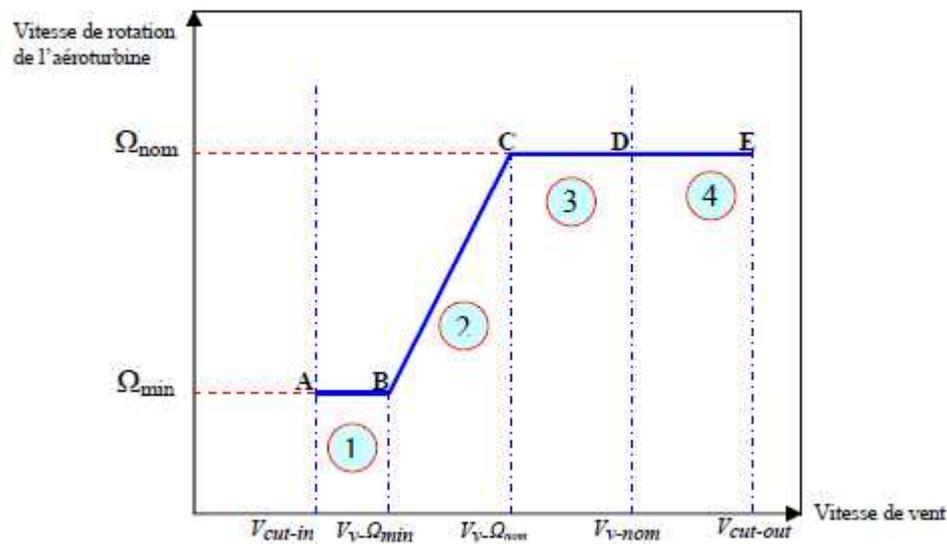


Figure 2-10 : Caractéristiques vitesse de rotation, vitesse de vent.

Deux stratégies de commande de la turbine à vitesses variables sont indiquées sur la figure (2- 10)

- I. Stratégie d'optimisation de puissance : Dans cette stratégie représentée par les séquences « A-B-C-D », l'énergie capturée est optimisée au-dessous de la vitesse nominale du vent.
- II. Stratégie de limitation de puissance : Le but de cette stratégie est de limiter la puissance nominale de la turbine au-dessus de la vitesse nominale du vent « D-E ».

Quatre zones de fonctionnement de la turbine peuvent être distinguées sur les figures (2-9) et (2-10)

- zone1 « A-B » : L'éolienne commence à fonctionner à la vitesse du vent de connexion $V_{\text{cut-in}}$, à une vitesse de rotation Ω_{\min} .
- zone2 « B-C » : Lorsque la vitesse de la génératrice est comprise entre les vitesses Ω_{\min} et Ω_{nom} , un algorithme de commande est appliqué pour extraire la puissance maximale du vent. Le coefficient de puissance maximum correspond dans ce cas à un angle de calage optimal et constant.
- Zone3 « C-D » : Cette zone correspond au cas où la vitesse de rotation nominale est atteinte, tandis que la puissance générée arrive à des valeurs importantes mais inférieures à la puissance nominale.
- Zone4 « D-E » : Arrivée à la puissance nominale, un système d'orientation des pales «

pitch control » est appliqué afin de limiter la puissance générée.

- Au-delà de la vitesse $v_{cut-out}$, un dispositif de protection est actionné pour éviter des ruptures mécaniques.

II.5 Système de contrôle de l'aéroturbine

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées :

1. Boucle de régulation de vitesse.
2. Boucle de régulation de puissance.

La première boucle est la boucle principale dans la stratégie d'optimisation de la puissance où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique. Dans la stratégie de limitation de puissance, les deux boucles de régulation interviennent.

Quand la vitesse de vent est inférieure à la vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale α_{opt} , tandis que la vitesse de rotation est ajustée par la boucle de régulation de vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. Lors d'une rafale de vent, la vitesse de rotation va augmenter et peut dépasser la vitesse nominale à cause de la lenteur du système d'orientation des pales qui a une dynamique plus lente que celle de la machine [18]. Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice, et anticipe l'action du dispositif d'orientation des pales en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation dans la zone 3 [18], [30].

II.6 Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche » [5]. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale.

Le schéma de la figure (2-11) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent V_v donnée.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (2-20)$$

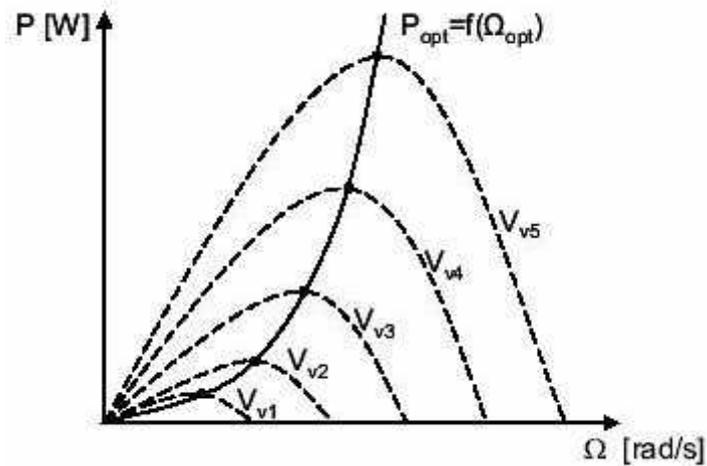
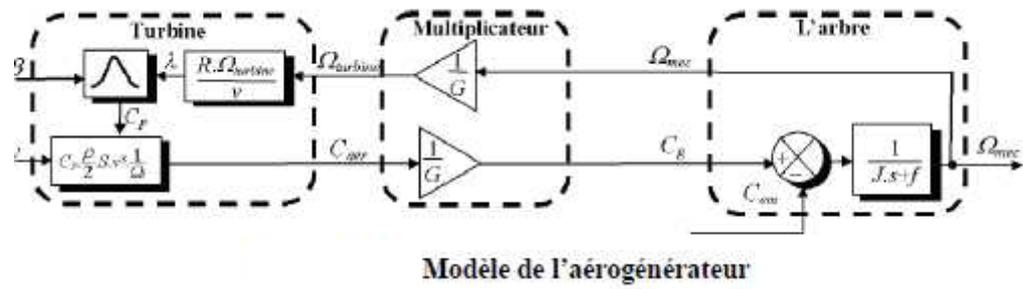


Figure 2-11 : caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Tracking (**MPPT**) correspond à la zone 2 doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles :

- 1- la première approche, la moins classique . considère que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ n'est pas connu.
- 2- La deuxième approche, plus répandue, suppose que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

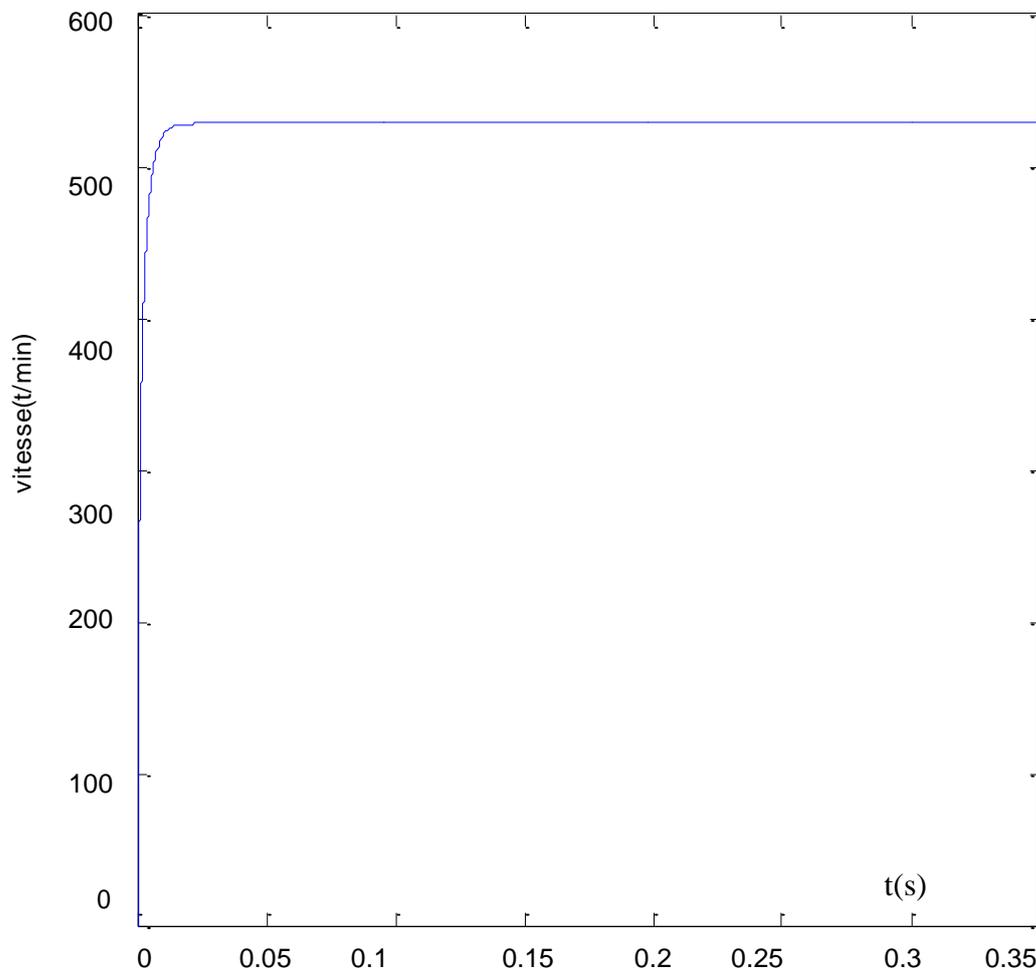
A partir de ce qui précède, on aboutit au schéma bloc de notre aérogénérateur :



II.7 Résultats de simulation

La figure (2-18) montre la vitesse de la turbine considérée avec stratégie de commande sans asservissement de vitesse.

A- Résultats de simulation sans asservissement de vitesse



a) vitesse mécanique

Figure 2-18 : Résultats de simulation avec stratégie de commande sans asservissement de vitesse.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déduit les caractéristiques principales de la turbine éolienne après une étude aérodynamique. Nous avons expliqué les zones de fonctionnement. Le comportement de la turbine pouvait donc être observé à travers un modèle de simulation pour différentes conditions de fonctionnement de charge et de vent. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la stratégie de limitation de la puissance recueillie par la turbine éolienne. Dans le chapitre suivant, nous allons modéliser la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée avec la turbine dans la chaîne globale proposée pour la conversion de l'énergie éolienne.

Chapitre III

Modélisation et simulation

de

la génératrice à aimant permanent

III.1 Introduction

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou à terres rares (par exemple du type manico, samarium cobalt, néodyme fer bore ...) leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages: induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines .

Dans la machine à aimants permanents MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique,.....). L'étude de cette machine dans le but de la commander, nous oblige à la mettre sous forme d'un modèle mathématique regroupant tous ces paramètres (résistance, inductance,...), permettant ainsi de mettre en évidence certains phénomènes apparaissant lors de son fonctionnement. En outre, ce modèle nous apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques qui interviennent au cours des applications.

III.2 Matériaux pour aimants

Selon les matériaux utilisés dans les aimants, on distingue deux types d'aimants permanents: Aimants « rigides » ou durs : bien adaptés aux aimants modernes à cause des caractéristiques linéaires.

Aimants « peu rigides » : Leurs caractéristiques non linéaires et les représentations associées sont plus complexes que celles des aimants rigides.

On peut distinguer trois grandes catégories de matériaux utilisés pour la réalisation des aimants (Figure 3 - 1) :

1-Les alnicos: sont les alliages de fer, d'aluminium, de nickel, et de cobalt. Leur champ rémanent est élevé, mais leur excitation coercitive est faible. Sensibles aux champs antagonistes, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen.

2-Les ferrites : sont des composés d'oxyde de ferrique et d'oxyde de strontium ou de baryum. Leur champ rémanent n'est pas très élevé, mais leur excitation coercitive est importante. Leur faible coût fait que les ferrites occupent aujourd'hui la majorité du marché des aimants.

3-Les composés de cobalt et de terres rares comme le samarium. Ces matériaux ont d'excellentes performances techniques. Leur champ rémanent et leur excitation Coercitive sont élevés, leur inconvénient reste le coût important.

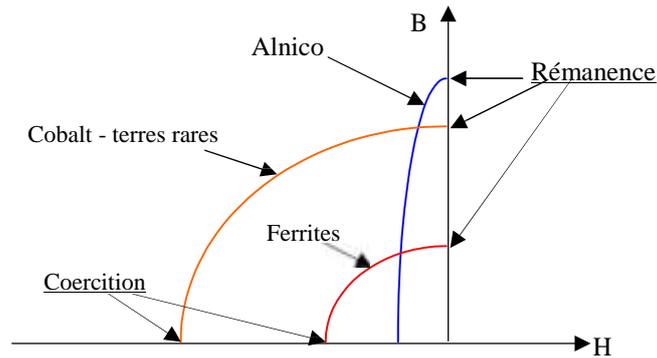


Figure 3-1: Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux

III.3 Modélisation d'un aimant « rigide »

III.3.1 Point de fonctionnement d'un aimant

Un aimant permanent est en général associé à un circuit magnétique pour créer un champ dans l'entrefer.

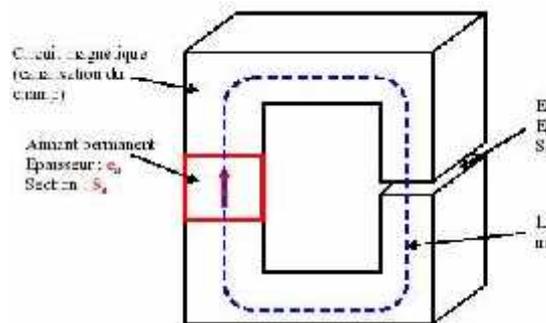


Figure 3-2-a: Circuit magnétique associé à un aimant



Figure 3-2-b : Exemple d'une machine synchrone à aimants

La perméabilité des pièces de matériau ferromagnétique étant très élevée, la reluctance de ces tronçons de circuit magnétique est négligeable devant celle de l'entrefer.

Soient : e_a la longueur de l'aimant, e la largeur de l'entrefer, H l'excitation magnétique dans l'aimant et H_e l'excitation magnétique dans l'entrefer (mesures algébrique).

Le théorème d'Ampère donne :

$$H.e_a + H_e.e = 0 \quad (3-1)$$

Par ailleurs si S_a et S_e sont les sections de l'aimant et l'entrefer, la conservation du flux s'écrit :

$$B.S_a = B_e.S_e \quad (3-2)$$

B : Le champ magnétique de l'aimant.

B_e : Le champ magnétique de l'entrefer, donné par :

$$B_e = \mu_0 H_e. \quad (3-3)$$

μ_0 : est la perméabilité relative de l'entrefer.

A partir des trois équations précédentes on déduit la relation :

$$B = \mu_c \frac{S_e}{S_a} e_a H \quad (3-4)$$

C'est l'équation d'une droite dans le plant (H, B), on la nomme droite d'entrefer. Comme l'aimant impose une seconde relation entre B et H par sa caractéristique magnétique, on obtient le point de fonctionnement **S** par intersection de la droite et de la courbe (Figure 3- 3). On constate que l'excitation magnétique H est toujours négative, c'est-à-dire qu'à l'intérieur de l'aimant, les vecteurs B et H sont de sens opposés, par ailleurs, on voit que pour obtenir un champ magnétique important, il faut utiliser pour l'aimant des matériaux qui possède à la fois un champ rémanent important et une excitation coercitive élevée.

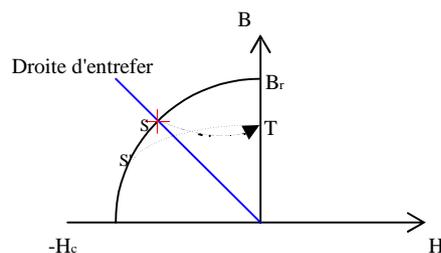


Figure 3-3 : Détermination du point de fonctionnement

III.4 Comparaison entre la machine synchrone classique et la machine synchrone à aimant permanent

- La MSAP n'exige pas d'excitation, et grâce à l'absence des pertes par excitation et dans les contacts frottant, elle possède un rendement élevé. Dans la machine synchrone classique, l'excitation est nécessaire, l'enroulement d'excitation tournant et les balais présentent assez fréquemment des défaillances de plus, d'où le rendement est relativement faible.
- La MSAP n'exige aucun entretien, et se caractérise par une sécurité de fonctionnement plus élevée, mais dans le MS classique, l'entretien est exigé avec moins de sécurité.
- La machine synchrone classique peut avoir trois modes de fonctionnement, à excitation optimale, sous excitée, et sur excitée. Ce qui la rend capable d'améliorer le facteur de puissance d'une installation comportant des appareils consommateurs de puissance réactive, ces avantages ne peuvent être donnés par une MSAP.
- La présence de l'inducteur à CC dans la machine synchrone rend la machine plus coûteuse qu'une MSAP, et nécessite de plus une alimentation et un réglage de l'excitation.

III.5 Type des MSAP à flux radial

Suivant la position géométrique de l'aimant dans la machine, on distingue deux types.

1- MSAP où l'aimant est monté sur la surface du rotor (Figure 3-6-a, b)

L'entrefer effectif large a pour conséquences:

- Pas d'effet de saillant significatif.
- L'effet de réaction d'armature est négligeable.

2- MSAP à aimant inséré dans la matière du rotor (Figure 3-6-c-d, e, f).

L'aimant apparaît comme un entrefer large d'axe direct (d) ou les épanouissements polaires présentent un petit entrefer dans l'axe (q).

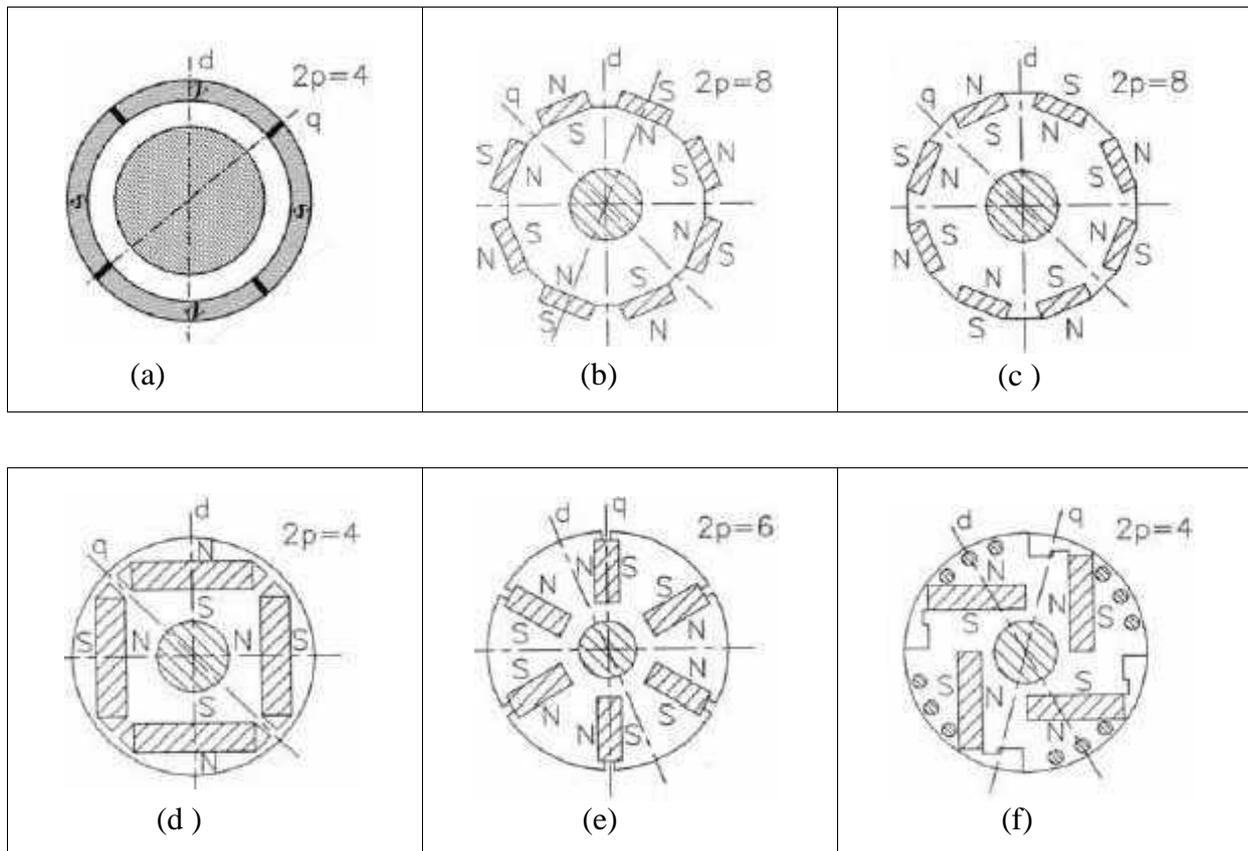


Figure 3-6 : Structures d'inducteurs à aimants dans les machines à champ radial

- (a) Aimant en surface (tubulaire, aimantation radiale alternée).
- (b) Aimants en surface déposés collés ou frettés.
- (c) Aimants en surface insérés entre des pièces polaires.
- (d) Aimants enterrés.
- (e) Amants enterrés (aimantation ortho radiale), structure à aimants à concentration de flux.
- (f) Aimants insérés et cage d'écureuil pour démarrage asynchrone.

III.6 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents

III.6.1 Modèle de la MSAP

Le modèle mathématique de la machine synchrone électrique obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices:

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

III.6.1.1 Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

$[v_a \ v_b \ v_c]^t$: Vecteur tension de phases statoriques.

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

$[\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^t$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : la résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple [36]. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor (Figure 3-8).

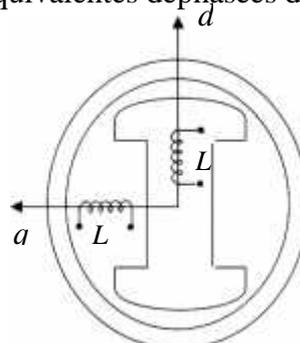


Figure 3-8 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [35].

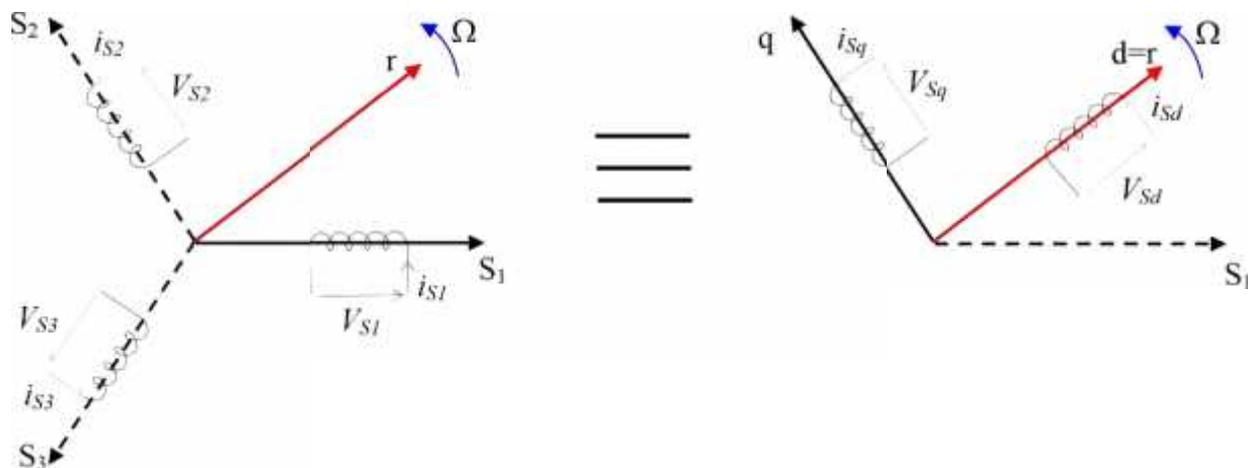


Figure 3-9 : Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park

En appliquant la transformation de Concordia T_{32} défini par (3-17) :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^t \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \text{ Avec: } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 2 & \frac{2}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 2 & \frac{2}{2} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Le variable x peut être v , i ou ψ .

On obtient:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

En appliquant la transformation de Park au système d'équations (3-18), on peut exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor. Si θ est l'angle électrique désignant la position du rotor par rapport au stator, nous avons :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \theta P \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

$$\text{Où: } \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(-\theta) \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}, \text{ et } P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

v_d, v_q, i_d et i_q sont les composantes directe et en quadrature de tension et de courant.
 ψ_d et ψ_q sont les composantes directe et en quadrature du flux.

III.6.1.2 Equations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, ψ_d et ψ_q sont fonctions linéaires des courants i_d et i_q :

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (3-21)$$

L_d et L_q sont les inductances directes et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de θ . ψ_f représente le flux des aimants. En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (3-19), on aboutit à :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega P \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

Où $\omega = p\Omega$, p étant le nombre de paires de pôles et Ω la vitesse angulaire du rotor.
 e_d et e_q sont les composantes directe et en quadrature de f.e.m. données par :

$$\begin{cases} e_d = 0 \\ e_q = p\psi_f \Omega \end{cases} \quad (3)$$

Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit [37]:

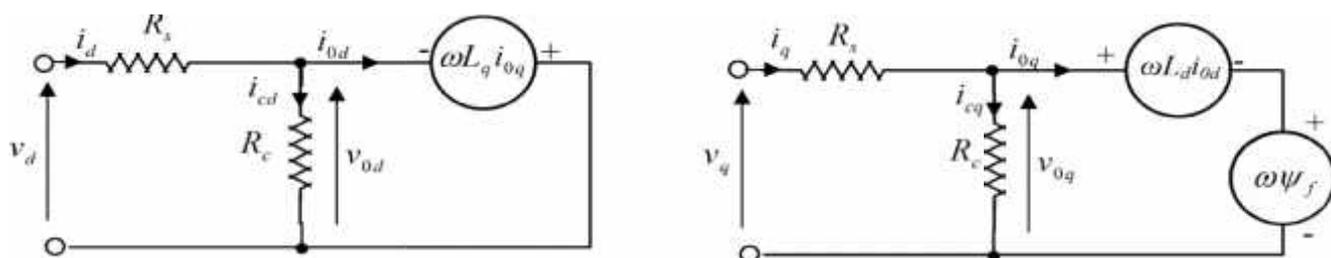
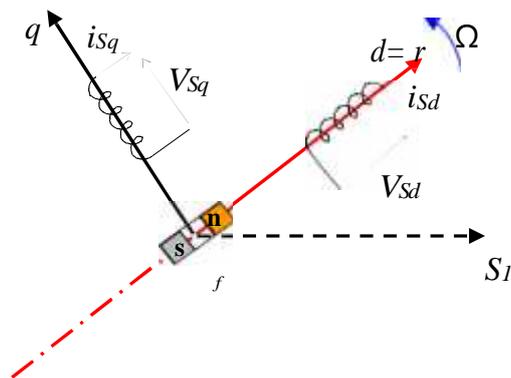


Figure 3-10: circuit équivalent de MSAP –convention moteur-

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant i_d et i_q dans les repères de Park (figure 3-11), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme [38], [39], [22]:

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (3-24)$$


Figure 3-11: Modèle de PARK pour la GSAP

Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [35]:

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dW_e}{d\theta_e} \quad (3)$$

W_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

P : nombre de pair de pôle.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par [35]:

$$P(t) = 3/2 (V_d I_d + V_q I_q) \quad (3-26)$$

En remplaçant V_d, V_q par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} [-R_s (i_d^2 - i_q^2) - (i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt}) + \frac{d\theta}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)] \quad (3-27)$$

$[-R_s (i_d^2 - i_q^2)]$: Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator [35].

$\frac{3}{2} [i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt}]$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator [35].

Sachant que :

$$p\Omega = \omega \text{ et } P_e = C_{em} \cdot \Omega \quad (3-28)$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = 3/2P (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (3-29)$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire [38], [39]:

$$C_{em} = 3/2 P [(L_q - L_d]i_d i_q + i_q \Psi_f)] \quad (3-30)$$

III.6.1.3 Equations mécaniques

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \, d\Omega/dt \quad (3-31)$$

Avec :

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

f : Le couple de frottement. J : moment d'inertie total de la machine.

f : coefficient de frottement visqueux.

III.7 Simulation de la GSAP

III.7.1 L'influence d'une charge séparée (R_{ch} , L_{ch})

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique (R_{ch} , L_{ch}).

Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les équations données par (3-24) :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} I_d + L_{ch} \frac{d}{dt} I_d - \omega L_{ch} I_q \\ V_q = R_{ch} I_q + L_{ch} \frac{d}{dt} I_q + \omega L_{ch} I_d \end{cases} \quad (3-34)$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (3.34), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch}) I_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_d + \omega (L_q + L_{ch}) I_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch}) I_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_q - \omega (L_d + L_{ch}) I_d + \omega \Psi_f \end{cases} \quad (3-35)$$

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

$$\begin{cases} SI_d = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_d + \omega(L_g + L_{ch})I_q] \\ SI_q = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_q - \omega(L_d + L_{ch})I_d + \omega\psi_f] \end{cases} \quad (3-36)$$

Considérons le flux d'excitation ψ_f comme grandeur de commande, et les courants I_d , I_q comme variables d'état.

III.7.2 Equations d'état

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

$$[x] = [A][x] + [B][v] \quad (3)$$

$$[x] = [i_d \quad i_q]^T, \quad [v] = [0 \quad \psi_f]^T \quad (3)$$

Les équations (3-36), peuvent s'écrire sous la forme matricielle (3-39).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega \frac{L_g + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & \frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega\psi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (3-39)$$

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

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_g + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (3-40)$$

$$[B][v] = \omega \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (3-41)$$

III.7.3 Bloc de simulation

A partir des équations (3-37 à 3-41, et 3-31), on construit le bloc de simulation de la génératrice (figure 3-13).

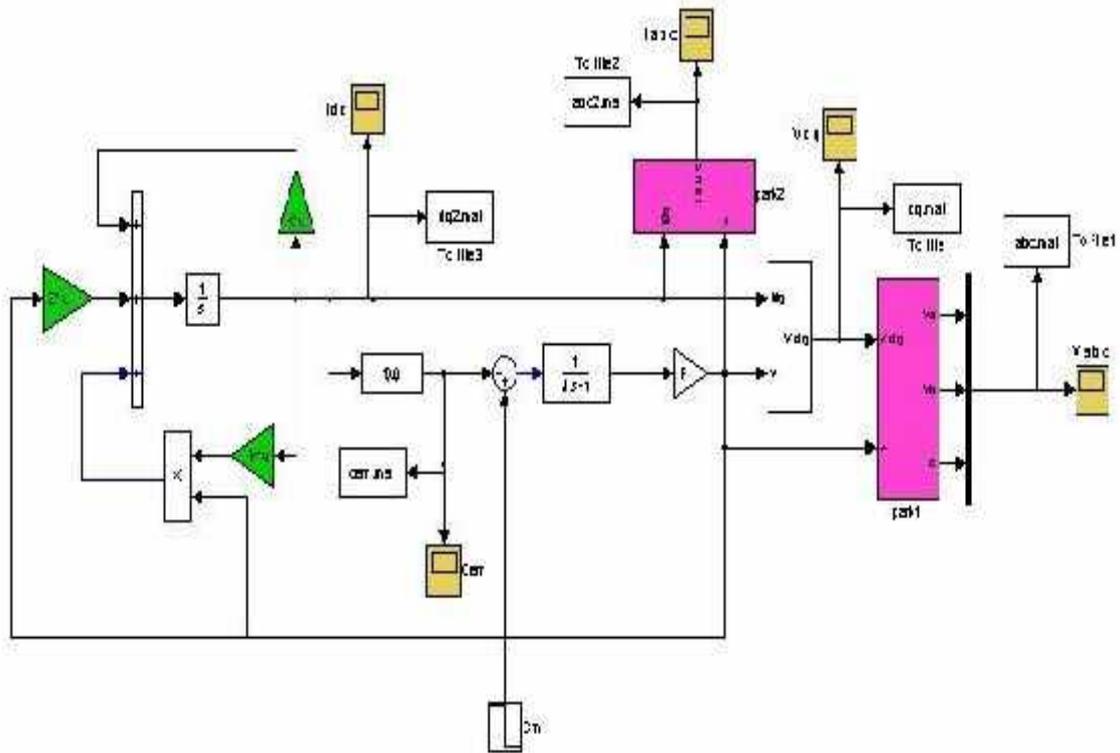
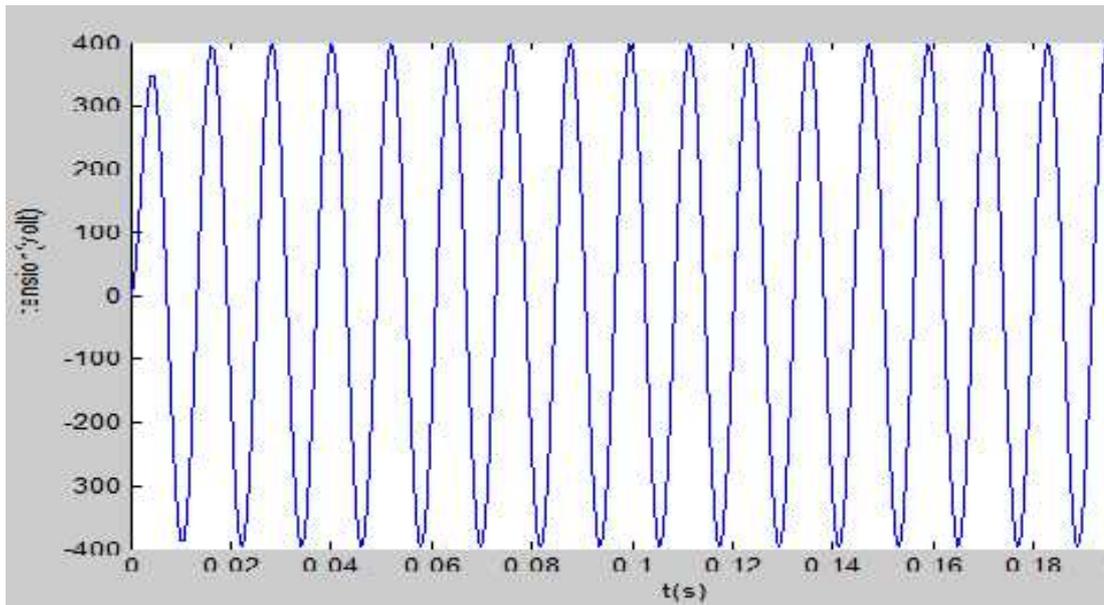
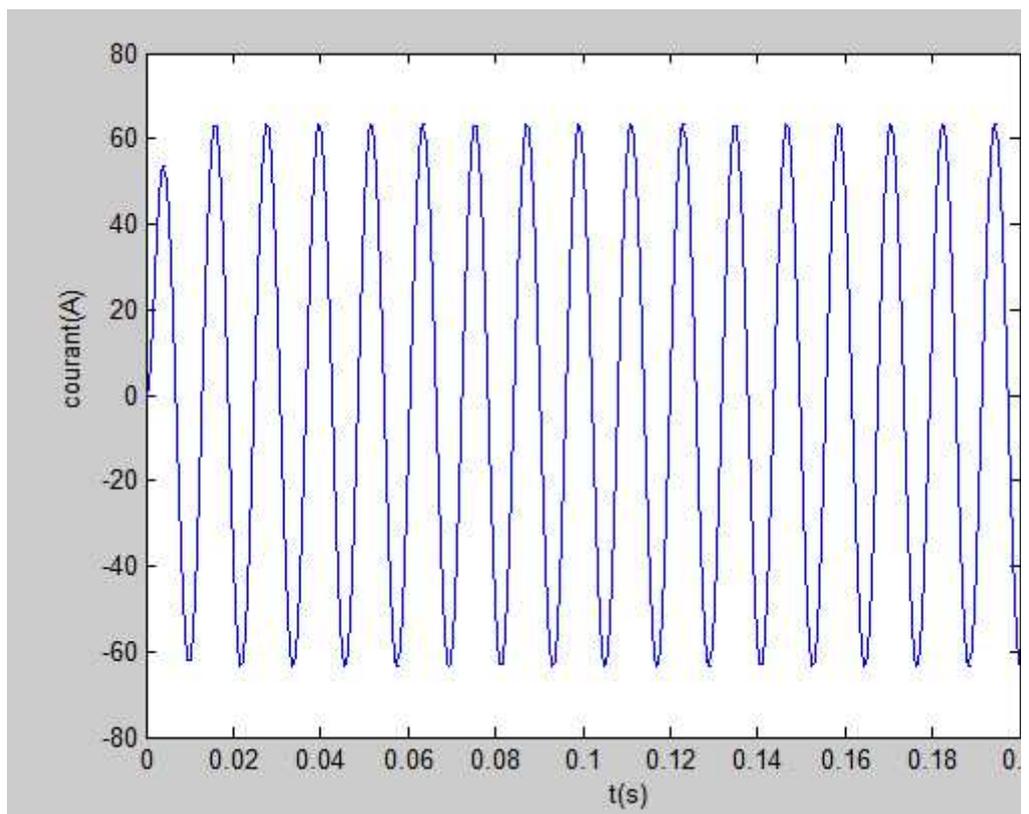


Figure 3-13: Bloc de simulation de la GSAP en charge

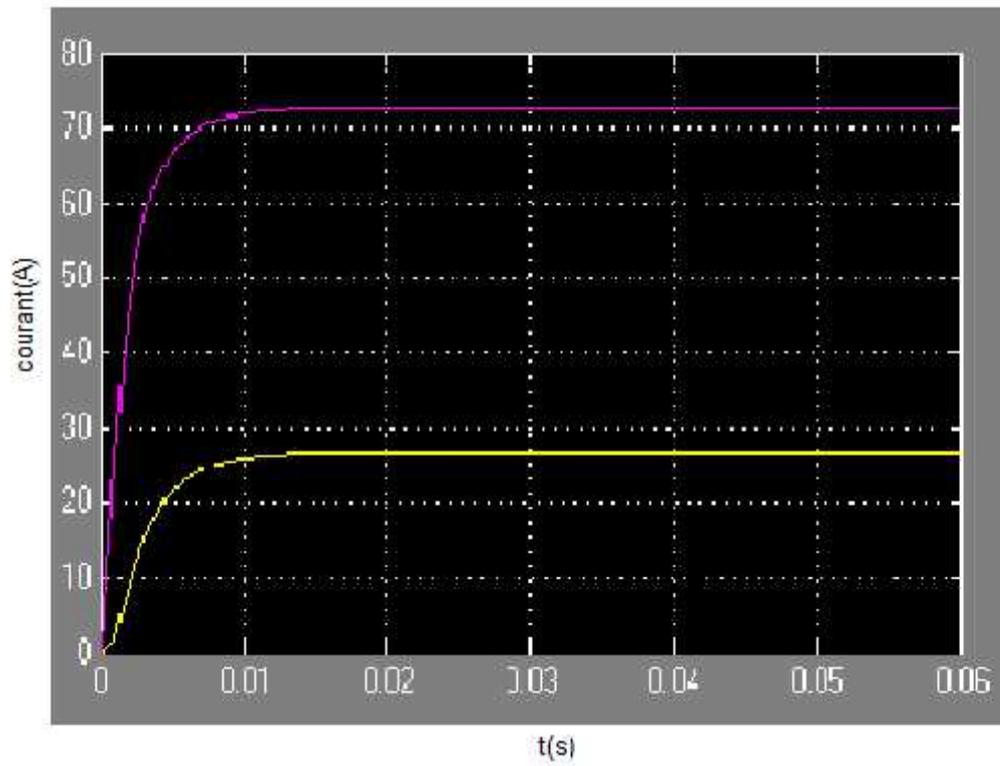
III.7.4 Résultats de simulation



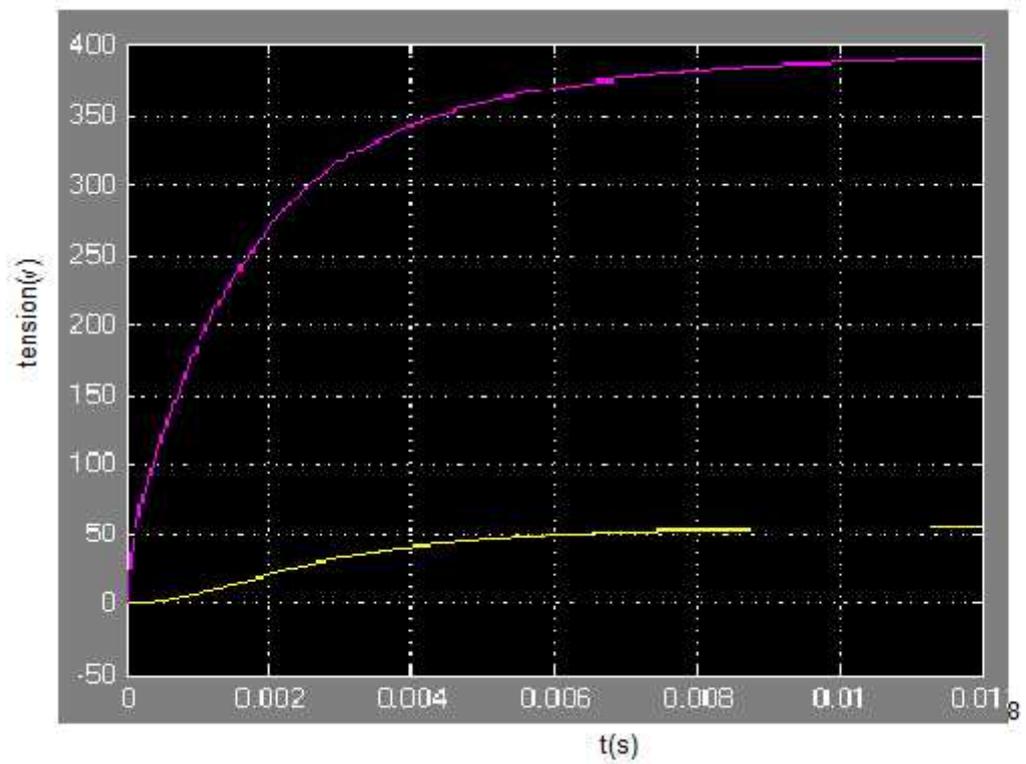
a : Tension d'un phase statorique



b : Courant d'un phase statorique



c : Composantes I_d I_q



d : Composantes V_d V_q

f : vitesse de rotation

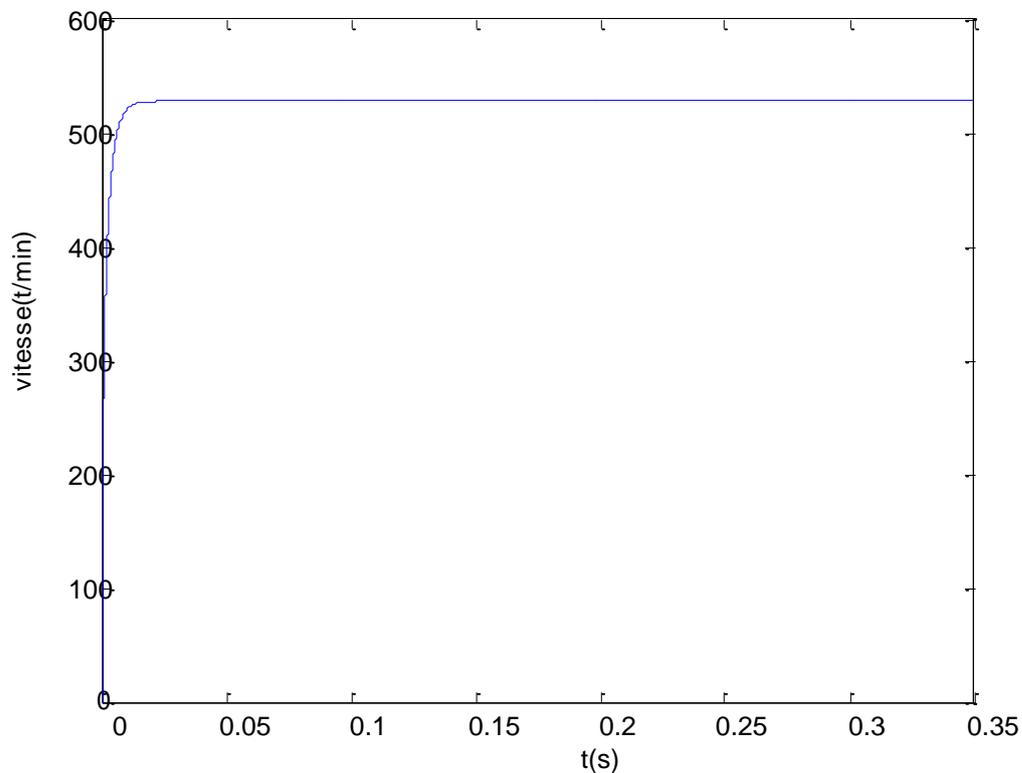


Figure 3-14: GSAP sur une charge séparée

III.8 Conclusion

Après avoir présenté les types des aimants permanents et les caractéristiques des matériaux utilisés, nous avons établi, en premier lieu un modèle électrique équivalent de l'aimant associé au circuit magnétique. Une brève description de la machine synchrone à aimants permanents a été présentée dans ce chapitre comportant une comparaison avec la machine synchrone classique et les différentes structures rencontrées. Nous avons abordé en suite la modélisation de la machine synchrone dans sa structure générale, avant d'arriver à un modèle définitif de la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée au cours de ce travail. Ce modèle a été validé par les résultats de simulation aboutis pour une génératrice à vide, avec une charge séparée, ou encore connectée à une source de tension. Dans le chapitre suivant, nous allons établir les modèles analytiques des autres organes utilisés dans la chaîne de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents, à savoir, les convertisseurs de puissance, le bus continu, la liaison au réseau.

Chapitre IV

Qualité de l'énergie électrique fournie par un système éolienne

IV.1 Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Les paramètres caractéristiques de ce réseau sont la fréquence, l'amplitude, la symétrie du système triphasé et la forme d'onde de la tension. Cette dernière doit être sinusoïdale. Cependant, lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau électrique.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers [45].

Depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance, les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux électriques. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement.

Ce chapitre propose alors dans un premier temps un développement de cette problématique et en particulier des contraintes liées au raccordement des éoliennes avec la charge. Ainsi, nous allons analyser les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de l'énergie et les solutions possibles pour en minimiser les effets. Les normes internationales sur la qualité de l'énergie seront aussi discutées. Des résultats de simulation sont présentés sous l'environnement Matlab/*Simulink*, notamment ceux de l'énergie délivrée en sortie.

IV.2 Paramètres de la qualité de l'énergie produite

La qualité de l'énergie devient une des priorités majeures qui concernent tous les acteurs en présence, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, consommateur ou producteurs. Pratiquement, la totalité des équipements électriques exigent une énergie électrique de bonne qualité. Durant ces dernières années, le nombre de systèmes alimentés électroniquement est en forte progression. Cet essor est motivé par l'amélioration des performances des systèmes électroniques. Différents secteurs sont concernés [46]:

- industriel (variateurs de vitesse, alimentation à découpage, etc.) ;
- tertiaire (informatique, ballast des tubes fluorescents...);
- domestiques (téléviseurs, appareil électroménagers) ;

La qualité de l'énergie produite est un vaste concept qui recouvre à la fois la continuité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Les facteurs qui sont susceptibles d'affecter la qualité de l'énergie électrique sont :

- la variation de fréquence ;
- les fluctuations de tension ;
- les creux de tension ;
- les courants ou tensions harmoniques ;
- le déséquilibre.

Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation.

IV.2.1 Creux et coupures de tension

Le **creux de tension** est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale [47] pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux d'utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une **coupure de tension** quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure 4.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension [48,49].

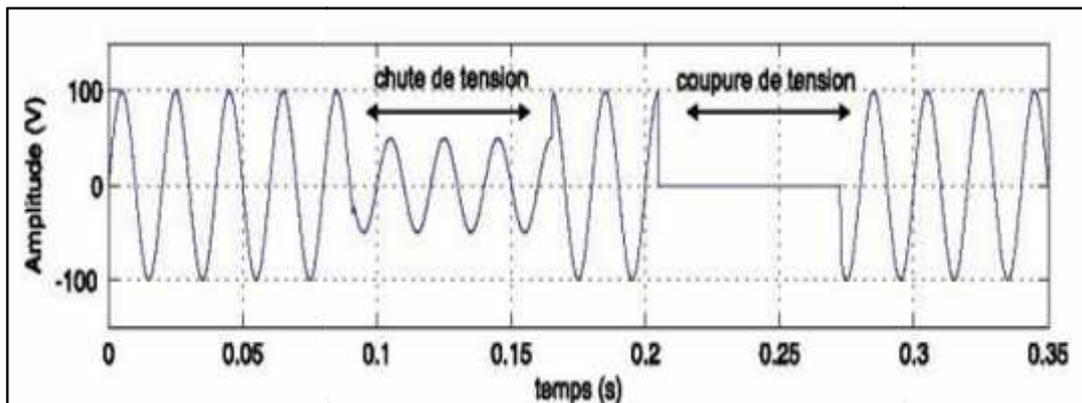


Figure 4.1 Creux et coupures de tension

IV.2.2 Fluctuations de tension

Les **fluctuations de tension** sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes [48,50].

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appels importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareils dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure 4.2.

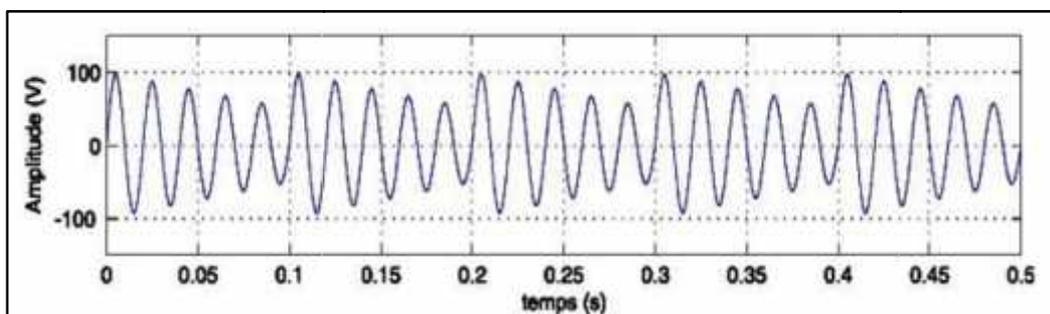


Figure 4.2 Fluctuations de tension

IV.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de **déséquilibre du système triphasé** comme le montre la figure 4.3.

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [51].

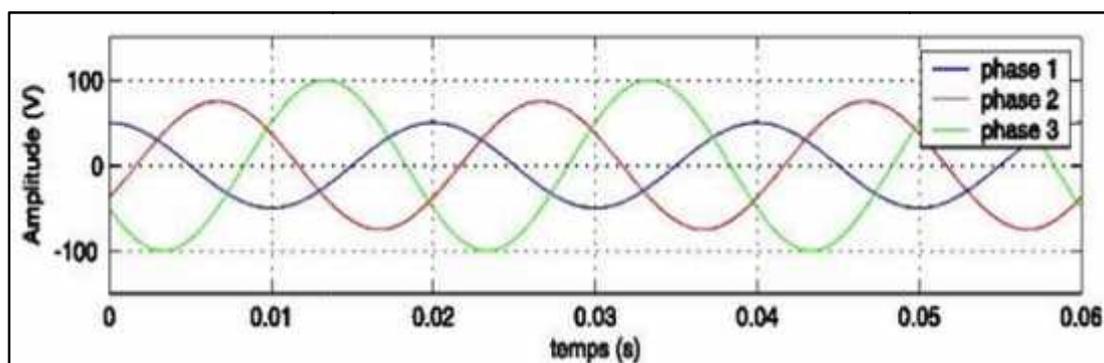


Figure 4.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

IV.2.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source autonome, comme le montre la figure

4.4. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$.

Avec l'augmentation des fermes éoliennes connectées sur le réseau HT, les variations de puissances pourraient causer des variations de fréquence. En effet, les variations de puissances produites par les éoliennes peuvent atteindre quelques centaines de kW en quelques dizaines de seconde [52].

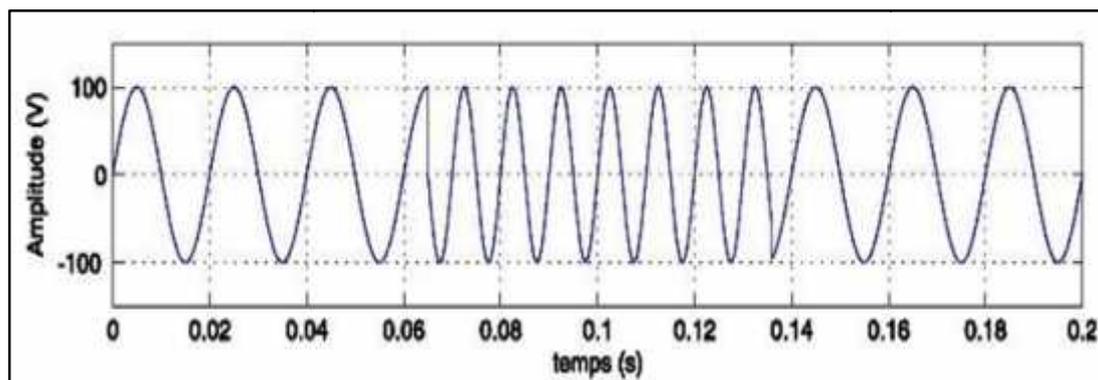


Figure 4.4 Variation de fréquence

IV.2.5 Harmoniques et interharmoniques

Les **harmoniques** sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental [53]. La figure 4.5 montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est la prolifération des équipements de l'électronique de puissance à base de composants électroniques comme : les thyristors, les transistors etc....

Les **interharmoniques** sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entières de la fréquence du réseau. L'apparition des interharmoniques est en accroissement et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique [54,55].

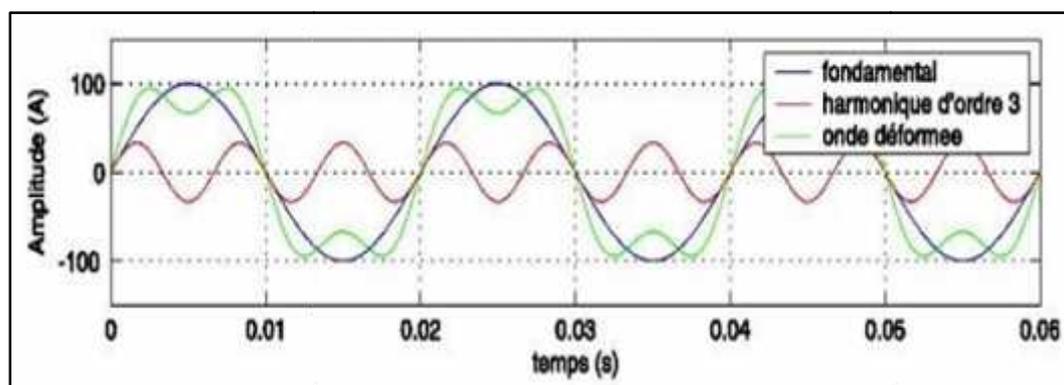


Figure 4.5 Les harmoniques

Les pollutions harmoniques seront traitées dans ce chapitre lors du raccordement de notre système éolien avec la charge électrique.

IV.3 Définition des harmoniques

Dans le système de puissance [56], la définition d'un harmonique peut être énoncée comme suit : une composante sinusoïdale périodique ayant une fréquence multiple entier de la fréquence du fondamental. Ainsi, pour un système, la fréquence fondamentale est de f_0 et la fréquence de la $h^{\text{ème}}$ harmonique est de hf_0 . Les harmoniques sont souvent utilisées pour définir

la distorsion du signal sinusoïdal associée avec le courant ou la tension de différentes amplitudes et de fréquences, ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance [53,57].

IV.4 Interprétation des harmoniques

Le concept d'harmonique est introduit au début du 19^{ème} siècle par **JOSEPH FOURIER** qui démontra que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série de sinusoïdes de fréquences discrètes (multiples) [58].

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (4.1)$$

On note que la composante a_0 de la série de **FOURIER** est la composante continue.

2 a_0, a_n, b_n sont définis comme suit :

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \quad (4.2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (4.4)$$

Le courant absorbé par la charge non linéaire a pour expression :

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(\omega_h t + \varphi_h) \quad (4.5)$$

La première composante de rang 1 ($h = 1$) est appelée : composante fondamentale. Pour les systèmes raccordés à un réseau électrique stabilisé, la fréquence de la composante fondamentale est considérée comme étant fixe (50 Hz en Europe, 60 Hz aux États-Unis). Le reste des composantes de la série de **FOURIER** sont appelées : harmoniques de rang h , où h désigne le numéro de la composante (le rang 2 correspond au deuxième terme de la série de **FOURIER** qui aura une fréquence double du fondamental). La figure 4.6 donne l'allure d'un courant contenant un harmonique de rang 3, c'est-à-dire un courant qui contient une composante de rang 3 élevée en amplitude. Dans les réseaux électriques triphasés, les principales composantes harmoniques sont de rangs 5, 7, 11 et 13 [54,56].

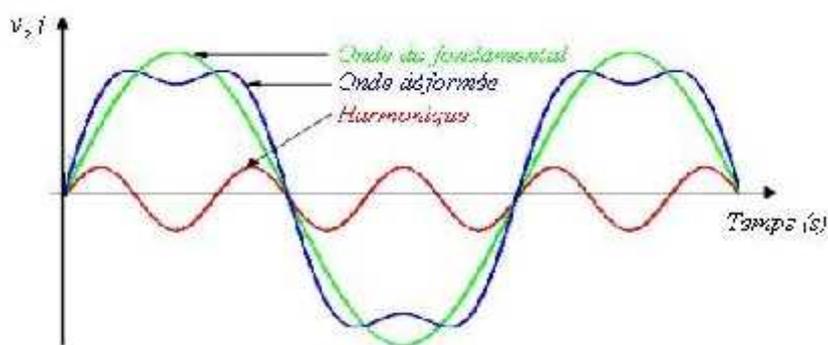


Figure 4.6 Représentation d'un harmonique

IV.5 Sources des harmoniques et leurs effets

IV.5.1 Sources des harmoniques

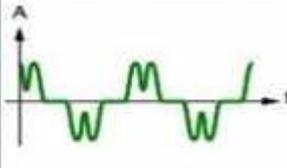
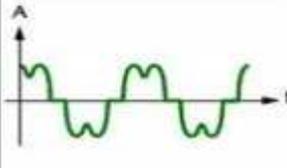
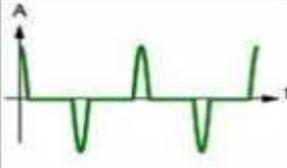
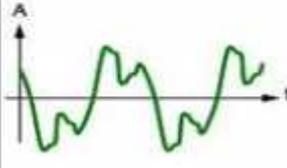
Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés. En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale [59].

On représente quelques principales charges non linéaires situées dans les réseaux électriques, comme par exemple:

- gradateur monophasé.
- redresseur triphasé à thyristor.
- moteur asynchrone.

Le tableau 4.1 montre quelques charges non linéaires citées ci-dessus [55]:

Tableau 4.1 Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre
Variateur de vitesse		
Redresseur / chargeur		
Charge informatique		
Eclairage fluorescent		

IV.5.2 Effets des harmoniques

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme :

- L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires.
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants.
- Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.
- Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.
- La dégradation de la précision des appareils de mesure.
- Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique notamment [60].

IV.6 Mesures et prévention des harmoniques

IV.6.1 Mesures des harmoniques

La mesure de cette pollution est très importante car elle permet de caractériser les installations et de s'assurer de la bonne qualité de l'énergie distribuée. Plusieurs critères existent pour mesurer les perturbations harmoniques mais c'est la Distorsion Totale des Harmoniques (en anglais, *Total Harmonic Distortion*, **THD**) qui est le plus couramment utilisé [53,56].

L'équation (4.6) peut être écrite sous la forme suivante :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h) \quad (4.6)$$

Avec :

I_1 : valeur efficace du courant du fondamental ; I_h

: valeur efficace du courant harmonique de rang h

; α_1 : déphasage du courant fondamental ; α_h :

déphasage de l'harmonique de rang h .

Le **THD** étant défini comme le rapport entre la résultante de toutes les composantes harmoniques ($h \geq 2$) et le fondamental du courant peut être exprimé en pourcentage et calculé comme suit :

$$THD = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{I_H}{I_1} \quad (4.7)$$

I : valeur efficace de $i(t)$.

I_H : résultante des composantes harmoniques.

IV.6.2 Facteur de puissance

En régime périodique, les expressions instantanées de tension et du courant sont données par :

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \beta_n) \quad (4.9)$$

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (4.8)$$

Le facteur de puissance est défini, dans le cas général, comme étant le rapport de la puissance active sur la puissance apparente.

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (4.10)$$

Avec :

$$\varphi_n = \theta_n - \beta_n \quad (4.11)$$

Dans le cas où la tension du réseau est sinusoïdale, l'équation (4.10) devient :

$$F_p = \frac{V_1 I_1 \cos \varphi_1}{V_1 \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \quad (4.12)$$

Où :

I_1 : valeur efficace du fondamental du courant ;

φ_1 : est le déphasage entre la tension et le fondamental du courant.

Les puissances active et réactive définies pour la fréquence fondamentale étant respectivement :

$$P = V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (4.13)$$

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (4.14)$$

On définit la notion de puissance déformante D permettant de rendre compte des harmoniques:

$$D = V_1 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2} \quad (4.15)$$

L'expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2 + Q^2}} \quad (4.16)$$

Ainsi, les harmoniques de courant créent une puissance dite déformante qui dégrade le facteur de puissance. On remarque qu'en régime sinusoïdal la puissance déformante est nulle et le facteur de puissance s'exprime simplement par [46,52]:

$$FP = \cos \varphi_1 \quad (4.17)$$

On constate que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance.

IV.7 Solutions pour diminuer la pollution harmonique

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose des solutions pour diminuer la propagation de l'harmonique et fournir une bonne qualité d'énergie lors de la connexion avec la charge.

Il existe quelques méthodes permettant de minimiser la pollution harmonique provoquée par les convertisseurs utilisés dans la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Parmi les plus populaires et les plus efficaces, on retrouve deux types de solutions sont envisageables. Il existe deux voies pour le filtrage de la pollution harmonique, soit le filtrage passif (solution classique) ou bien le filtrage actif (solution moderne) [64].

IV.7.1 Filtrage passif

Le principe consiste à insérer en amont de la charge un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonant série est placé en parallèle avec la charge (figure 4.7a). Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Aussi, pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passe-haut du second ordre (figure 4.7b) est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure de la charge et de la nature des récepteurs. Il est en général plus aisé et moins coûteux de rejeter par cette technique les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible [65].



(a) Filtre passif résonant

(b) Filtre passif amorti

Figure 4.7 Filtre passif

IV.7.2 Filtrage actif

Une nouvelle structure de filtres appelés filtres actifs ont été plus récemment développés. Le filtre actif est connecté en série ou en parallèle suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

En injectant un courant en opposition de phase avec les harmoniques de la charge (courants perturbateurs), le filtre actif permet d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et répond ainsi à cette problématique [64,65].

Il existe plusieurs topologies de filtres actifs selon les critères de performance recherchés. Les filtres actifs peuvent être en série, en parallèle ou hybride, c'est-à-dire, l'association d'un filtre actif et d'un filtre passif. Il existe également l'association d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle qui se nomme : conditionneur universel de la qualité

d'onde. Le filtre peut être à structure de courant ou à structure de tension selon le type d'élément lui servant de source d'énergie [65].

Une nouvelle configuration pour le convertisseur de puissance d'un filtre hybride triphasé est présentée dans la figure 4.8. Ce convertisseur de puissance utilise seulement une structure de pont en deux-bras et un condensateur. Le filtre hybride de puissance est configuré par le convertisseur de puissance proposé en série lié à un ensemble de filtres passifs [56].

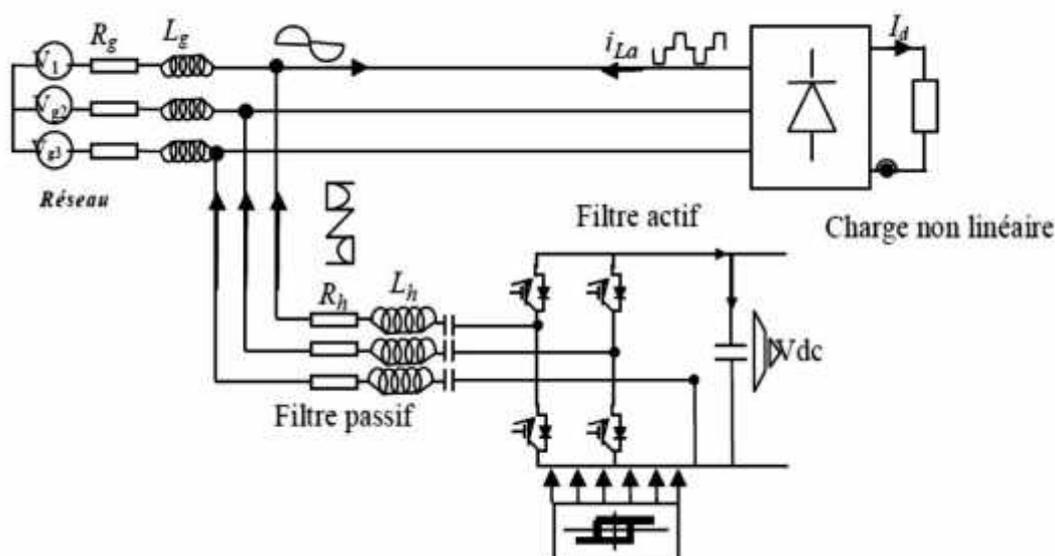


Figure 4.8 Configuration du filtre hybride de puissance à l'aide du convertisseur de puissance

IV.8 Intégration d'un système éolien avec la charge

L'augmentation de la puissance éolienne installée actuellement a un impact croissant sur le réseau de transport du fait de la difficulté à prévoir la production, de la capacité d'accueil limitée du réseau, du risque de déconnexions intempestives des fermes d'éoliennes et d'une dégradation de la qualité de l'électricité.

La nature fluctuante du vent provoque une variation importante de fréquence à la sortie du générateur, d'où la nécessité de lier ce dernier avec la charge ou le réseau par des convertisseurs statiques. Ces derniers sont susceptibles d'améliorer la qualité d'énergie en utilisant des techniques adéquates de commande. Les convertisseurs ainsi utilisés permettent d'exploiter les génératrices synchrones à des vitesses de rotation importantes et variables ce qui augmente et améliore davantage la puissance extraite de la turbine avec différentes vitesses de vent.

Après la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée avec la turbine dans la chaîne globale de l'énergie éolienne, le système éolien est à présent connecté avec la charge par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance.

IV.8.1 Étude de connexion

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

IV.8.1.1 Description du système

La chaîne de conversion d'énergie éolienne est connectée avec la charge à travers une interface d'électronique de puissance qui se compose d'un redresseur à diode (non commandé), d'un bus continu DC-DC et d'un onduleur de tension à MLI (modulation de largeur d'impulsion). Pour assurer une bonne qualité d'énergie fournie à la charge électrique et pour éliminer les harmoniques, il faut placer un filtre passif avec une inductance et capacité de filtrage (L_f , C_f) entre l'onduleur de tension et la charge. Le système proposé est représenté sur la figure 4.9 suivante :

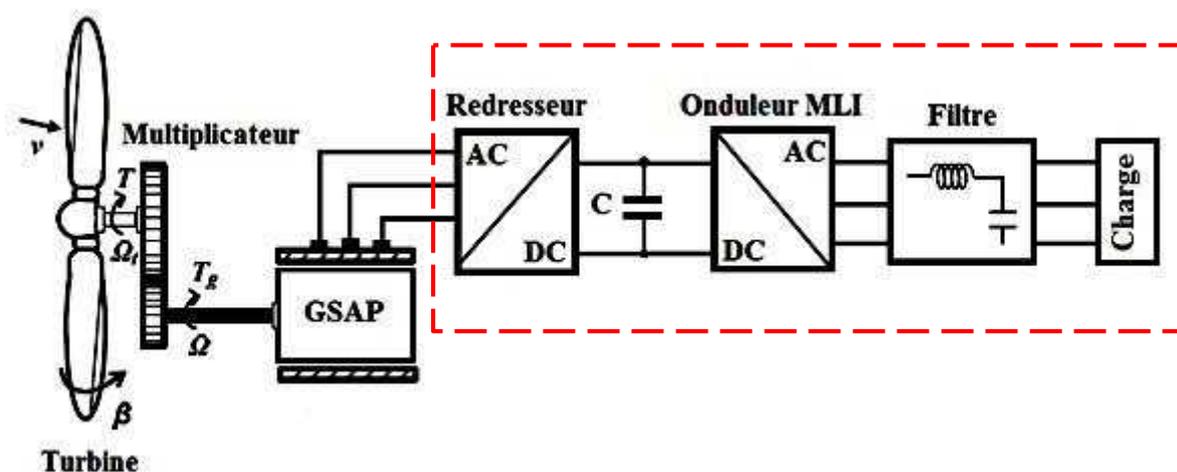


Figure 4.9 Chaîne de conversion d'énergie éolienne connectée avec la charge

Comme les modèles de la turbine, du multiplicateur, de l'arbre de transmission et de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) ont été présentés dans les chapitres précédents, ce chapitre est consacré à l'étude de la connexion du système éolien avec la charge à travers l'interface d'électronique de puissance et le filtre passif LC (encadré en rouge de la figure 4.9) [66].

Le rôle du filtre LC est de minimiser les harmoniques fournies à la charge et assurer une bonne qualité d'énergie électrique. Le système étudié est représenté en détail dans la figure suivante (figure 4.10) :

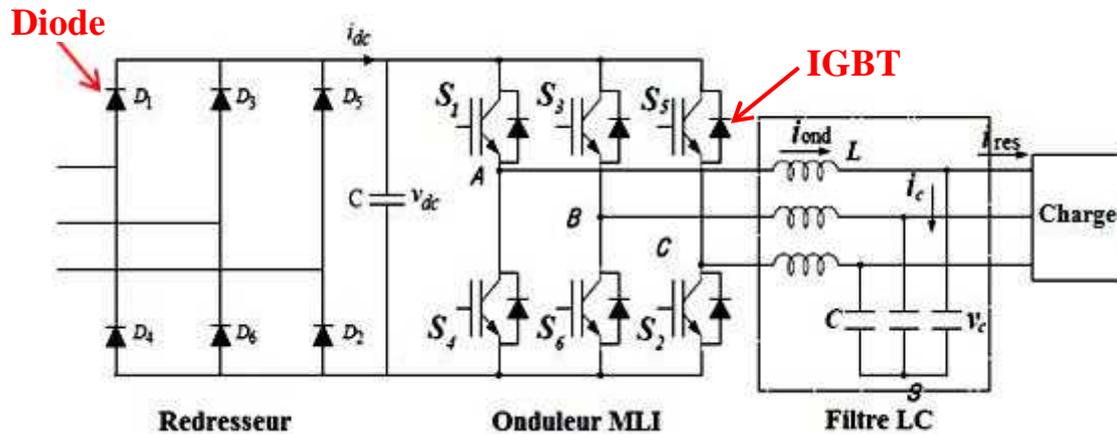


Figure 4.10 Système étudié en détails

IV.8.2 Modélisation des éléments de connexion avec la charge

IV.8.2.1 Modélisation du redresseur triphasé à diode

Le redresseur est un convertisseur « AC/DC ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternatif et il est représenté par la figure 4.11 [67] :

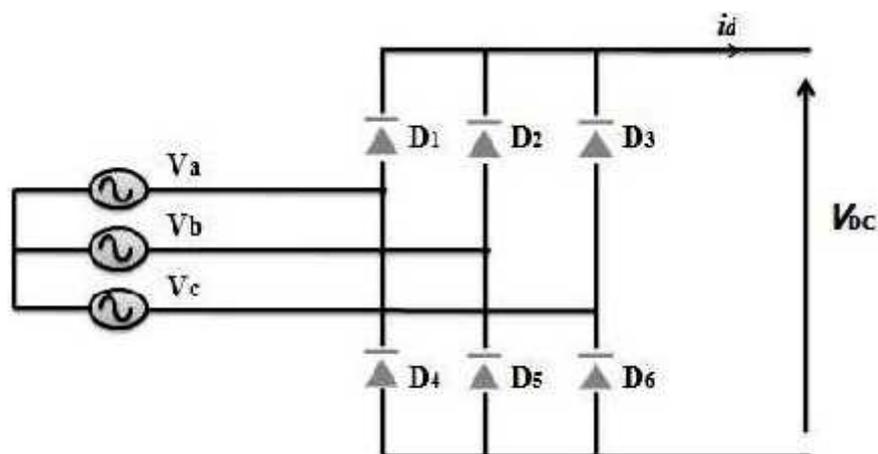


Figure 4.11 Représentation du redresseur triphasé à diode

Ce redresseur comporte trois diodes (D_1, D_2, D_3) à cathode commune assurant l'allée du courant I_d et trois diodes (D_4, D_5, D_6) à anode commune assurant le retour du courant I_d . Si on suppose que le redresseur est alimenté par trois tensions triphasées équilibrées.

$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (4.18)$$

Avec ces hypothèses, chaque diode assure la conduction du courant pendant 1/3 de la période. Dans ce cas, les courants de ligne i_a, i_b et i_c prennent à tour de rôle la valeur et la forme du courant continu I_{dc} . Les relations entre les tensions d'entrée et de sortie d'une part, et les courants d'entrée et de sortie d'autre part sont les suivantes [67,68].

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} V_{ab \max} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} V_{a \text{ eff}} \quad (4.19)$$

où V_{dc} et I_{dc} sont les valeurs moyennes de la tension et du courant en sortie du redresseur, et V_{abc}

et I_{abc} sont les tensions et courants des trois phases côté alternatif.

Considérant une séquence de conduction entre les deux phases a et b ; on aura le schéma équivalent de la figure 4.12 :

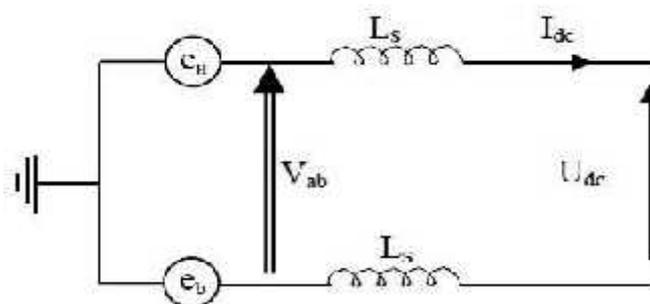


Figure 4.12 Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale

En appliquant la loi des mailles et des nœuds, nous aurons l'équation suivante reliant le courant I_a avec les tensions V_a et V_b :

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_a - V_b + V_{dc}) \quad (4.20)$$

On déduit alors les expressions des courants I_b et I_c en fonction des tensions V_a , V_b , et V_c résultants des circuits équivalents correspondants aux séquences de conduction des phases ($a-c$) et ($b-c$):

$$\frac{dI_b}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_b - V_c + V_{dc}) \quad (4.21)$$

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_c - V_a + V_{dc}) \quad (4.22)$$

Les commutations instantanées entre les différentes phases sont illustrées d'une manière claire avec les allures des tensions et des courants en amont et en aval du pont de diodes représentées sur les figures 4.13; 4.14; et 4.15 [17,69].

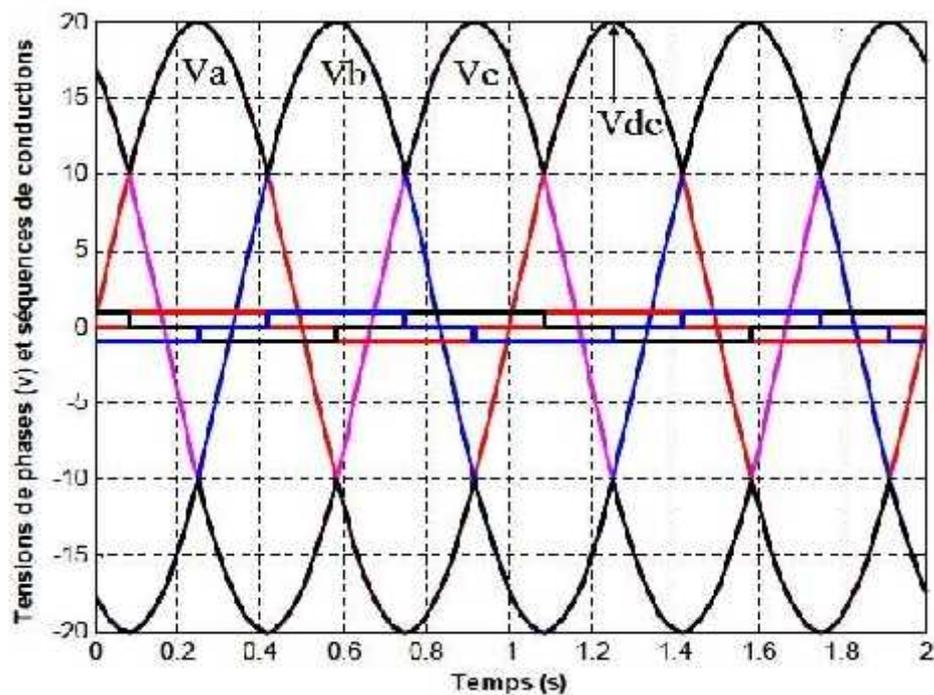


Figure 4.13 Tensions de phases et tension redressée

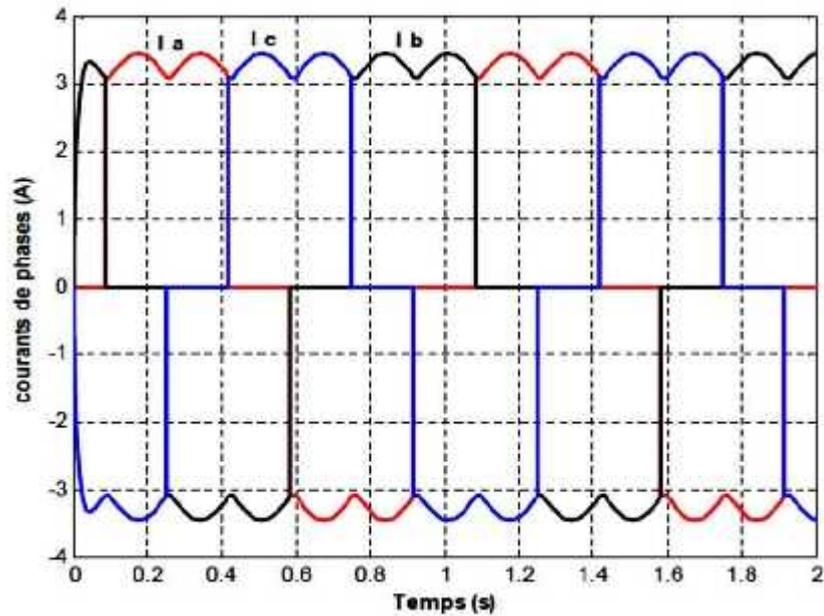


Figure 4.14 Courants de phases en amont du pont de diodes

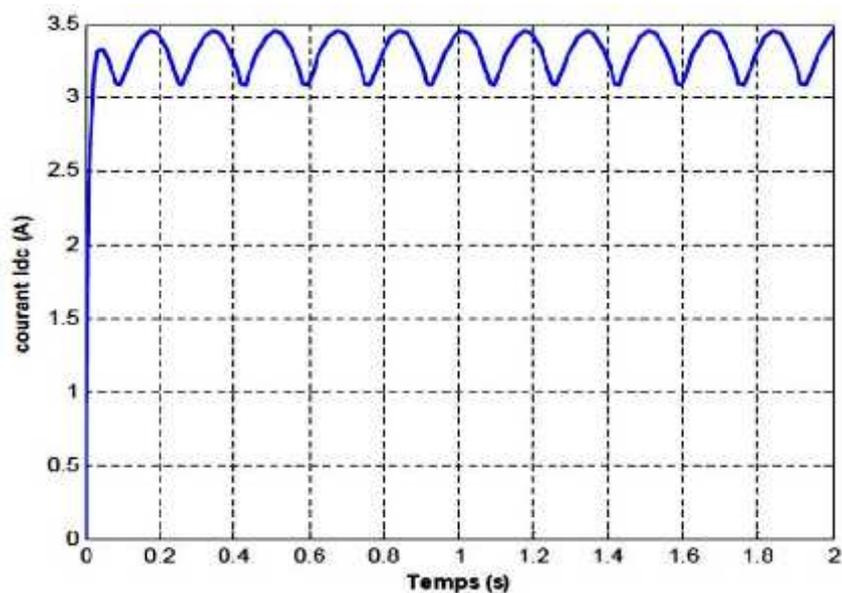


Figure 4.15 Courant redressé I_{dc} en aval du pont de diode

En réalité, la supposition précédente n'est plus juste à cause de l'effet des inductances non négligeables qui s'opposent aux variations brutales des courants et provoquent ainsi ce qu'on appelle phénomène d'empiétement des phases pendant le processus de commutation [69].

Lorsqu'en tenant compte du phénomène d'empiètement, l'allure de la tension redressée V_{dc} devient comme le montre dans la figure 4.16.

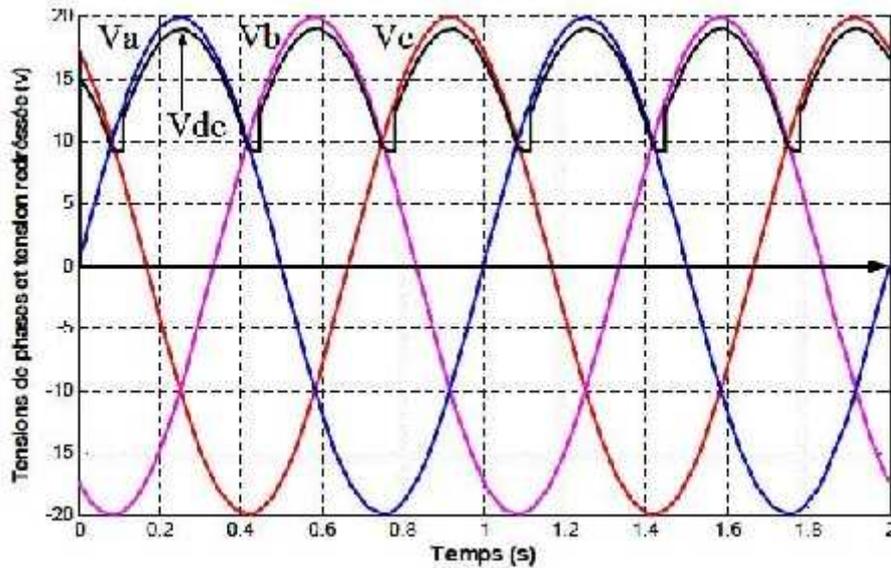


Figure 4.16 Tension redressée avec phénomène d'empiètement

IV.8.2.2 Modélisation du bus continu

Le schéma électrique du bus continu représenté sur la figure 4.17 nous montre que le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur : $i_c = i_{red} - i_{ond}$ (4.23)

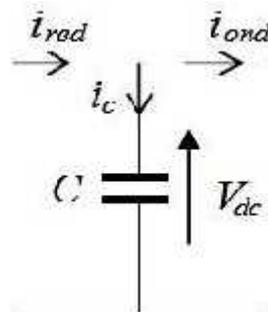


Figure 4.17 Schéma électrique du bus continu

La capacité de filtrage C va permettre d'obtenir une tension quasi continue (voir figure 4.18).

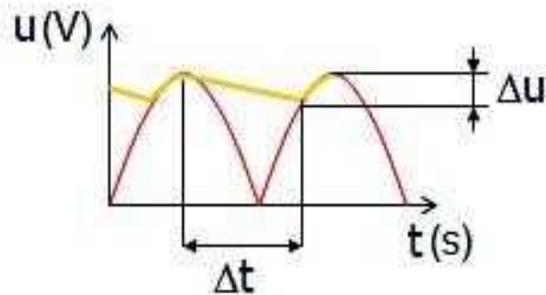


Figure 4.18 Effet de la capacité de filtrage sur la tension de sortie

Le bus continu est modélisé par la connaissance de la tension aux bornes du condensateur obtenue en intégrant l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (4.24)$$

D'où :

$$V = \int \frac{dV}{dt} + V(t_0) \quad (4.25)$$

Où $V(t_0)$ est la valeur de la tension à l'instant initial t_0 .

IV.8.2.3 Modélisation de l'onduleur (MLI)

L'onduleur de tension est un convertisseur statique du domaine de l'électronique de puissance. Il assure la transformation de l'énergie d'une source continue (tension redressé V_{dc}) en une énergie alternative. Il fonctionne en commutation forcée. Il est conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET...). Il permet d'imposer des ondes de tensions à amplitudes et fréquences réglables par la commande. Le schéma structurel de l'onduleur est illustré par la figure 4.19. Chaque IGBT-diode assemblé en parallèle forme un interrupteur bicontrôlable (à l'ouverture et à la fermeture) [69,70].

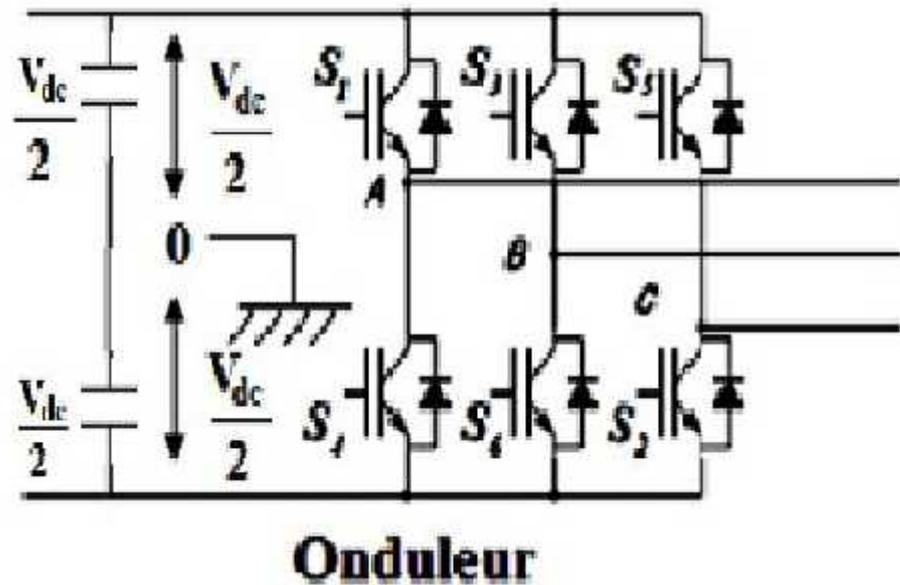


Figure 4.19 Représentation de l'onduleur de tension

Les couples d'interrupteurs (IGBT- diode) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part.

Les diodes (D_i ($i=1, 2, 3, \dots, 6$)) sont des diodes à roue libre assurant la protection des IGBTs. L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande (S_i ($i=a, b, c$)).

- $S_i = 1$, le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$, le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Ainsi, on peut écrire les tensions de phase $V_{i n a, b, c}$ en fonction des signaux de commande S_i :

$$V_{i n a, b, c} = S_i V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} \quad (4.26)$$

Les trois tensions composées V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « 0 ».

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= V_{a0} + V_{0b} = V_{a0} - V_{b0} \\
 \{V_{bc} &= V_{b0} + V_{0c} = V_{b0} - V_{c0} \\
 V_{ca} &= V_{c0} + V_{0a} = V_{c0} - V_{a0}
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Soit n le point neutre du coté alternatif, alors on a :

$$\begin{cases}
 V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\
 V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\
 V_{c0} = V_{cn} + V_{n0}
 \end{cases} \tag{4.28}$$

Le système est considéré équilibré, il en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \tag{4.29}$$

La substitution de (4.28) dans (4.27) donne :

$$V_{n0} = -\frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \tag{4.30}$$

En remplaçant (4.30) dans (4.28), on obtient :

$$\begin{cases}
 V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\
 V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\
 V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0}
 \end{cases} \tag{4.31}$$

L'utilisation de l'expression (4.26) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

Avec V_{an} , V_{bn} et V_{cn} les tensions de sortie de l'onduleur. Par conséquent, l'onduleur est modélisé par la matrice de transfert T donnée par :

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \tag{4.33}$$

- Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau de la commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau de puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur. Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont : la naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis. L'objectif de la

MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système, et par conséquent d'augmenter le rendement [71].

Dans ce travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux (voir figure 4.20).

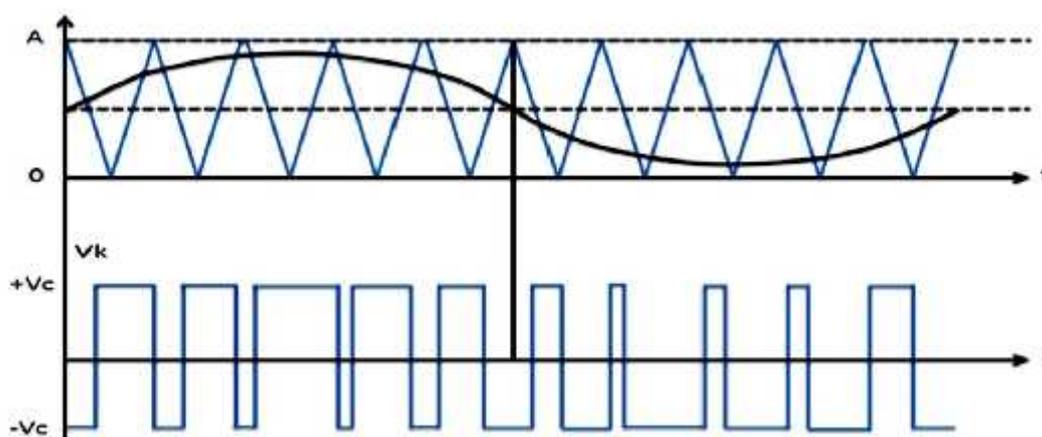


Figure 4.20 Principe de commande en MLI sinus-triangulaire

- Le premier est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second, qui est appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

On peut régler la tension de sortie de l'onduleur en agissant sur l'amplitude V_{mod} :

$$V_{mod} = \frac{V_m}{V_p} \quad (4.34)$$

Avec :

V_p : valeur de crête de la porteuse ;

V_m : valeur maximale de la tension de référence.

Ainsi, on peut agir sur l'indice de modulation m :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (4.35)$$

f_p : fréquence de la porteuse ; f_m : fréquence de la modulante.

La valeur maximale de la tension fondamentale (à la sortie de l'onduleur) vaut exactement :

$$V_{i\max} = \frac{V_{dc}}{3} V_{mod} \quad (4.36)$$

Où :

V_{dc} : tension continue à l'entrée de l'onduleur.

IV.8.2.4 Modélisation du filtre LC

L'injection de la puissance à partir du système éolien à la charge est typiquement faite par l'intermédiaire d'un onduleur de tension. Des harmoniques dans la tension de sortie du convertisseur sont habituellement atténués en reliant un filtre entre l'onduleur et la charge électrique, afin de faire face aux conditions de qualité de la puissance de charge.

Généralement, le problème harmonique peut être défini comme : la perturbation particulière qui, lancée par la présence des composants non linéaires des systèmes électriques, détermine une modification permanente des formes sinusoïdales de la tension et du courant, en termes de composants sinusoïdaux à une fréquence différente de celle de la composante fondamentale.

Les générateurs éoliens sont reliés avec la charge par des convertisseurs statiques et peuvent donc potentiellement causer des harmoniques, dégradant ainsi la qualité de l'énergie électrique et changeant les performances d'autres équipements sensibles aux harmoniques de tension. D'autre part, les convertisseurs statiques eux-mêmes sont sensibles aux harmoniques et peuvent fonctionner de manière non précise en raison de la présence des harmoniques. Ce phénomène rend l'utilisation des filtres dans ces systèmes indispensable.

La maîtrise des harmoniques est nécessaire pour permettre à l'utilisateur que ce soit pour un réseau électrique ou bien pour un site isolé (charge) d'avoir [72] :

- un réseau électrique **propre**, par la réduction du taux global de distorsion en courant (**THD_I**) en minimisant ou éliminant les harmoniques.
- un taux de distorsion en tension (**THD_V**) compatible avec les normes.
- de **bons** facteurs de puissance et de déphasage (0,94).
- une installation conforme aux normes actuelles et à venir en matière de pollutions harmoniques.
- une minimisation des anomalies du système éolien en réseau (exploitation du maximum des énergies possible, réduction des pertes, etc.)

La réduction du THD_I et du THD_V dépend de la diminution des harmoniques de courants les plus importants. Pour cela, plusieurs solutions ont été proposées, par exemple :

- mettre une inductance à la sortie de l'onduleur pour réduire l'amplitude de ces harmoniques (en particulier ceux de rang élevé).
- mettre en sortie de l'onduleur un filtre anti-harmonique passif de type LCL adapté à la gamme d'harmoniques à éliminer.
- utiliser un filtre actif qui réagit en temps réel aux harmoniques présents pour les éliminer. En ce qui concerne le filtrage de tension de sortie, les topologies des filtres passifs utilisées sont très diversifiées. La structure la plus adéquate avec les onduleurs à MLI est celle qui élimine les harmoniques de basse fréquence en prenant en considération l'effet résonant indésirable du circuit électrique filtre-charge, et cela par l'utilisation d'une commande appropriée [72,73].

Le **filtre LC** représenté à la figure 4.21 est souvent utilisé dans les systèmes éoliens connectés avec la charge électrique. Il est régi par les équations de tension et de courant explicitées ci-dessous [72].

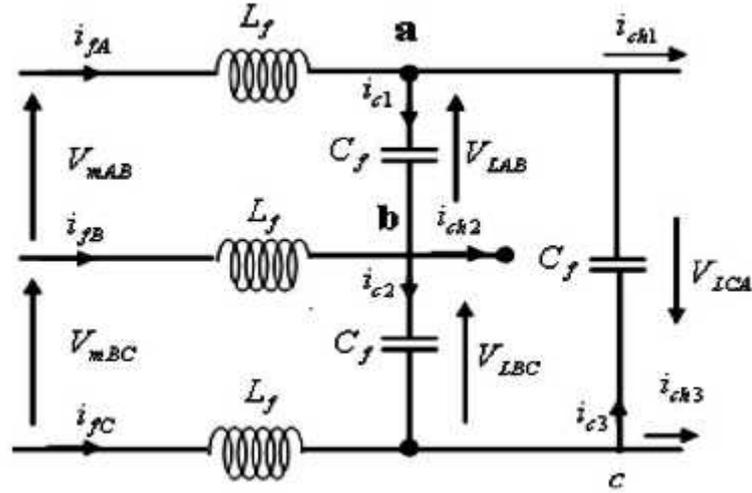


Figure 4.21 Circuit équivalent d'un filtre LC

A partir de la figure (4.21), on applique la première loi de Kirchoff (loi des nœuds). Aux points a , b et c , on obtient les équations suivantes:

- Nœud a :

$$i_{fA} + i_{c3} = i_{c1} + i_{ch1} \Rightarrow i_{fA} + C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} = C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} + i_{c1} \quad (4.37)$$

- Nœud b :

$$i_{fB} + i_{c1} = i_{c2} + i_{ch2} \Rightarrow i_{fB} + C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} = C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} + i_{ch2} \quad (4.38)$$

- Nœud c :

$$i_{fC} + i_{c2} = i_{c3} + i_{ch3} \Rightarrow i_{fC} + C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} = C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} + i_{ch3} \quad (4.39)$$

Avec :

$$i_{c1} = C_f \frac{dV_{LAB}}{dt} \quad (4.40)$$

$$i_{c2} = C_f \frac{dV_{LBC}}{dt} \quad (4.41)$$

$$i_{c3} = C_f \frac{dV_{LCA}}{dt} \quad (4.42)$$

La soustraction (4.37) de (4.38) donne :

$$\begin{aligned} i_{fA} - i_{fB} + C_f \left(\frac{dV_{LCA}}{dt} - \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) &= C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} - \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) + i_{ch1} - i_{ch2} \\ \Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{LCA}}{dt} + \frac{dV_{LBC}}{dt} - 2 \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) &= -i_{fA} + i_{fB} + i_{ch1} - i_{ch2} \end{aligned} \quad (4.43)$$

La soustraction (4.38) de (4.39) donne :

$$i_{fB} - i_{fC} + C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} - \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) = C_f \left(\frac{dV_{LBC}}{dt} - \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) + i_{ch2} - i_{ch3}$$

$$\Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} + \frac{dV_{LCA}}{dt} - 2 \frac{dV_{LBC}}{dt} \right) = -i_{fB} + i_{fC} + i_{ch2} - i_{ch3} \quad (4.44)$$

La soustraction (4.39) de (4.37) donne :

$$i_{fC} - i_{fA} + C_f \left(\frac{dV_{LBC}}{dt} - \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) = C_f \left(\frac{dV_{LCA}}{dt} - \frac{dV_{LAB}}{dt} \right) + i_{ch3} - i_{ch1}$$

$$\Rightarrow C_f \left(\frac{dV_{LAB}}{dt} + \frac{dV_{LBC}}{dt} - 2 \frac{dV_{LCA}}{dt} \right) = -i_{fC} + i_{fA} + i_{ch3} - i_{ch1} \quad (4.45)$$

Avec :

$$V_{LAB} + V_{LBC} + V_{LCA} = 0 \quad (4.46)$$

À partir des équations (4.43) à (4.46), on obtient :

$$\frac{dV_{LAB}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fAB} - \frac{1}{3C_f} i_{LAB} \quad (4.47)$$

$$\frac{dV_{LBC}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fBC} - \frac{1}{3C_f} i_{LBC} \quad (4.48)$$

$$\frac{dV_{LCA}}{dt} = \frac{1}{3C_f} i_{fCA} - \frac{1}{3C_f} i_{LCA} \quad (4.49)$$

avec :

$$i_{fAB} = i_{fA} - i_{fB}$$

$$i_{fBC} = i_{fB} - i_{fC}$$

$$i_{fCA} = i_{fC} - i_{fA}$$

$$i_{LAB} = i_{ch1} - i_{ch2}$$

$$i_{LBC} = i_{ch2} - i_{ch3}$$

$$i_{LCA} = i_{ch3} - i_{ch1}$$

En appliquant la deuxième loi de Kirchoff (loi des mailles), les équations peuvent être écrites comme suit:

$$\frac{di_{fAB}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LAB} + \frac{1}{L_f} V_{mAB} \quad (4.50)$$

$$\frac{di_{fBC}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LBC} + \frac{1}{L_f} V_{mBC} \quad (4.51)$$

$$\frac{di_{fCA}}{dt} = -\frac{1}{L_f} V_{LCA} + \frac{1}{L_f} V_{mCA} \quad (4.52)$$

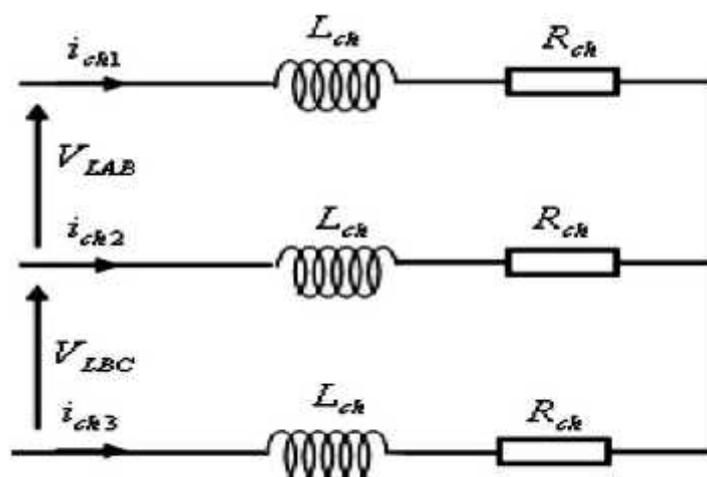


Figure 4.22 Schéma équivalent de l'impédance de la charge [73]

En appliquant la deuxième loi de Kirchoff (loi des mailles) coté charge électrique (voir figure 4.22), les équations peuvent être décrites comme suit :

$$V_{LAB} = L_{ch} \frac{di_{ch1}}{dt} + R_{ch} i_{ch1} - L_{ch} \frac{di_{ch2}}{dt} - R_{ch} i_{ch2} \quad (4.53)$$

$$V_{LBC} = L_{ch} \frac{di_{ch2}}{dt} + R_{ch} i_{ch2} - L_{ch} \frac{di_{ch3}}{dt} - R_{ch} i_{ch3} \quad (4.54)$$

$$V_{LCA} = L_{ch} \frac{di_{ch3}}{dt} + R_{ch} i_{ch3} - L_{ch} \frac{di_{ch1}}{dt} - R_{ch} i_{ch1} \quad (4.55)$$

Les équations (4.53 à 4.55) peuvent être réécrites ainsi [72,73]:

$$\frac{di_{LAB}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}} i_{LAB} + \frac{1}{L} V_{LAB} \quad (4.56)$$

$$\frac{di_{LBC}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{LBC} + \frac{1}{L}V_{LBC} \quad (4.57)$$

$$\frac{di_{LCA}}{dt} = -\frac{R_{ch}}{L_{ch}}i_{LCA} + \frac{1}{L}V_{LCA} \quad (4.58)$$

En les exprimant sous forme matricielle, on a :

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{1}{3C_f}I_f - \frac{1}{3C_f}I_L \quad (4.59)$$

$$\frac{dI_f}{dt} = -\frac{1}{L_f}V_L + \frac{1}{L_f}V_f \quad (4.60)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L}V_L + \frac{R}{L}I_L \quad (4.61)$$

avec :

$$V_L = [V_{LAB} \quad V_{LBC} \quad V_{LCA}]^T, I_f = [i_{fAB} \quad i_{fBC} \quad i_{fCA}]^T, V_f = [V_{fAB} \quad V_{fBC} \quad V_{fCA}]^T$$

IV.9 Résultats de simulation

Les différentes simulations de toute la chaîne de conversion d'énergie éolienne, réalisées sous environnement MATLAB/Simulink® ont permis d'évaluer les performances du système proposé.

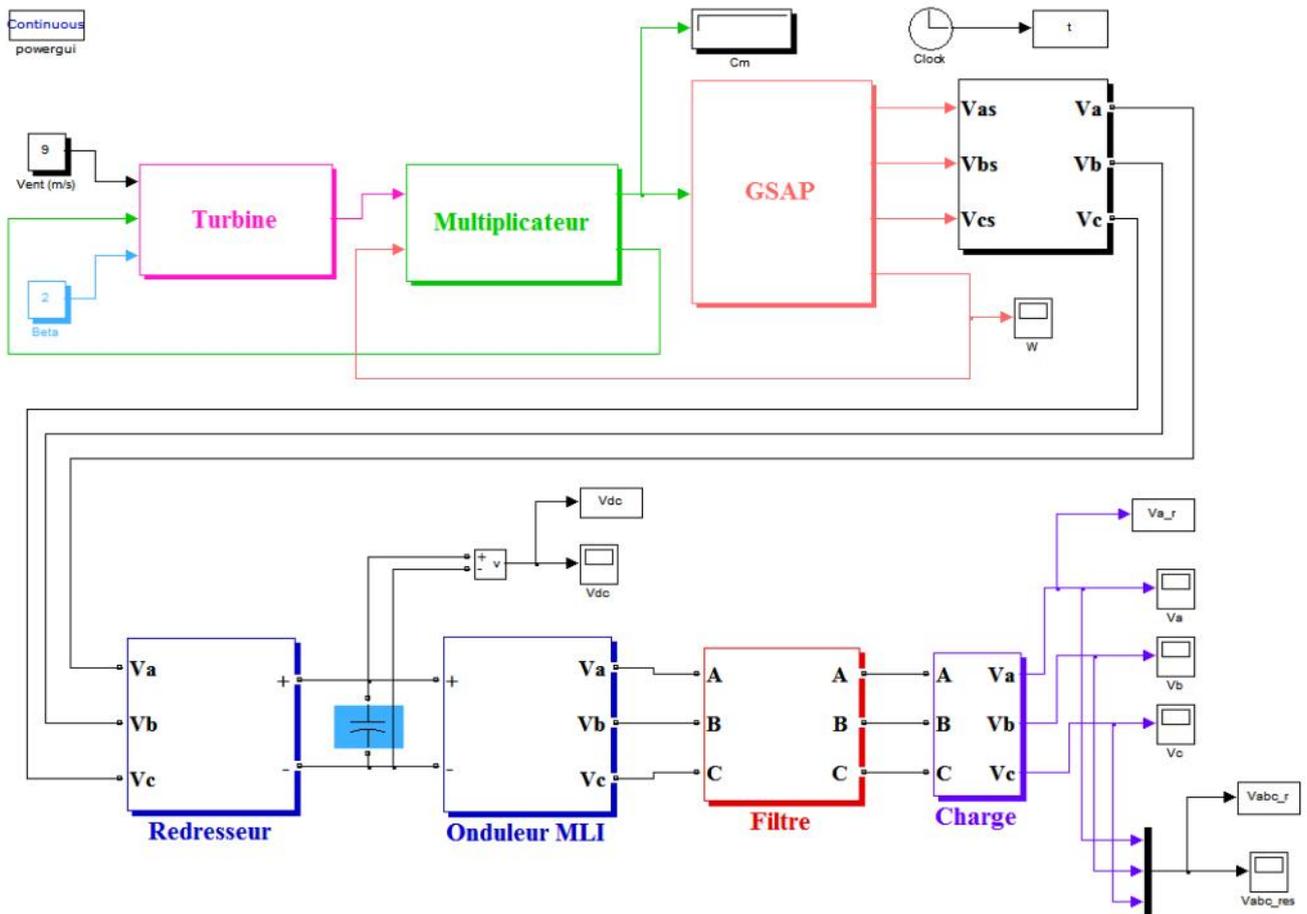


Figure 4.23 Modèle Simulink de la chaîne de conversion d'énergie éolienne avec filtrage.

Nous avons connecté notre **GSAP** à une turbine éolienne avec une vitesse de vent constante, égale à 9 m/s. Les résultats des simulations sont les suivants :

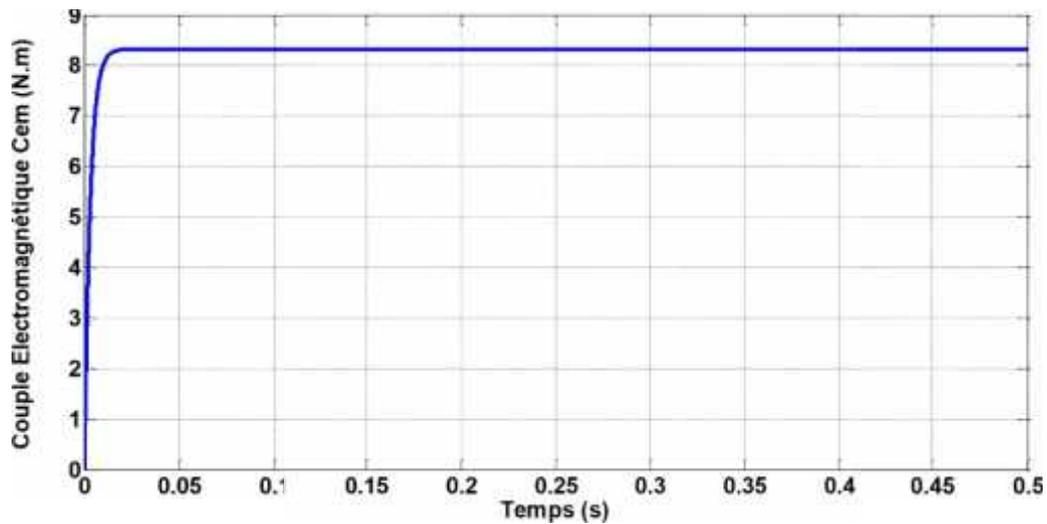


Figure 4.24 Couple électromagnétique

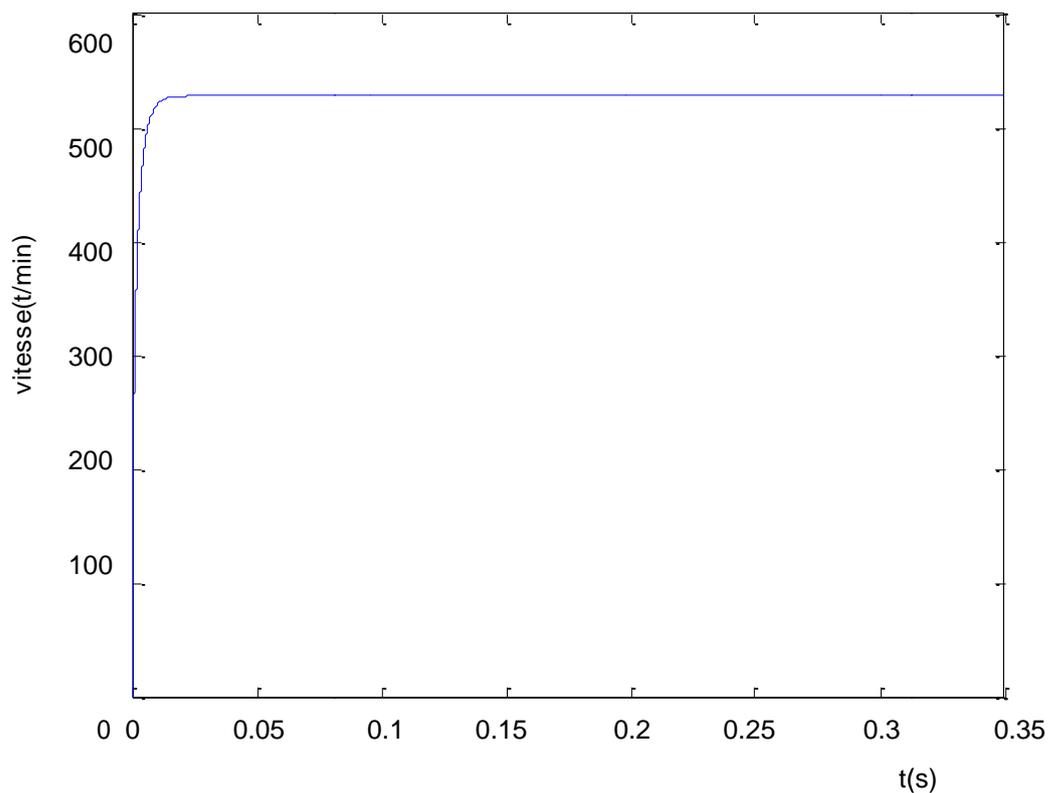


Figure 4.25 Vitesse de rotation du GSAP

Les figures 4.24 et 4.25 représentent respectivement le couple électromagnétique C_{em} et la vitesse de rotation de la génératrice (GSAP).

La tension et le courant simples statoriques de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) sont illustrés par les figures 4.26 et 4.27. Ils sont de forme sinusoïdale avec une amplitude de ± 400 V et ± 60 A.

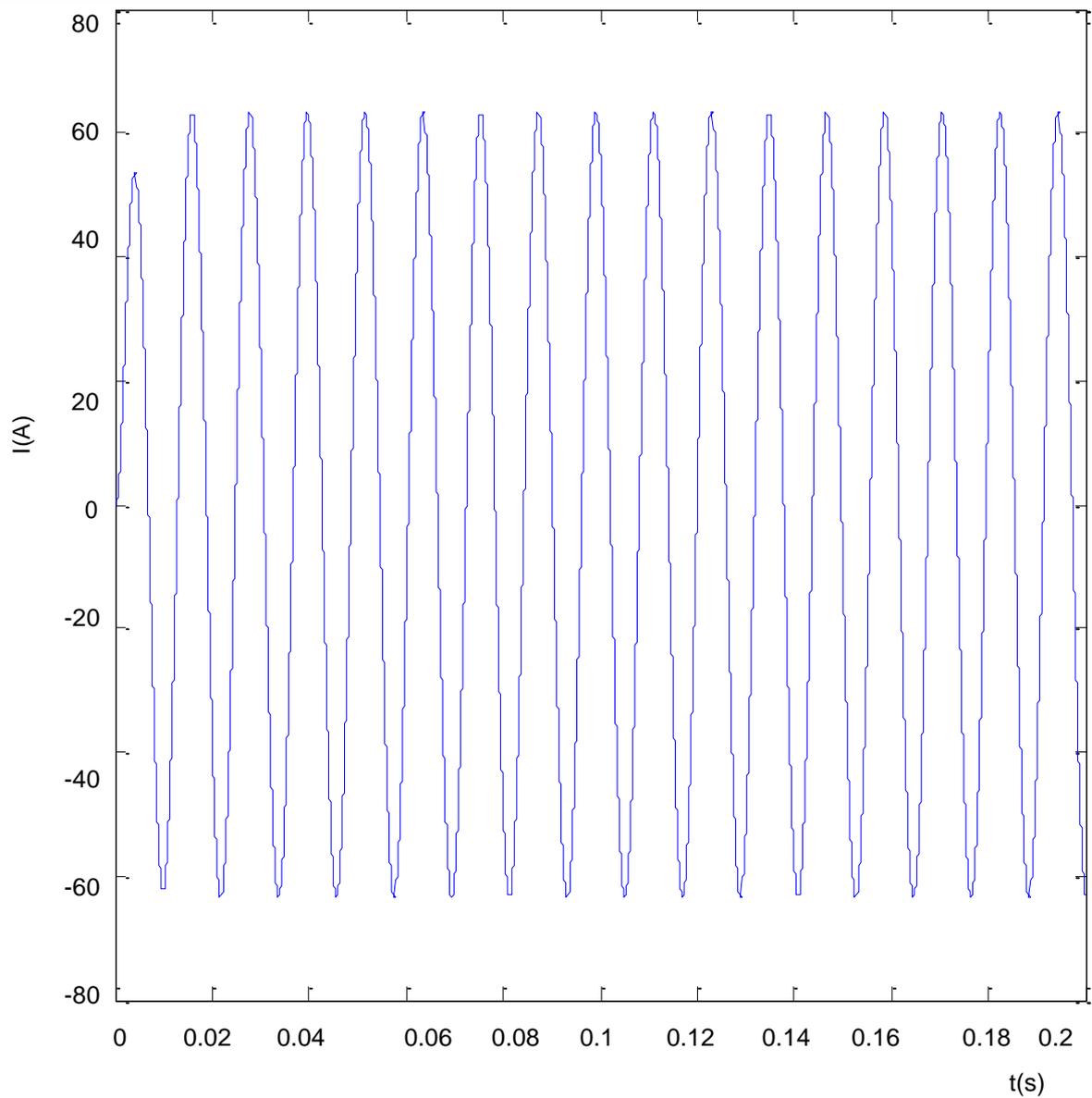


Figure 4.26 Courant simple de la GSAP (phase A)

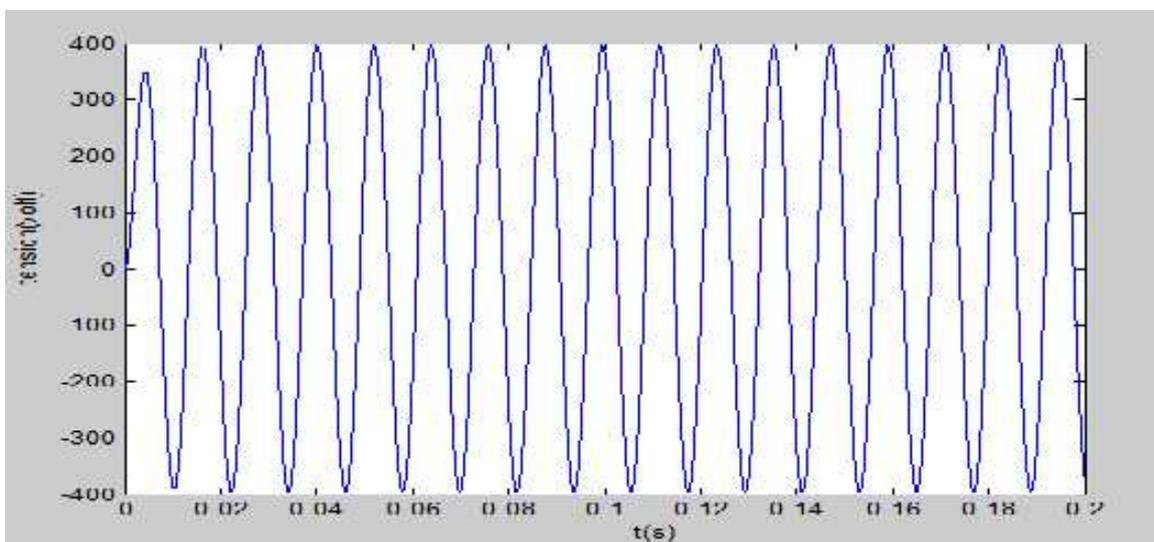


Figure 4.27 Tension simple de la GSAP (phase A)

La figure 4.28 représente la tension redressée V_{dc} par le pont à diode (redresseur non commandé). On n'observe que cette tension a une valeur maximale, égale à 685 V, après un régime transitoire de 0,02 s.

La tension V_{dc} est une tension continue, on trouve à la sortie du redresseur une capacité C servant à filtrer la tension, cette tension alimente l'onduleur à MLI.

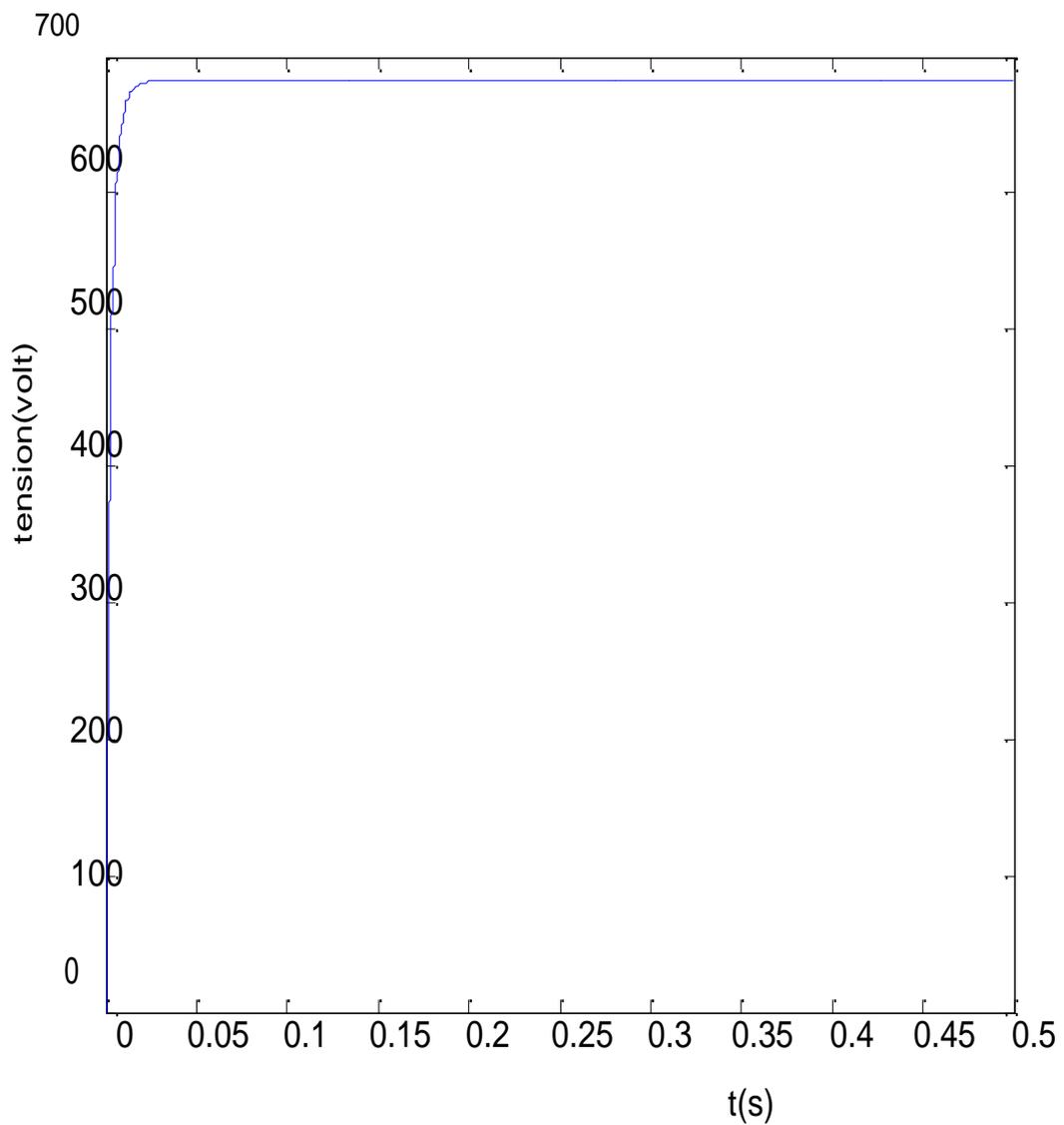


Figure 4.28 Tension en sortie du redresseur

IV.9.1 Avant filtrage

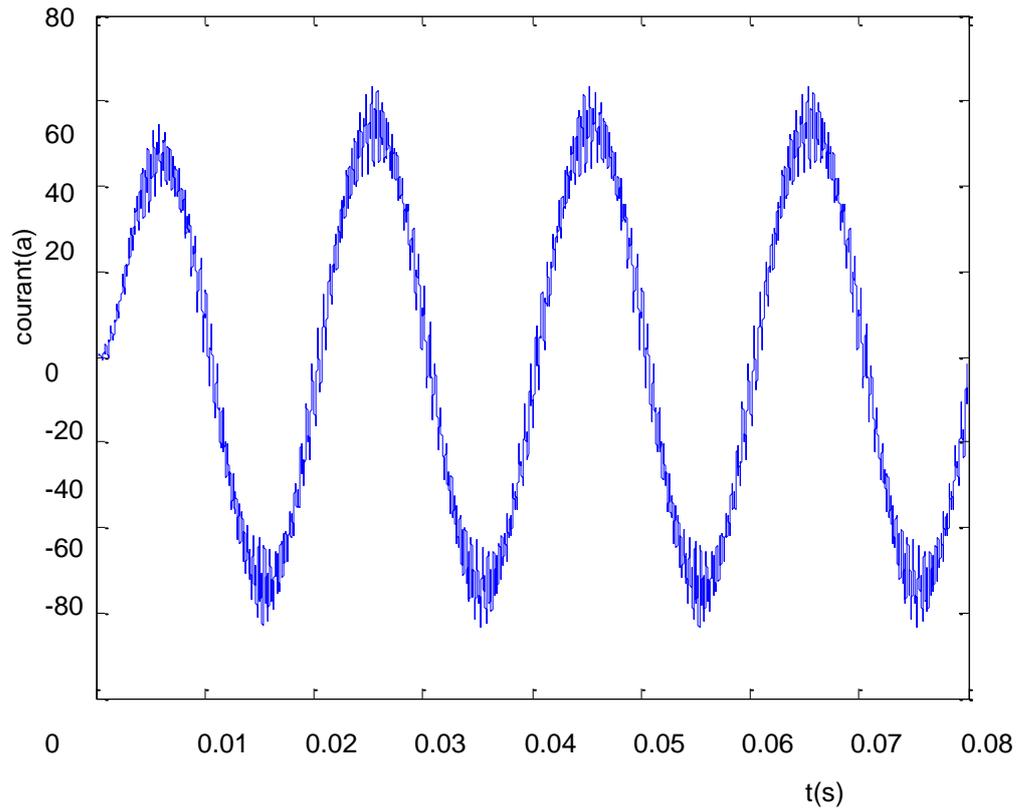


Figure 4.29 Courant simple à la sortie de l'onduleur

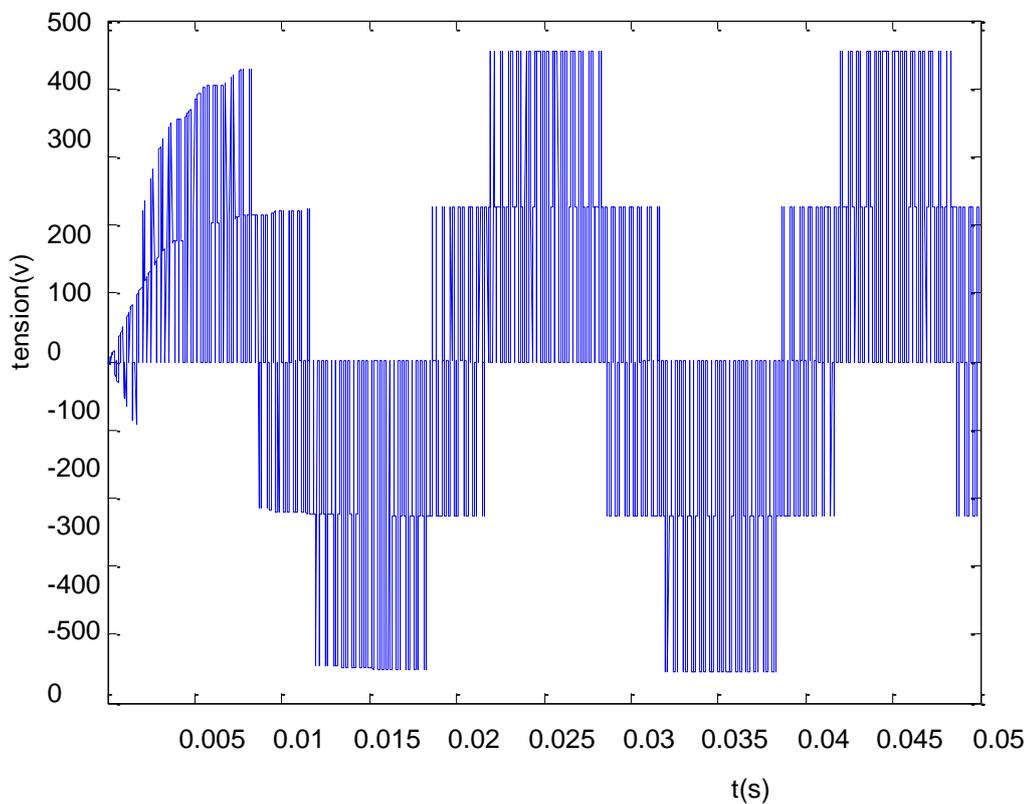


Figure 4.30 Tension simple à la sortie de l'onduleur

Les figures 4.29 et 4.30 montrent respectivement le courant à la sortie de l'onduleur et la tension modulée (tension à la sortie de l'onduleur commandé en modulation de largeur d'impulsion MLI). On remarque des déformations dans l'allure du courant et de la tension à cause de la présence des harmoniques, donc il faut identifier ces harmoniques par le spectre harmonique FFT (Fast Fourier Transform).

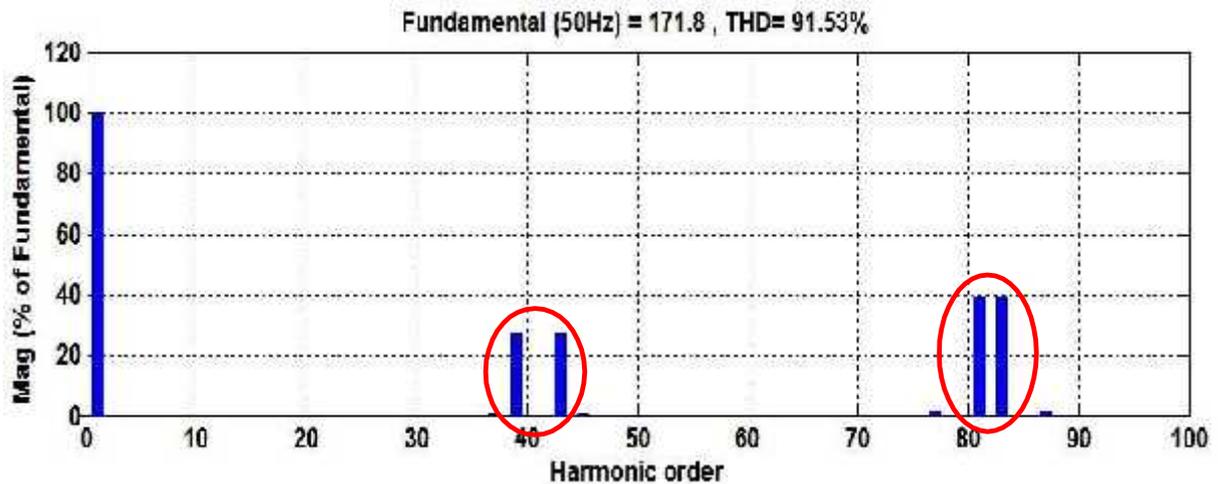


Figure 4.31 Spectre harmonique de tension avant filtrage

D'après la figure 4.31, le spectre harmonique montre que les harmoniques sont de rangs : 39h, 43h, 81h et 83h. On observe que les harmoniques de rang pair sont nuls. Le taux de distorsion harmonique de tension THD_V à une grande valeur de 91,53%.

Il faut placer un filtre LC raccordé entre l'onduleur et la charge pour réduire la propagation des harmoniques fournie à la charge.

IV.9.2 Après filtrage

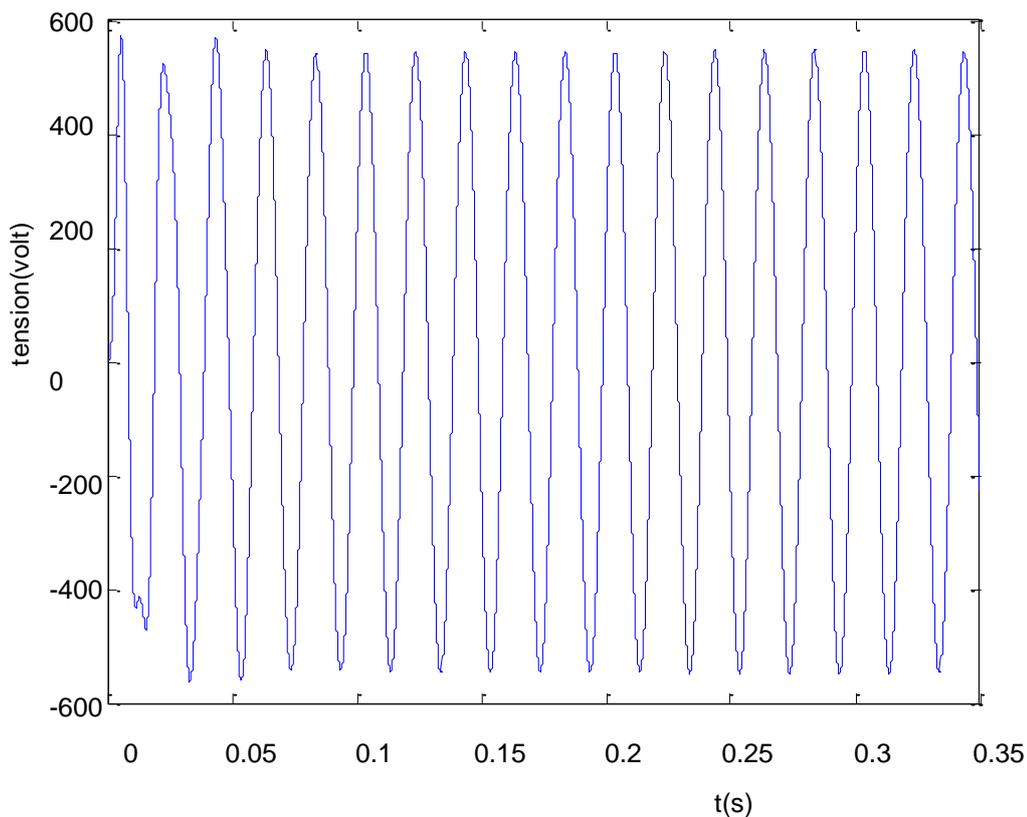


Figure 4.33 Tension composée fournie à la charge

Les figures 4.32 et 4.33 représentent le courant et la tension fournis à la charge. Après l'application du filtre LC, on enregistre une nette amélioration dans l'allure de la tension et du courant avec des courbes moins bruitées.

Le rôle du filtre LC est d'atténuer les harmoniques engendrées par l'onduleur.

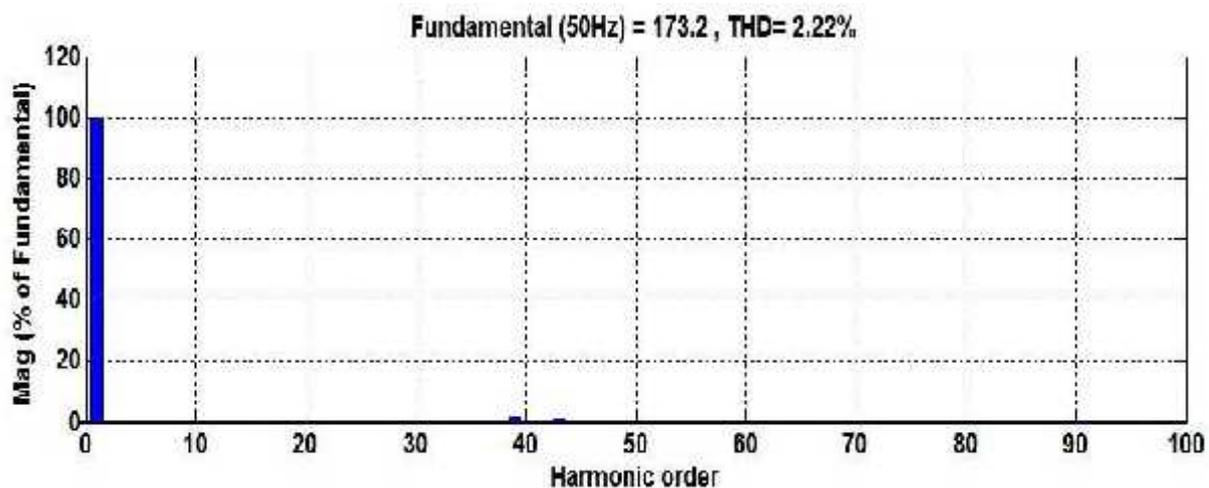


Figure 4.34 Spectre harmonique de tension après filtrage

Après filtrage, le courant et la tension ont été dépollués à un niveau assez satisfaisant, ceci est conforté par le spectre harmonique de tension avec un THD_v de taux 2,22% inférieur à 5% (norme IEEE standard 514) comme illustré dans la figure 4.34.

Les résultats de simulation réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink[®], montrent clairement l'intérêt du filtre LC qui joue un rôle prépondérant pour une fourniture d'énergie propre et de bonne qualité issue de l'éolienne à la charge électrique.

Tableau 4.7 Paramètres de simulations

Paramètres de la turbine éolienne	
Rayon de l'éolienne	$R=4,5$ m
Gain du multiplicateur de vitesse	$G=75$
Masse volumique de l'air	$= 1,22$ kg/m ³
Paramètres de la GSAP	
Puissance nominale	$P=600$ W
Résistance statorique	$R_s=0,895$
Inductance statorique selon l'axe d	$L_d= 1,2$ mH
Inductance statorique selon l'axe q	$L_q=2,11$ mH
Flux des aimants permanents	$\varphi = 0,9$ Wb
Nombre de paire de pôles	$P =3$
Inertie de l'ensemble turbine et génératrice	$J= 0,00141$ kg.m ²
Paramètres du filtre LC	
Inductance du filtre	$L_f = 0,4$ mH
Capacité du filtre	$C_f = 100$ μ F
Paramètres de la charge	
Résistance de la charge	$R_{ch} =5$
Inductance de la charge	$L_{ch} =2$ mH

IV.10 Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre apporte une synthèse sur les contraintes liées au raccordement des éoliennes avec la charge et les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de l'énergie électrique, ainsi que les solutions possibles pour minimiser ces effets. Particulièrement et plus précisément nous nous sommes intéressés aux problèmes engendrés par la pollution harmonique dans la charge électrique.

Une application du filtre a été traitée lors de la connexion du système éolien avec la charge. Il s'agit d'un filtre LC placé entre l'onduleur à MLI et la charge. Les résultats obtenus dans ce travail nous permettent de visualiser l'efficacité du filtre. En fait, le taux de distorsion harmonique de tension THD_V passe de 91,53% à 2,22% après l'utilisation du filtre. Ainsi que les harmoniques ont été minimisé de façon très réduite, c'est-à-dire les signaux de la tension et le courant sont devenus proche d'un signal sinusoïdal.

Enfin, des normes internationales ont été mise en place pour assurer une bonne qualité d'énergie électrique fournie aux consommateurs (réseau électrique, site isolé,...) sont respectées grâce au filtrage des harmoniques.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette mémoire concernent, l'amélioration de La qualité de l'énergie électrique dans un système de production éolienne à base d'un moteur synchrone à aimant permanent à partir de ressource renouvelable intermittente (éolienne) pour des applications en sites isolés ou bien intégrés aux réseaux électriques. Les premiers objectifs ont été d'effectuer un état de l'art sur l'énergie éolienne d'évaluer la potentialité de chaque structure et de Proposer des solutions aux nouvelles contraintes imposées aux générateurs éoliens termes de qualité d'énergie fourni d'électricité.

Les machines synchrones à aimants permanents apportent une solution intéressante pour l'utilisation de L'énergie éolienne ; ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines classiques notamment une durée de vie important un rendement élevé et une maintenance réduite.

La structure de la GSAP à intégrer dans le système de conversion d'énergie éolienne envisagé a été modélisée de façon très poussée. Par la suite, des modèles de simulation pour la source éolienne ainsi que pour les éléments d'interconnexion avec la charge ont été développés sous environnement MATLAB Simulink.

Pour la chaîne de conversion d'énergie éolienne, on a représenté le modelé avec tous ses élément : rotor éolien, générateur à aimant permanents, redresseur non commandé, onduleur à MLI et le filtre LC. Pour la maximisation de l'énergie contenue dans le vent, la commande adoptée pour la chaîne éolienne ont été basé sur la technique de recherche du point optimal de puissance MPPT' adoptée ici est basée sur l'architecture et la connaissance de la caractéristique de la voilure (via la vitesse réduite).

Les résultats des simulations réalisées à partir du système proposé montrent clairement L'intérêt du filtre LC qui joue un rôle prépondérant dans la fourniture d'énergie propre et de bonne qualité à la charge électrique avec le filtrage des harmoniques.

Les résultats de simulations obtenus ont permis de montrer un bon comportement énergétique du système complet. L'utilisation de ce type de production d'énergie éolienne est très intéressante en site isolé .surtout pour les applications du pompage d'eau.

Ce travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'enrichissement de l'ensemble du système de production d'énergie éolienne, dont le but est d'optimiser le transfert d'énergie et d'envoyer une énergie propre non polluante à la charge ou bien au réseau électrique.

- [1] **G. Cognet, P. Hesto, J.-L. Houzelot, Ch. Rombaut, J. Taine, B. Tamain**, « *L'énergie au XXI^{ème} siècle Une réflexion prospective Une analyse des verrous scientifiques et technologiques à lever* », <http://www.recherche.gouv.fr/mstp/MRNT/MSTP/01-2004>
- [2] **John R. Fanchi**, « *Energy: Technology and directions for the future* », Elsevier Academic Press Copyright © 2004,
- [3] **B. Sørensen**, « *Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects* », Copyright. 2004 by Elsevier Science
- [4] « *Perspectives d'offre d'énergie* », *Techniques de l'Ingénieur*, BE 8 515 -2005, www.windpower.org
- [5] **A. MIRECKI** « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* », Thèse de doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.
- [6] *Survey Of Energy Resources*. <http://www.worldenergy.org>
- [7] **P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi**, « *Éoliennes* », *Techniques de l'Ingénieur*, BM 4 640.
- [8] « *Energies Renouvelables* ». <http://www.energies-renouvelables.org>
- [9] **Guy Cunty**, « *Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne* », © Edissud, Aixen-Provence, 2001, www.edisud.com
- [10] **H. Camblong**, « *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable* », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.
- [11] **Dr. Gary L. Johnson**, « *Wind Energy Systems* », Chapter 1-Introduction, November, 2001
- [12] *Eoliens autonomes, Guide de l'acheteur, Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables, Ressources naturelles Canada*, www.rncan.gc.ca/penser
- [13] <http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index.htm>
- [14] <http://www.windpower.org/fr/tour/design/concepts.htm>
- [15] **L.Leclerco**, « *Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes* », thèse de doctorat de l'université de Lille, n° d'ordre : 3563, UFRR IEEEA Décembre 2004.

- [16] <http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/blades.htm>
- [17] <http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/stall.htm>
- [18] **S. El Aimani** « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabité avec L'université des sciences et technologies de Lille 1 (USTL), 06 décembre 2004.
- [19] **J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey**, « A survey on variable-speed wind turbine system », Federal University of Santa Maria – UFSM. Group of Power Electronics and Control – EPOC. 97015-900, Santa Maria, RS, Brazil.
- [20] « Convertisseurs et machines électriques » *Techniques de l'Ingénieur*, D 3 960
- [21] **Y. Chen, P. Pillay, A. Khan**, « PM Wind Generator Topologies », *IEEE Transaction on industry application*, vol. 41, No. 6, Novembre/Décembre 2005.
- [22] **M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. Carlos Burgos**, « Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid », *IEEE Transaction on energy conversion* vol 21, n°, 1, Mars 2006.
- [23] **F. Poitiers**, « Etude et Commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, 19 Décembre 2003, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, n°. ED 0366-125.
- [24] **F. Sahin**, « Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine », thèse de doctorat de l'Université de Eindhoven, 2001.
- [25] **L.H. Hansen, P.H. Madsen, F. Blaabjerg, H.C. Christensen, U. Lindhard, K. Eskilsen**, « Generators and power electronics technology for wind turbines », *IECON'01 : The 27th annual conference of the IEEE industrial electronic society*. 0-7803-71089/01/\$10.10©2001 IEEE
- [26] **M. Poloujadof**, « Machines asynchrones, Régime permanent », *Techniques de l'Ingénieur*, D3480.
- [27] **Dr. Gary L. Johnson**, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001
- [28] **A. B. Raju, K. Chatterjee, B. G. Fernandes**, « A Simple Maximum Power Point Tracker for Grid connected Variable Speed Wind Energy Conversion System with Reduced Switch Count Power Converters », 0-7803-7754-0/03/\$17.00 ©2003 IEEE

- [29] **S.R.Guda**, « *Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation* ». thèse de master de l'université de Bozeman, Monata. Juillet 2005
- [30] **A.D. Hansen, C.Jauch, P.Sørensen, F.Iov, F. Blaabjergm**, « *Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIgSILENT* », projet de recherche, laboratoire national de Riso, Roskilde. Décembre 2003.
- [31] <http://www.windpower.org/fr/tour/wres/betz.htm>
- [32] **S. Heier**, « *Grid Integration of Wind energy Conversion Systems* », John Wiley & Sons, 1998, ch. 1-2.
- [33] **B. Multon**, « *Application des aimants aux machines électriques* », Notes de cours version 2006 Ecole Normale Supérieure de Cachan, antenne de Bretagne, Département de Mécatronique
- [34] **M. Kant**, « *Actionneurs à collecteur à aimant permanent* », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique D 3 695.
- [35] **R.Abdessemed, M.Kadjoudj**, « *Modélisation des Machines Electriques* », Presses de l'Université de Batna 1997.
- [36] **B. N. Mobarkah**, « *Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne' des paramètres* », thèse de doctorat de l'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001
- [37] **T. Nakamura, S.Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda**, « *Optimum Control of IPMSG for Wind Generation System* », 0-7803-7 156-9/02/\$10.000 2002 IEEE.
- [38] **A. B. Raj, E. G. Fernandes, K. Chatterjee**, « *A UPF Power Conditioner with Maximum Power Point Tracker for Grid Connected Variable Speed Wind Energy Conversion System* », 0-7803-7754-0/03/\$17.00 02003 IEEE
- [39] **S. Morimoto, H. Nakayama, M. Sanada, Y. Takeda**, « *Sensorless Output Maximization Control for Variable-Speed Wind Generation System Using IPMSG* », 0-7803-78830/03/\$17.00 © 2003 IEEE
- [40] **Z. Chen, E. Spooner**, « *Wind turbine converters : A comparative study* », Power Electronics and Variable SDeed Drives, 21-23 September 1998, Conference Publication No. 456 © IEE 1998
- [41] **D.B.Alexandre**, « *Etude et optimisation d'un ensemble alternateur à aimants / redresseur commandé. Application à un véhicule hybride* ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine. Décembre 2000.

- [42] **K. Amei, Y. Igkayasu, T. Ohji, M. Sakui**, « *A Maximum Power Control of Wmd Generator System Using a Permanent Magnet Synchronous Generator and a Boost Chopper Circuit* », 0-7803-7 156-9/02/\$10.000 2002 IEEE
- [43] **E. F. Mogo**, « *Production décentralisée dans les études pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources* ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille, n° d'ordre : 2005 -14
- [44] **A. Bouscayrol, Ph. Delarue, X. Guillaud**, « *Power strategies for maximum control structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine* », *Renewable Energy* 30 (2005) 2273–2288, www.elsevier.com/locate/renene
- [45] **S. El Aimani, B. François, B. Robyns**, « *Modélisation de générateurs éoliens à vitesse variable Connectés à un bus continu commun*, *Forum International sur les Energies Renouvelables, FIER 2002, T'etouan, Maroc, 8-10 mai 2002.*
- [46] **J.T.G. Pierikm, J. Morrenm, E.J. Wiggelinkhuizen, S.W.H. de Haan, T.G. van Engelen, J. Bozelie**, « *Electrical and Control Aspects of Offshore Wind Farms II (Erao II), Volume 1: « Dynamic models of wind farms* », Juin 2004
- [47] **S. Achilles, M. Poller**, « *Direct Drive Synchronous Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms*» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol 17, No. 2, June 2002
- [48] **H. Kanaan, K. Al-Haddad**, « *Evaluation comparative des techniques de commande par MLI et par hystrésis : Application au redresseur triphasé à injection de courant*»
- [49] **G. Séguier, F. Labrique, H. Buyse, R. Bausière**, « *les convertisseurs de l'électronique de puissance* », volume 5
- [50] **M. Ivan**, « *Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance* », *Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM)*
- [51] **I. Schiemenz and M. Stiebler**. « *Control of a permanent magnet synchronous generator used in a variable speed wind energy system* » . In *IEEE Electric Machines and Drives Conférence, IEMDC 2001*, pages 872–877, 2001.
- [52] **P. Bartholomeus, P. Lemoigne, C. Rombaut**, « *Etude des limitations en puissance des convertisseurs et apport des techniques multiniveaux* », *Actes du colloque Electronique de puissance du Futur, EPF'96, Grenoble, 1996*, pp. 121-126