

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat
Département : Electrotechnique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande Electrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Etude et Simulation d'une Machine Synchrone à aimants permanents pour une application éolienne

Présenté par : Chekiil Maimouna

Boukermouche Besma

Encadrant : Ourici Amel

Grade M. C. A

BADJI Mokhtar - Annaba

Jury de Soutenance :

<i>M Chine Abdelghani</i>	M.C.A	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
<i>M^{me} Ourici Amel</i>	M. C. A	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
<i>M^{me} Soltani Fatma</i>	M.C.B	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciement

Nous remercions Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a accordé durant toutes ces longues années d'études lesquelles nous ont permis d'arriver là où nous sommes.

Nous remercions également **Mme OURICI Amel** d'avoir accepté de nous encadrer et de nous aider durant l'élaboration de ce mémoire.

On remercie également les membres de jury d'avoir accepté d'honorer par leur présence la soutenance de notre mémoire de fin d'étude.

Enfin, nous tenons à exprimer toutes notre reconnaissance et notre gratitude à toutes les personnes qui nous ont aidé et encouragé dans les moments difficiles et qui nous ont donné la force et la volonté de continuer et réaliser cet excellent travail.

A tous nos professeurs du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Dédicace

A Mes Chers Parents : Mon Père Mohamed Qui M'a Toujours Soutenu, Ma Chère Mère Fatiha Qui Est Tout Pour Moi, « Que Dieux Me Les Protège ».

A Mes Sœurs : Asma, Kha oula, Amina.

A Mes Frères : Abderrahim, Chouaib et surtout Radouane.

A mon collègue de travail : Bisma.

A Toutes mes amies et ma famille.

Et enfin tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin durant l'élaboration de ce travail.

Maimouna

Dédicace

*A Mes Chers Parents : Mon Père Zekri Qui Ne Cesse Pas De M'encourager
Et Qui M'à Toujours Soutenu, Ma Jolie Mère Farida Qui Est Tout Pour Moi,
Pour Sa Profonde Tendresse « Que Dieux Me Les Protège ».*

A Mes Sœurs : Nadia et Halima.

A Mon Frère : Imed.

A Mon Marie : Abdessamie.

A mon collègues de travail : Maimouna.

A Toutes mes amies et ma famille.

Et enfin tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin durant l'élaboration de ce travail.

Besma

Résumé

Dans ce mémoire nous abordant le potentiel national de l'énergie éolienne et les différentes structures utilisé dans le système éolien ; notre étude est basée sur une Génératrice Synchrones à Aimant Permanent (PMSG) débitant dans le réseau de puissance à travers une chaîne complète de convertisseurs statiques. Pour cela, nous proposons un schéma de commande de la machine synchrone, comportant un premier dispositif alternatif/continu suivi d'un second dispositif continu/alternatif. Le principe MPPT (Maximum Power Point Tracking, 'MPPT') repose sur la variation de vitesse de la turbine suivant celle du vent en cas de raccordement indirect de la génératrice avec le réseau. Ainsi la commande convenable de la machine, l'onduleur MLI et le couplage avec le réseau ; afin d'aboutir à une tension et fréquences cohérente. Les simulations sur Matlab-Simulink, présentées en fin de mémoire, confirment une bonne adéquation du schéma de commande, du choix des paramètres de réglage ainsi que l'architecture de la chaîne de conversion aux objectifs assignés.

Les mots clés : L'énergie éolienne ; (PMSG) ; MPPT ; L'onduleur ; MLI ; Matlab-Simulink.

Summary: In this dissertation we discuss the national potential of wind energy and the different structures used in the wind system; our study is based on a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) outputting into the power network through a complete chain of static converters. For this, we propose a control diagram of the synchronous machine, comprising a first AC / DC device followed by a second DC / AC device. The MPPT principle (Maximum Power Point Tracking, "MPPT") is based on the variation of the speed of the turbine according to that of the wind in the event of indirect connection of the generator to the network. Thus the proper control of the machine, the PWM inverter and the coupling with the network ; in order to achieve a coherent voltage and frequencies. The simulations on Matlab-Simulink, presented at the end of the thesis, confirm a good adequacy of the control diagram, the choice of adjustment parameters as well as the architecture of the conversion chain with the assigned objectives.

Keywords: Wind energy; (PMSG); MPPT; The inverter; MLI; Matlab-Simulink.

ملخص : في هذه الرسالة نناقش الإمكانيات الوطنية لطاقة الرياح والهياكل المختلفة المستخدمة في نظام الرياح ؛ تعتمد دراستنا على مولد متزامن مغناطيسي دائم (PMSG) يتم إخراجها في شبكة الطاقة من خلال سلسلة كاملة من المحولات الثابتة. لهذا نقترح رسم تخطيطي للتحكم في الجهاز المتزامن، يشتمل على أول جهاز AC / DC متبوعاً بجهاز DC / AC ثانياً. يعتمد مبدأ MPPT (الحد الأقصى لتتبع نقطة الطاقة، "MPPT") على تغيير سرعة التوربين وفقاً لسرعة الرياح في حالة التوصيل غير المباشر للمولد بالشبكة وبالتالي التحكم المناسب في الآلة، وعاكس PWM والاقتران بالشبكة؛ من أجل تحقيق جهد وترددات متسقة. تؤكد عمليات المحاكاة على Matlab-Simulink ، المقدمة في نهاية الأطروحة ، كفاية جيدة لمخطط التحكم ، واختيار معلمات الضبط وكذلك بنية سلسلة التحويل مع الأهداف المحددة.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح , (آلة متزامنة المغناطيس الدائم), MPPT, العاكس, MLI , Matlab-Simulink

Sommaire

Introduction générale

CHAPITRE 1 : étude et simulation d'un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion.

I.1.Introduction.....	1
I.2.Définition de l'onduleur.....	1
I.3.Classification des onduleurs	2
I.3.1. Onduleurs non autonome	2
I.3.2. Onduleurs autonome	2
I.3.2.1. Onduleurs de tension	3
I.4.Types d'onduleurs autonomes de tension	3
I.4.1. Les onduleurs monophasés	4
I.4.2. Les onduleurs triphasés	4
I.4.3. Les onduleurs multi niveaux	5
I.5.Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé	5
I.6.Différents types de commande des interrupteurs	6
I.7.Modulation de largeur d'impulsion (MLI)	6
I.8.Principe de la commande en MLI des onduleurs triphasés	7
I.9.Principe de la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI Sinus-triangle)	7
I.10.Caractéristiques de la MLI	8

I.11. Intérêt de la commande MLI	9
I.12. Modélisation de l'onduleur et de sa commande	9
I.13. Simulation de la technique MLI sinusoïdale-triangulaire	10
I.13.1. Le schéma fonctionnel de la commande triangulons-sinusoïdale ...	12
I.13.2. Interprétation des résultats de la simulation	12
I.14. Conclusion	18
 CHAPITRE 2 : La machine synchrone à aimants permanents.	
II.1. Introduction	19
II.2. Généralités sur les machines synchrone	19
II.2.1. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents	
II.2.2. Principe de fonctionnement de la machine synchrone	
II.2.3. Classement des machines synchrone	20
II.3. Constitution de la machine synchrone	20
II.3.1. Le stator	20
II.3.2. Le rotor	21
II.4. Machine synchrone à aimants permanents	22
II.5. Matériaux pour aimants	23
II.6. Différents types de machine synchrone à aimants permanents	24
II.6.1. Machines synchrones à flux radial	24
II.6.2. Machines synchrones à flux axial	24
II.6.3. Machines synchrones à flux transverse	25

II.7. Avantages et inconvénients de machine synchrone à aimants permanents	26
II.7.1. Avantages de la machine synchrone à aimants permanents	26
II.7.2. Inconvénients de la machine synchrone à aimants permanents	27
II.8. Les domaines d'application de la machine synchrone à aimants permanents	27
II.9. Modèle de la machine synchrone à aimants permanents	28
II.9.1. Equations électriques de la machine	28
II.9.2. Equations magnétiques de la machine	31
II.9.3. Equations du couple électromagnétique	32
II.9.4. Equations mécaniques de la machine	34
II.10. Mode de fonctionnement	34
II.10.1. Fonctionnement à vide de la génératrice synchrone à aimants permanents	34
II.10.2. Fonctionnement en charge de la génératrice synchrone à aimants permanents...	36
II.10.2.1. Equations d'état.....	37
II.11. Résultats de simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents en charge.....	39
II.12. Conclusion	41

CHAPITRE 3 : Généralités sur l'énergie éolienne.

III.1. Introduction	43
III.2. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne	43
III.3. Définition de l'énergie éolienne	44
III.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	45

III.5. Principaux composants de l'éolienne.....	47
III.6. Différents types d'éolienne	49
III.7. Principe de fonctionnement d'une éolienne	53
III.8. Générateur synchrone à aimants permanents	54
III.9. Conclusion.....	57

CHAPITRE 4 : Simulation d'une ferme éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents

IV.1. Introduction.....	59
IV.2. Modélisation de la chaine de production d'énergie éolienne.....	60
IV.2.1. Modélisation du vent.....	60
IV.2.2. Modélisation de la turbine éolienne.....	61
IV.2.3. Modélisation mécanique du couple turbine-génératrice.....	63
IV.3. Simulation	65.
IV.3. 1. L'outil Matlab/Simulink.....	65
IV.3.2. Schéma bloc de la chaine de conversion.....	68
IV.3.3 La machine synchrone à aimant permanent.....	69
IV.3.4 Résultats de simulation.....	70
IV.4. Conclusion.....	75
Conclusion générale.....	76

Liste des figures

CHAPITRE I : Etude et simulation d'un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion

Figure 1.1 Schéma de principe de l'onduleur.....	2
Figure 1.2 Schéma de principe de l'onduleur monophasé.....	4
Figure 1.3 Schéma d'onduleur de tension triphasé	4
Figure 1.4 Principe de la commande MLI.....	8
Figure 1.5 Schéma équivalent de l'onduleur à MLI.....	9
Figure 1.6 Schéma fonctionnel de la commande.....	12.
Figure 1.7 Les formes d'ondes de la technique MLI sinusoïdale-triangulaire pour $m=15$ et $r=0.8$	13
Figure 1.8 Les formes d'ondes de la technique MLI sinusoïdale-triangulaire pour $m=15$ et $r=0.8$	14
Figure 1.9 Les formes d'ondes de la technique MLI sinusoïdale-triangulaire pour $m=33$ et $r=0.8$	15
Figure 1.10 Les formes d'ondes de la technique MLI sinusoïdale-triangulaire pour $m=33$ et $r=0.8$	16
Figure 1.11 Spectre d'harmonique de la tension de phase V_a pour la modulation sinusoïdale triangulaire pour : a) $m=15, r=0.8$ b) $m=33, r=0.8$	17

CHAPITRE II : La machine synchrone à aimants permanents

Figure 2.1 Classement des machines synchrones	20
Figure 2.2 Rotor à pôles saillants.....	21
Figure 2.3 Rotor à pôles lisses.....	22
Figure 2.4 Caractéristique magnétiques de quelques matériaux.....	23

Figure 2.5 MSAP à flux radial	24
Figure 2.6 Machines à flux radial(a) et axial(b).....	24
Figure 2.7 Machines synchrone à flux axial	25
Figure2.8 Représentation de la MSAP dans le repéré (d, q) de Park.....	29
Figure 2.9 Passage du repéré naturel du stator du repéré (d, q) de Park.....	30
Figure 2.10 Circuit équivalent de MSAP (convention moteur)	32
Figure2.11 Modèle de PARK pour la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP).....	32
Figure 2.12 Simulation de la GSAP à vide.....	35
Figure2.13 Simulation de la GSAP avec une charge	40
 CHAPITRE III : Généralités sur l'énergie éolienne	
Figure3.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	45
Figure3.2 Schéma d'une éolienne.....	47
Figure3.3 Différents type de tour.....	48
Figure3.4 Deux type des éoliennes.....	49
Figure3.5 Eoliennes à axe horizontal	50
Figure3.6 Eoliennes à axe vertical de type Savonius.....	51
Figure 3.7 Eoliennes à axe vertical de type Darrieus	51
Figure 3.8 Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	53
Figure 3.9 Système éoliennes basés sur la machine synchrone à aimants permanents(a)GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur	55
Figure 3.10 Système éolien à coût minimum basé sur GSAP.....	56

CHAPITRE III : Simulation d'une ferme éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents

Figure 4.1 Exemple d'une chaine de conversion d'énergie éolienne.....	59
Figure 4.2 Structure de la chaine éolienne.....	60
Figure 4.3 Voilure à axe vertical de type Savonius.....	62
Figure 4.4 Courbe caractéristique retenue pour les essais.....	63
Figure 4.5 Modèle du couple éolien sous Simulink.....	64
Figure 4.6 La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.....	64
Figure 4.7 Modèle du couple de la turbine éolienne.....	66
Figure 4.8 Schéma bloc de la turbine éolienne.....	66
Figure 4.9 Bibliothèque Simulink.....	68
Figure 4.10 Simulation de la chaine de conversion d'énergie éolienne	68
Figure 4.11 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	69.
Figure 4.12 Schéma bloc de la machine.....	69
Figure 4.13 Vitesse mécanique de la turbine v_t [rad/s].....	70
Figure 4.14 Le coefficient de puissance.....	70
Figure 4.15 Le couple électromagnétique.....	71
Figure 4.16 puissance mécanique.....	71
Figure 4.17 Tensions direct V_d	71
Figure 4.18 Tension de quadrature V_q	71
Figure 4.19 Courants statoriques i_{abc}	71.
Figure 4.20 Tensions statoriques V_{abc}	72
Figure 4.21 Tensions redressée.....	72

Figure 4.22 La vitesse de turbine (a).....	73
Figure 4.23 Le couple électromagnétique (b).....	73
Figure 4.24 La puissance	73
Figure 4.25 Tensions redressé	73
Figure 4.26 Composante V_d (a).....	74
Figure 4.27 Composante V_q (b).....	74
Figure 4.28 Courants statoriques i_{abc} (e).....	74
Figure 4.29 Tensions statoriques V_{abc} (f).....	74

Liste des symboles

DC : Direct curent

AC: Alternative curent

MLI: Modulation par largeur d' impulsion

MLIST: Modulation par largeur d' impulsion sinus- triangulaire

PWM: Pulse Width Modulation

Si: Commande logique des interrupteurs

Ti : Interrupteurs de l'onduleur

Di : Diodes

Vdc : Tension redressé(V)

Idc: Courant redressé(A)

M: Indice de modulante

Fp: Fréquence de la porteuse (Hz)

Fr: Fréquence de la référence(Hz)

Fm: Fréquence de modulante (Hz)

Vp : Tension de la porteuse(V)

Vr : Tension de référence(V)

W : Vitesse électrique

R : Le taux de modulation

Ar : Amplitude de la référence

Ap : Amplitude de la porteuse

T : temps

MSAP : Machine synchrone à aimant permanent

MS : Machine synchrone

GSAP : Génératrice synchrone à aimant permanent

ξ : Rapport de saillance

f.e.m: Force électromotrice

P: Nombre de pair de pôles

Ω : Vitesse de rotation mécanique du rotor

Lq: Inductance statorique quadratique(H)

Ld: Inductance statorique directe(H)

Lm : Longueur de la machine

Rext: Rayon externe de la machine

Rint: Rayon interne du rotor (machine axiale)

(d, q): Indice du repère de Park lié au rotor

ϕ_f : Flux d'excitation des aimants permanents(Wb)

(ϕ_{sd} , ϕ_{sq}): Composantes du flux statorique dans le repère de Park

(I_{sd} , I_{sq}): Composantes du courant statorique

(v_{sd} , v_{sq}): Composantes de la tension au stator dans le repère de Park

Rs : Résistance statorique(Ω)

Cem : Couple électromagnétique

Cr : Couple résistant (N.m)

J : Moment d'inertie totale de la machine(Kg.m²)

F: Coefficient de frottement visqueux(Nm/rad/s)

ω : Pulsation électrique statorique

Ω_{mec} : Vitesse mécanique de la génératrice

Ω_f : couple de frottement

R_{ch} : Résistance de la charge (Ω)

L_{ch} : Inductance de la charge (H)

E : Énergie (J)

I : Courant électrique (A)

I_0 : Courant de saturation de la diode (A)

I_d : Courant de la diode (A)

THD : Taux de Distorsion Harmonique (%)

P_m : Puissance extraite par le rotor éolien

A : Surface balayée par la turbine(m^2)

V : Vitesse de vent (m/s)

C_p : Coefficient de puissance de l' éolienne

C_f : Le couple de frottement(N.m)

R : Rayon de voilure (m)

H : Hauteur (m)

P : Masse volumique($kg.m^{-3}$)

f_m : Le coefficient de frottement visqueux(N.m)

C_e : Couple éolien

λ, TSR : Vitesse spécifique ou rapport de vitesse, (Tip-Speed-Ratio)

$\Omega_{turbine}$: Vitesse angulaire de rotation des pales(rd/s)

Introduction générale

Depuis les anciennes civilisations, l'homme a découvert la notion de la force et il a compris qu'il peut puiser dans la nature pour s'en procurer afin de prospérer sur terre, et dompter les obstacles qu'il rencontre dans sa démarche quotidienne vers le progrès.

Une de ces forces de la nature est le vent qui est appelée actuellement l'énergie éolienne.

L'homme a très vite compris la manière de capter cette énergie et comment l'exploiter dans des systèmes simples pour moulinier les grains ou pomper l'eau.

On trouve d'ailleurs des ancêtres d'éoliennes jusque dans la Perse ancienne. Mais il ne l'a utilisée comme source d'énergie électrique que vers les années quarante du siècle passé.

Car jusqu'alors l'électricité était produite à partir des énergies fossiles, du géothermique et de l'hydraulique.

Arriva ensuite le nucléaire pour remplacer les ressources traditionnelles déjà en épuisement avec un rendement très important mais génère des déchets radioactifs très dangereux, et surtout des risques néfastes pour l'environnement et les personnes en cas d'accident ou de séisme ou même d'attaque sur les sites concernés.

Avec l'augmentation de la pollution à cause de l'industrialisation croissante de la majorité des pays, et la surpopulation sur l'ensemble du globe, la demande sur l'énergie électrique est de plus en plus croissante et les sources d'énergie traditionnelles de moins en moins abondantes.

L'homme s'est alors orienté vers des énergies renouvelables mais surtout propres et sans danger.

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

Dans ce contexte notre travail va s'intéresser à la filière éolienne et aux outils de son exploitation et son développement.

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

Les éoliennes à vitesse variable ont été alors introduites pour apporter des solutions à ces problèmes. Les fluctuations de puissance peuvent être atténuées avec un dispositif qui permet des vitesses de rotation variables et par conséquent d'emmagasiner l'énergie des rafales sous forme d'énergie cinétique dans les grandes masses tournantes.

Ainsi la production annuelle d'une éolienne à vitesse variable est accrue de 5% à 10% par rapport à une éolienne à vitesse fixe.

Parmi différents types de structures éoliennes, la génératrice synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, rend les systèmes à vitesse variables plus attractifs.

Ce type de machines permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien.

Contrairement à la machine asynchrone à double alimentation qui nécessite un multiplicateur mécanique.

La machine synchrone à aimants permanents est également caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible et de faibles inductances.

Toutes ces caractéristiques offrent à la machine synchrone à aimants permanents des performances intéressantes, un rendement meilleur et une meilleure contrôlabilité.

Pour aborder notre thème de recherche nous préconiserons la démarche suivante afin de nous permettre une meilleure approche de notre problématique. Nous repartirons ce travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre consiste l'étude et la simulation d'un onduleur piloté par la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI et sa modélisation.

Nous avons effectué la classification des onduleurs, les types d'un onduleur ensuite on a consacré l'étude de différentes techniques de commande des interrupteurs et le principe de chaque commande.

Les résultats de simulation seront donnés sous Matlab-Simulink.

Le deuxième chapitre abordera la modélisation et simulation d'une génératrice à aimant permanent, il fera l'objet d'une présentation de MSAP, de ses différentes structures, de ses avantages et inconvénients, des types de couple de cette machine et de sa modélisation dans

Le repère de Park et la simulation de la GSAP à vide et en charge pour observer le

Fonctionnement et la consistance de la machine.

Nous avons aussi procédé à une interprétation de résultats.

Le troisième chapitre sera une description de différentes énergies renouvelables et leurs spécificités.

Il privilégiera également une étude sur l'énergie éolienne à partir d'un bref historique, ses diverses définitions, ses différents types, sa constitution, ses avantages et inconvénients et d'une analyse basée sur quelques chiffres à portée mondiale.

Cette partie présentera également les différents systèmes utilisés pour l'exploitation

Le quatrième chapitre est penché sur la commande de la machine synchrone à aimant permanent avec système éolien.

D'abord nous avons effectué une analyse de la modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne à partir de la modélisation de vent, la modélisation de la turbine éolienne et la modélisation mécanique du couplage turbine-génératrice.

Puis nous avons offre à une présentation de la structure globale de la chaine de conversion éolienne à base de la GSAP avec une commande et modélisation détaillée des différents éléments d'un côté et de redresseur à commande MLI et ses diverses fonctions d'autre coté ; A cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne s'ajoute un dispositif électronique de puissance qui permettra de transmettre l'énergie électrique produite les directions du réseau ou de la charge à alimenter.

Chapitre 1 : Etude et Simulation d'un Onduleur de Tension à Modulation de Largeur d'Impulsion

I.1.Introduction:

Les onduleurs tiennent une place importante dans les entraînements de vitesse des moteurs électriques.

Ils sont utilisés pour générer des tensions alternatives de fréquence et amplitude variables

L'onduleur est un convertisseur statique qui permet d'alimenter les machines à courant

Néanmoins, plusieurs problèmes se posent, particulièrement celui de l'apparition des harmoniques d'ordre supérieur.

Ces harmoniques ont un effet indésirable sur le comportement dynamique de la machine ; elles nuisent au fonctionnement normal de la machine.

En effet, la présence de ces harmoniques entraîne des couples pulsatives indésirables, ainsi que des pertes supplémentaires [1].

Pour réduire l'effet de ces harmoniques, on utilise le procédé de la modulation de largeur d'impulsion [2].

Il existe plusieurs techniques de commande en MLI [2].

Dans notre travail, nous nous intéressons à la technique triangulo-sinusoïdale.

I.2.Définition de l'onduleur :

L'onduleur de tension assure la conversion de l'énergie continue vers l'alternatif (DC/AC).

Cette application est très répandue dans le monde de la conversion d'énergie électrique d'aujourd'hui.

L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple pour alimenter un système alternatif à partir d'une batterie, ou à fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse des machines électriques.

L'onduleur de tension à MLI permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir du réseau.

L'onduleur qui est connecté à la machine, est constitué de trois bras formé d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement selon la puissance et la fréquence de travail, chaque bras compte deux composants de puissance complémentaires munis de diode montée en anti-parallèle.

Les diodes de roue libres assurent la continuité du courant dans la machine une fois les interrupteurs sont ouverts[3].

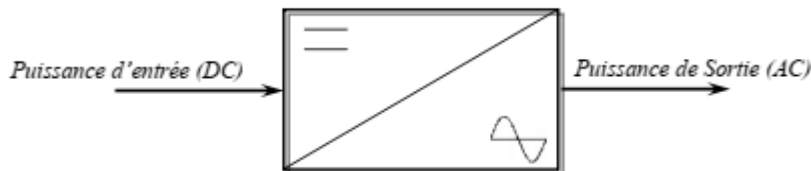


Figure1.1 Schéma de principe de l'onduleur

I.3. Classification des onduleurs :

Une première classification peut être faite en distinguant : onduleurs non autonomes et onduleur autonome.

Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance »

I.3.1. Onduleurs non autonomes :

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs.

La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif

I.3.2. Onduleurs autonomes :

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu- alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :

-Les onduleurs de tensions.

-Les onduleurs de courant

I.3.2.1. Onduleurs (autonomes) de tension :

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension « u » n'est pas affecté par les variations du courant « i » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

Le courant à la sortie « i' » et donc le courant à l'entrée « i » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f.é.m. alternative) directement branchée entre les bornes de sortie.

I.4.Types d'onduleurs autonomes de tension :

I.4.1. Les onduleurs monophasés :

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

-L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push- pull.

-L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi pont.

Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont figure (I.2).

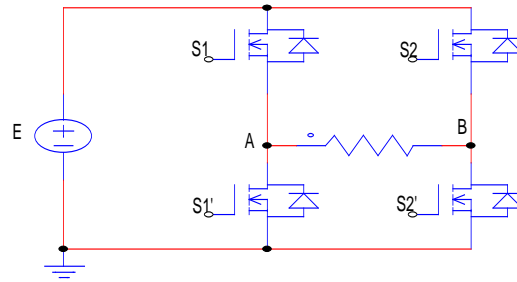


Figure 1.2 Schéma de principe de l'onduleur monophasé

I.4.2. Les onduleurs triphasés :

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs.

Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode.

La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur.

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b , I_c , les interrupteurs S_1 , S_1' et S_2 , S_2' , S_3 et S_3' doivent être complémentaires deux à deux.

On définit $S_i = (T_i, D_i)$ [4].

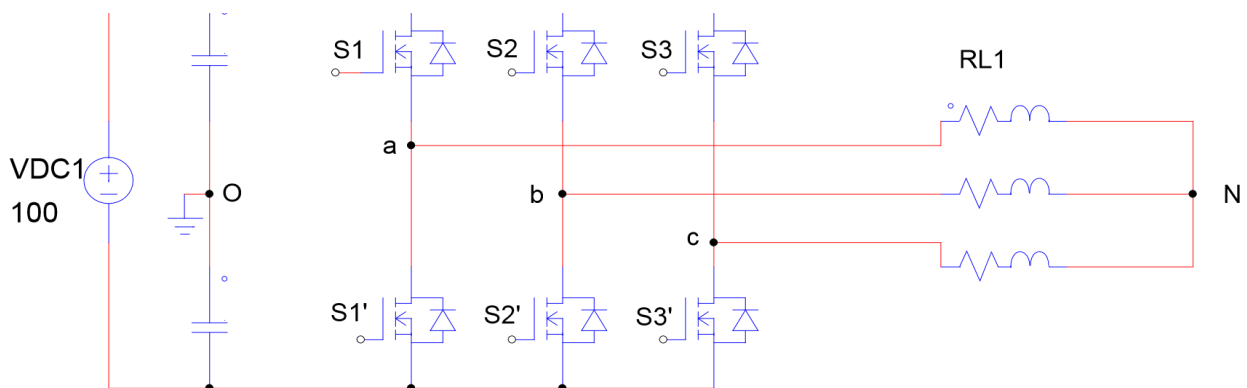


Figure1.3 Schéma d'onduleur de tension triphasé

I.4.3. Les onduleurs multi niveaux :

Les onduleurs multi niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites des semi-conducteurs.

Pour les réaliser on doit disposer de plusieurs sources de tension continue (obtenue par exemple à partir d'un diviseur capacitif), on peut faire apparaître autant de cellules de commutation élémentaires et les associer en les superposant ou en les mettant en cascade.

Cela permet de multiplier le nombre de niveau que l'on peut donner à la tension de sortie.

Cette dernière est souvent obtenue par une modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Ces onduleurs sont utilisés pour l'entraînement des moteurs asynchrones de grande puissance, d'autres applications sont possibles pour des moteurs qui tournent à vitesse élevée (> 5000 tr/mn).

I.5.Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé :

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la (figure I.3) Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b et I_c , les interrupteur S_1 et $S_{1'}$, S_2 et $S_{2'}$, S_3 et $S_{3'}$ doivent être complémentaire deux à deux, et pour que les tensions de sortie V_a , V_b et V_c soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental près, il faut commander chaque demi pont avec un retard de $T/3$ sur le précédent. En commande pleine onde on ferme donc :

- S_1 pour $wt = 0$ et $S_{1'}$ pour $wt = \pi$.
- S_2 pour $wt = 2\pi/3$ et $S_{2'}$ pour $wt = \pi + 2\pi/3$
- S_3 pour $wt = 4\pi/3$ et $S_{3'}$ pour $wt = \pi + 4\pi/3$

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre. Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple) on peut supprimer la liaison entre le point neutre «N » et le point milieu « 0 » de la source, Donc supprimer celui-ci, on obtient alors l'onduleur triphasé proprement dit [5].

I.6. Différents types de commande des interrupteurs :

Afin de découper la tension appliquée à l'entrée de l'onduleur, il faut intervenir à la commande des interrupteurs qui constituent l'onduleur.

Cette dernière a une très grande importance, car c'est elle qui détermine le type de la tension de sortie.

Parmi les différents types de commande, on trouve :

- La commande à onde rectangulaire.
- La commande à créneaux de largeur variable.
- La commande à paliers (en marche d'escalier).
- La commande à modulation de largeur d'impulsions (MLI).

On s'intéressera dans notre travail à la commande MLI

I.7. Modulation de largeur d'impulsions (MLI) :

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles.

Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques de l'onduleur servent à obtenir les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine.

La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI en français et PWM pour Pulse Width Modulation en anglais) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et tension fixe (en général une tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.

Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge.

Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les rapports cycliques.

Les techniques de modulation de largeur d'impulsions sont multiples ; cependant, quatre catégories de MLI ont été développées [6] :

- Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence

À une porteuse, en général, triangulaire.

- Les modulations pré calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre.
- les modulations post calculées encore appelées MLI régulières symétriques ou MLI Vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.
- Les modulations stochastiques pour lesquelles l'objectif fixé est le blanchiment du Spectre (bruit constant et minimal sur l'ensemble du spectre).

Les largeurs des impulsions sont réparties suivant une densité de probabilité représentant la loi de commande.

I.8.Principe de la commande en MLI des onduleurs triphasés :

Dans un onduleur à modulation de largeur d'impulsion, au lieu de former chaque alternance d'une tension de sortie avec un seul créneau rectangulaire, on la forme de plusieurs créneaux de largeur convenable, c'est la Commande des interrupteurs qui est modifiée.

Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont donnés par les intersections de signal de référence avec la porteuse.

I.9. Principe de la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI sinus-triangle) :

Le principe général consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance).

Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, 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, 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.

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs [7][8].

I.10.Caractéristique de la MLI :

$$r = f_p / f_r$$

$$r = V_r / V_p$$

Avec :

m : L'indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence

r : Le taux de modulation (ou coefficient de réglage) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête de la porteuse V_p

F_p : la fréquence de la modulation

A_r : Amplitude de la référence.

A_p : Amplitude de la porteuse.

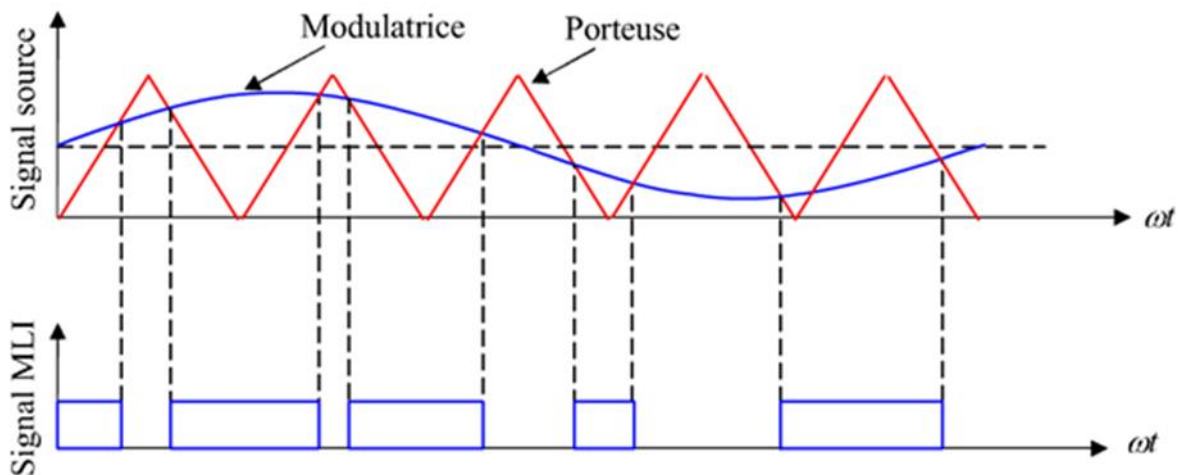


Figure1.4 Principe de la commande MLI

On considère l'alimentation de l'onduleur comme une source parfaite, supposée être constituée par deux générateurs de f.é.m. égale à $E/2$ connectés entre eux par un point commun (0)

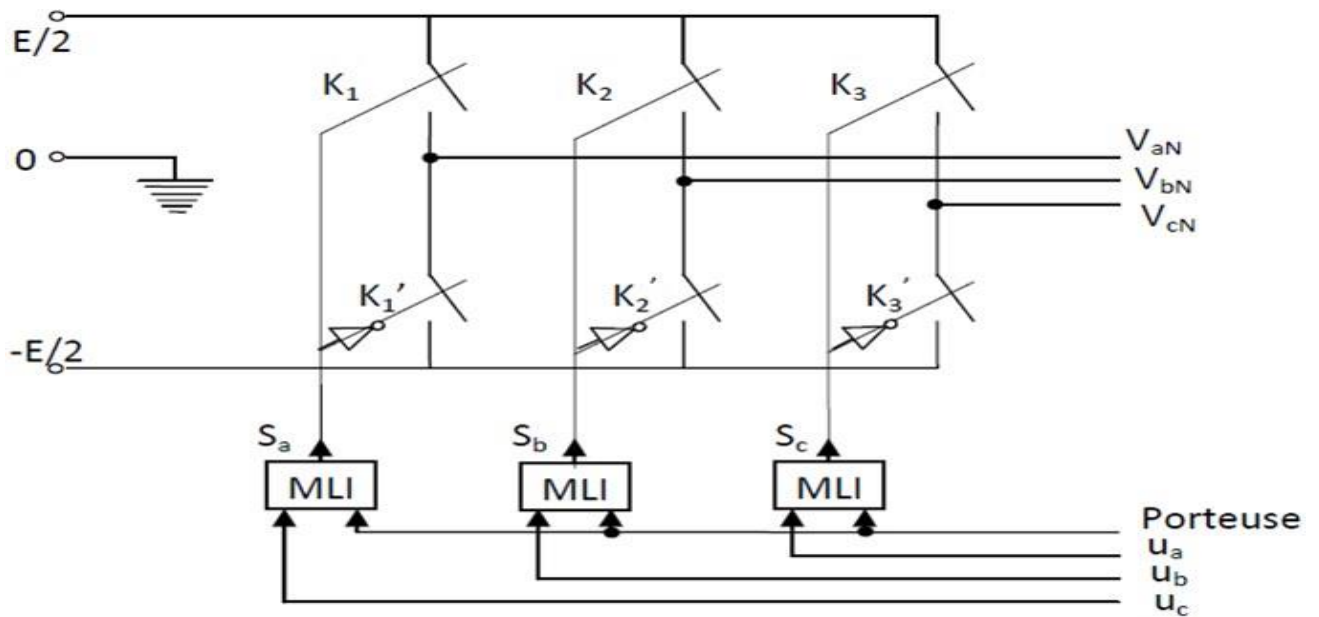


Figure1.5 Schéma équivalent de l'onduleur à MLI

I.11.Intérêt de la commande MLI:

La modulation de largeur d'impulsions vectorielle n'offre pas d'avantages sensibles par rapport à la modulation sinus-triangle sub optimale en ce qui concerne le déchet de tension ou le résidu harmonique.

On donne, de plus en plus fréquemment, la préférence à la modulation vectorielle dans le domaine des entraînements à vitesse variable avec moteurs synchrones ou asynchrones alimentés par des onduleurs de tension.

C'est parce que ce type de module Principe de base action s'intègre de façon naturelle dans les systèmes de régulation de ces entraînements.

I.12. Modélisation de l'onduleur et de sa commande :

Les tensions aux bornes de l'onduleur :

$$V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \quad (1.1)$$

$$V_{bc} = V_{bo} - V_{co}$$

$$V_{ca} = V_{co} - V_{ao}$$

Les tensions V_{an} , V_{bn} et V_{cn} forment un système de tensions triphasées équilibrées

Donc :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (1.2)$$

$$V_{an} = V_{ao} + V_{on}$$

$$V_{bn} = V_{bo} + V_{on}$$

$$V_{cn} = V_{co} + V_{on}$$

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 3V_{on} + V_{ao} + V_{bo} + V_{co} = 0$$

De (1.1) (1.2) on déduit:

$$V_{an} = 1/3 (V_{ao} + V_{bo} + V_{co})$$

A partir de l'équation :

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix}$$

Dans une branche d'onduleur, un interrupteur statique (k) peut prendre la valeur +1 ou -1 selon les conditions suivantes :

$$V_{aref} \geq V_p \Rightarrow S_a = 1 \text{ sinon } S_a = -1$$

$$V_{bref} \geq V_p \Rightarrow S_b = 1 \text{ sinon } S_b = -1$$

$$V_{cref} \geq V_p \Rightarrow S_c = 1 \text{ sinon } S_c = -1$$

Avec :

V_{ref} : amplitude de référence.

V_p : amplitude de porteuse.

Les branches V_{ko} peuvent être exprimées en fonction des switches « S_k » par :

$$V_{ko} = S_k \cdot (E/2)$$

Avec :

$$K = (a, b, c)$$

D'où la matrice de connexion :

$$\begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

I.13.Simulation de la technique MLI sinusoidale- triangulaire

I.13.1. Le schéma de bloc :

Le schéma fonctionnel de la figure (1.6) montre le principe de la commande triangulons-sinusoidale MLI :

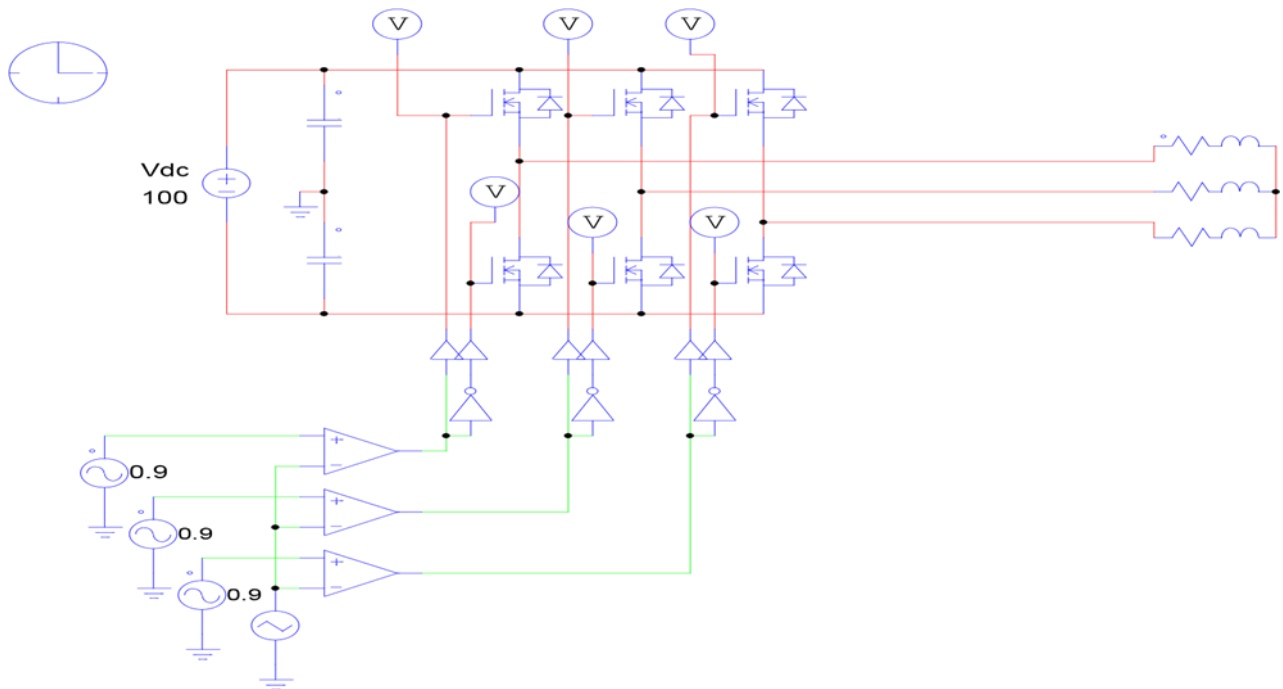


Figure I.6 Schéma fonctionnel de la commande

La simulation de la technique MLI sinusoidale- triangulaire est faite pour deux cas :

1) $m=15$, $r=0.8$,2) $m=33$, $r=0.8$

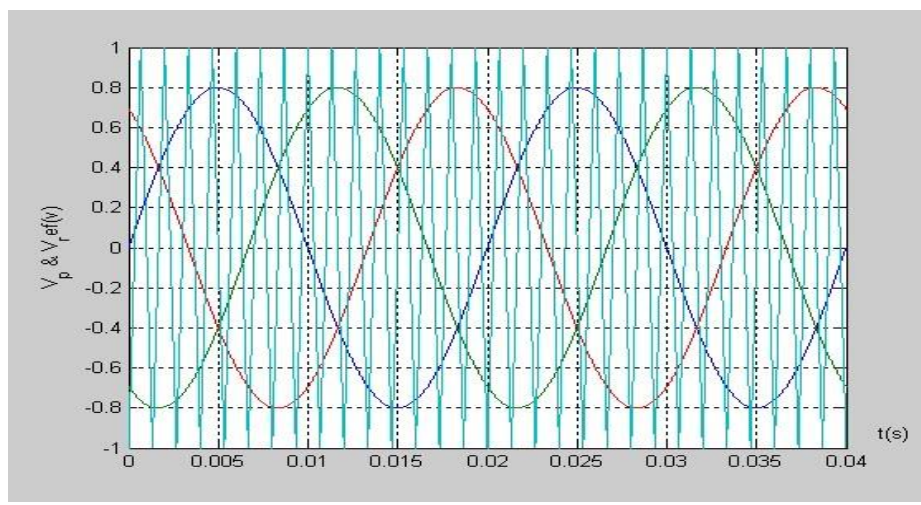
Les résultats de simulation sont représentés par les figures (1.7), (1.8), (1.9), (1.10), (1.11) et qui expriment les tensions de références et la porteuse, les tensions des nœuds, les tensions des phases (simples), les tensions composées ainsi que le spectre d'harmonique de la tension simple V_a .

I.13.2. Interprétation des résultats :

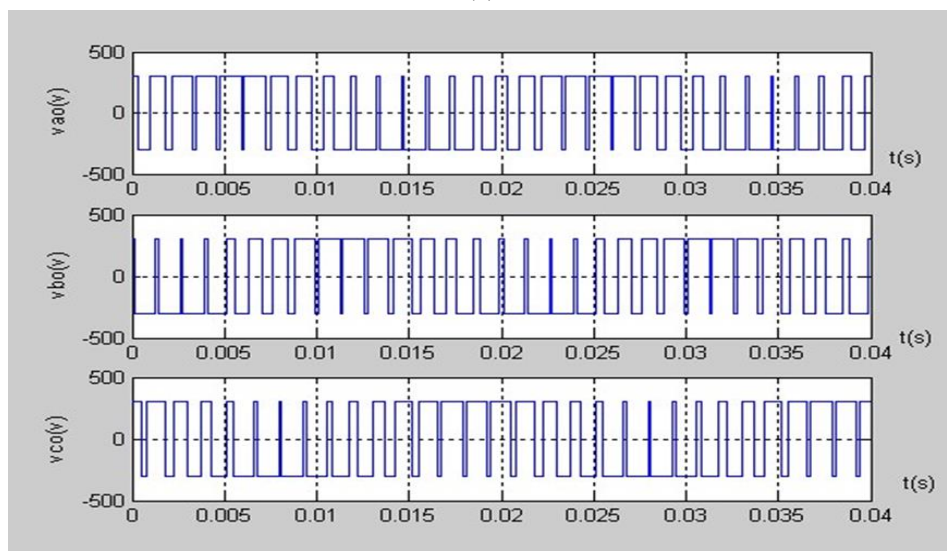
D'après les résultats de Simulation on remarque :

1) L'augmentation de l'indice de modulation « m » permet de repousser les harmoniques de la tension de phase vers les fréquences très élevées.

- 2) Pour un indice de modulation « m » impair, on trouve seulement les harmoniques impairs et qui se regroupent autour des familles mf , $2mf$, $3mf$ etc
- 3) Pour un indice « m » multiple de trois, on remarque qu'on aura seulement les harmoniques impairs et qui ne sont pas multiple de 3.
- 4) L'augmentation du coefficient de réglage en tension jusqu'à ($r=1$) permet de diminuer l'amplitude des harmoniques de la 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} famille, en revanche celle de la 1^{ère} famille augmente.
- 5) L'augmentation du coefficient de réglage r jusqu'à « 1 » permet de réduire le déchet de tension jusqu'à $d=21,46\%$, et assure un réglage linéaire de la tension de phase.
- 6) La variation de l'amplitude de l'harmonique fondamental ne dépend pas de la variation de l'indice de modulation « m ».



(a)

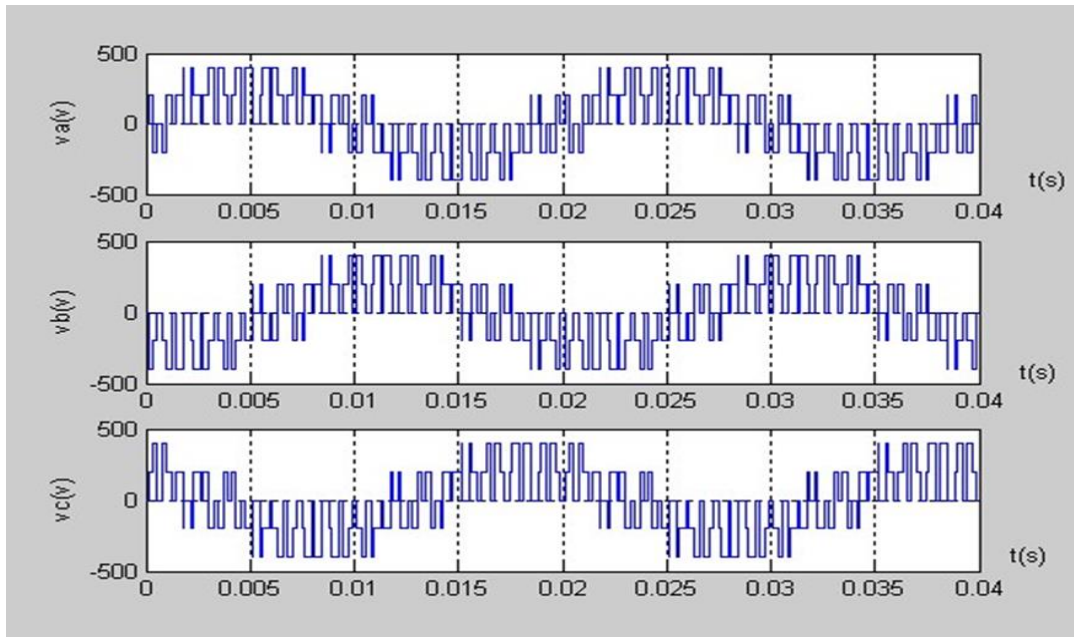


(b)

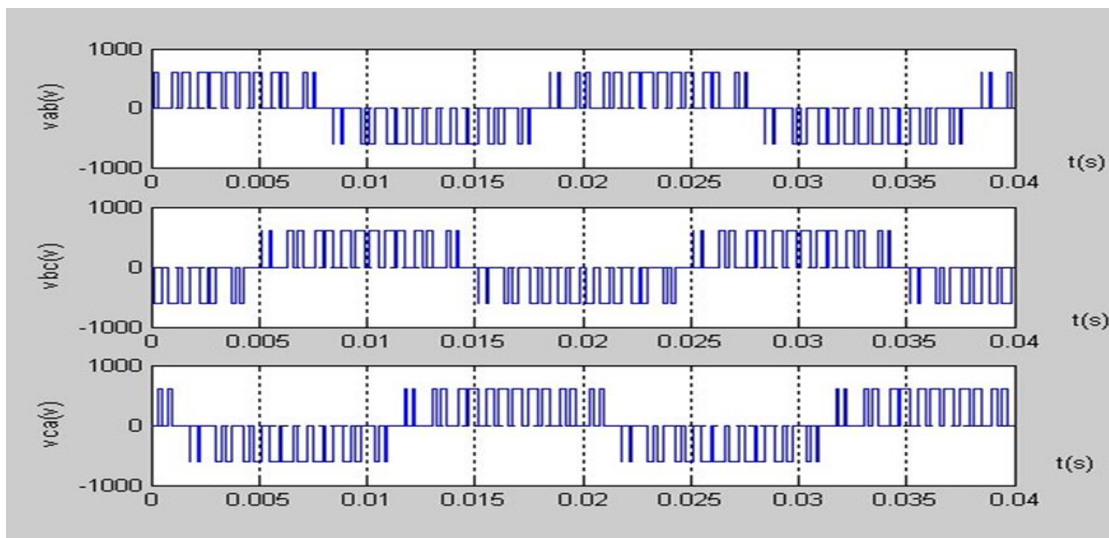
Figure 1.7 Les formes d'ondes de la technique MLI sinusoidale -triangulaire

Pour : $m=15$ et $r=0.8$

a) Les tensions de références et la porteuse triangulaire :



(a)



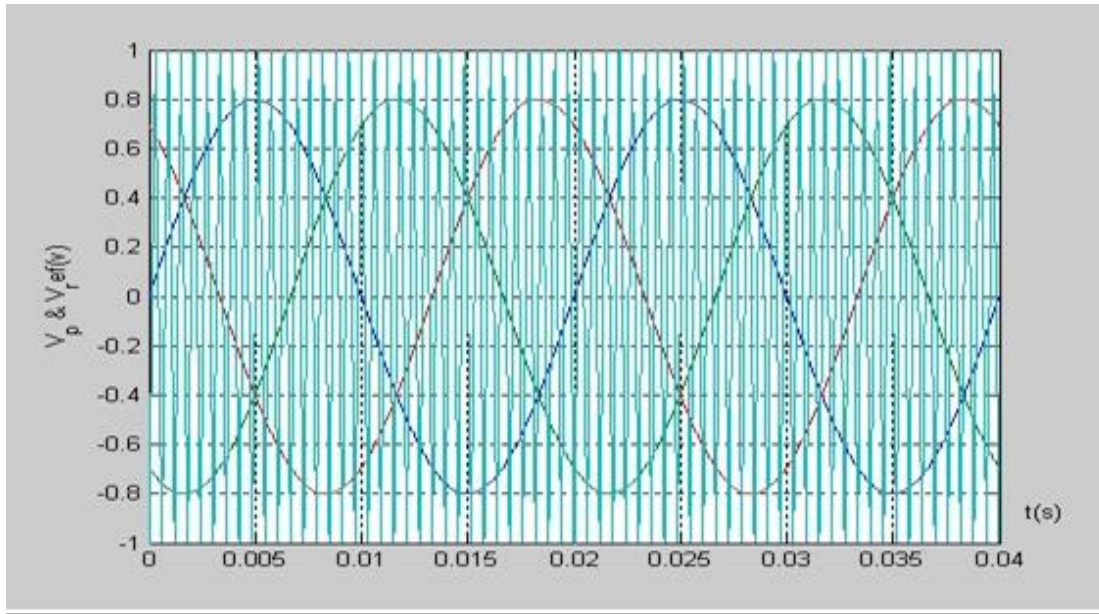
(b)

Figure 1.8 Les formes d'ondes de la technique MLI sinusoidale triangulaire

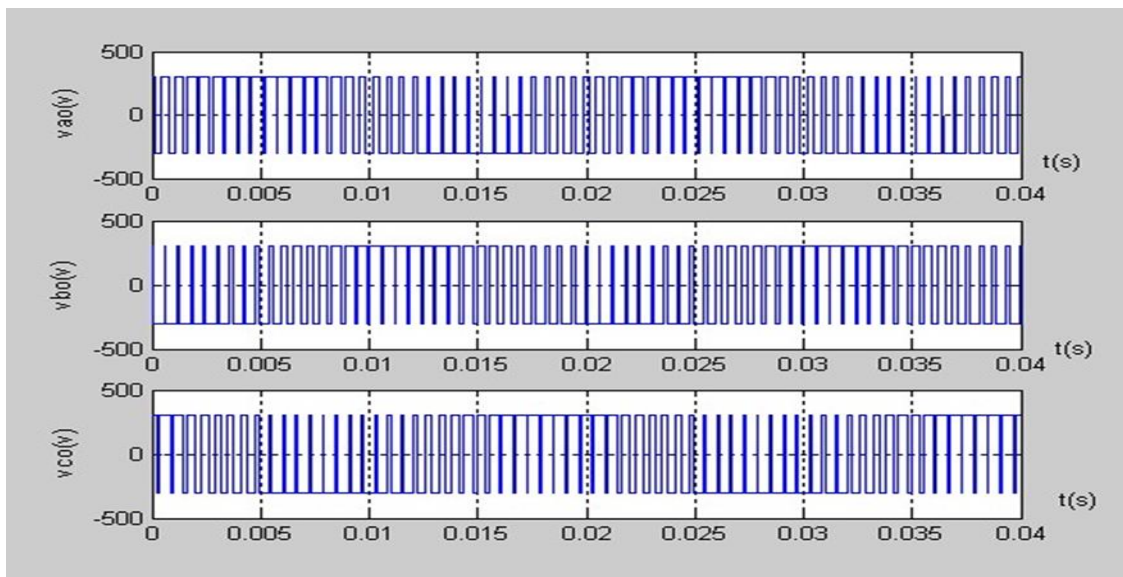
Pour : $m=15$ et $r=0.8$

a) -les tensions des phases.

b) -les tensions composées.



(a)



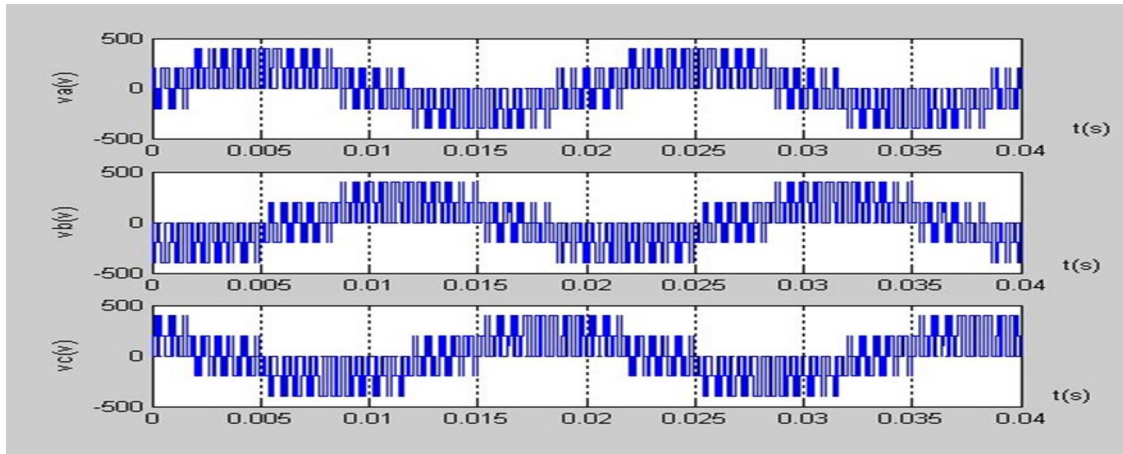
(b)

Figure1.9 Les formes d'ondes de la technique MLI sinusoidale triangulaire

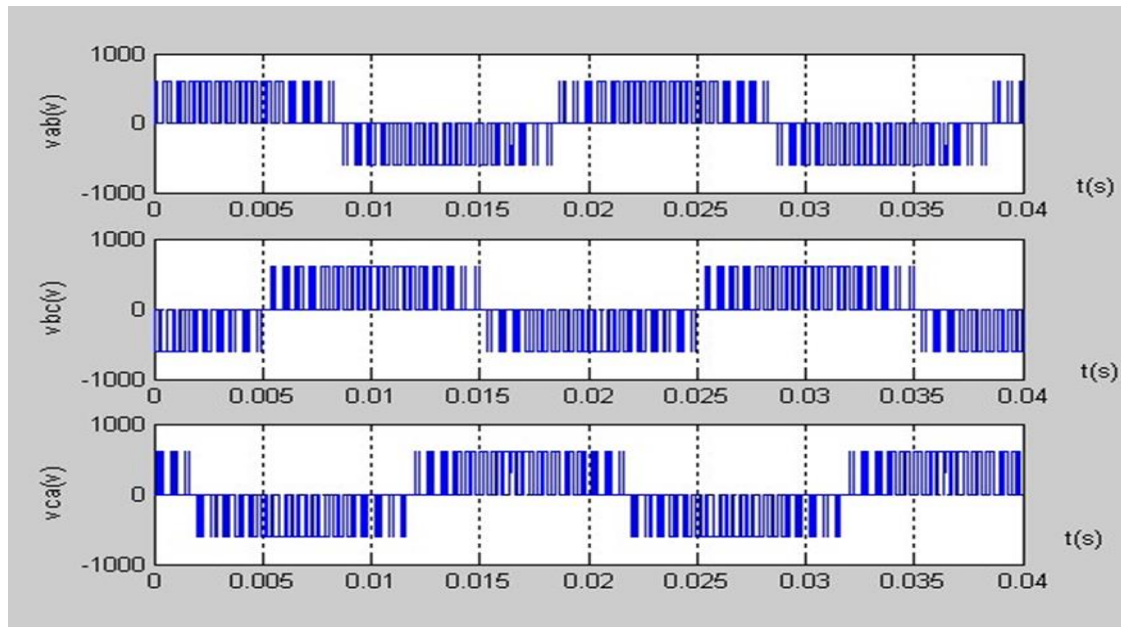
Pour : $m=33$ et $r= 0.8$

a) Les tensions de références et la porteuse triangulaire

b) Les tensions des noeuds



(a)



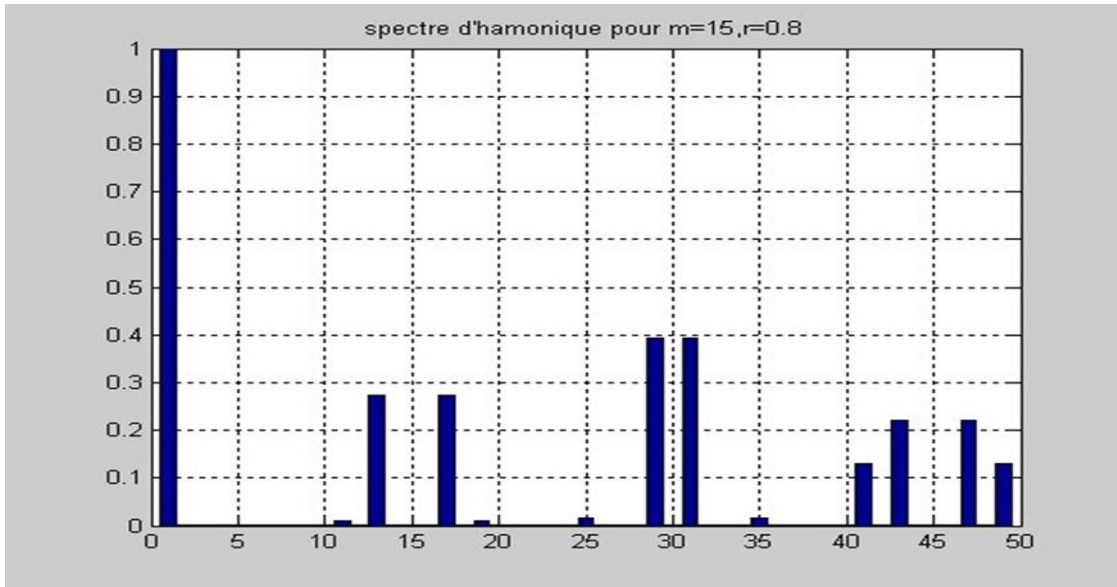
(b)

Figure1.10 Les formes d'ondes de la technique MLI sinusoidale triangulaire

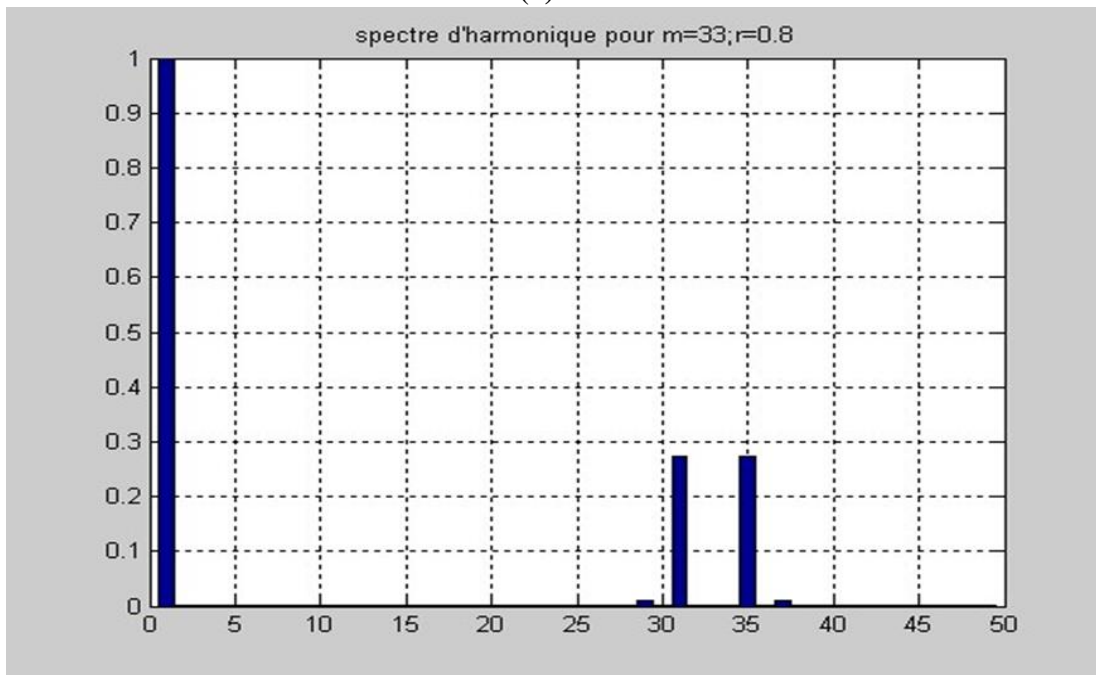
Pour : $m=33$ et $r= 0.8$

a) -les tensions des phases.

b) -les tensions composées.



(a)



(b)

Figure 1.11 Spectre d'harmonique de la tension de phase V_a pour la modulation

sinusoïdale- triangulaire

Pour : a) $m=15, r=0.8$

b) $m=33, r=0.8$

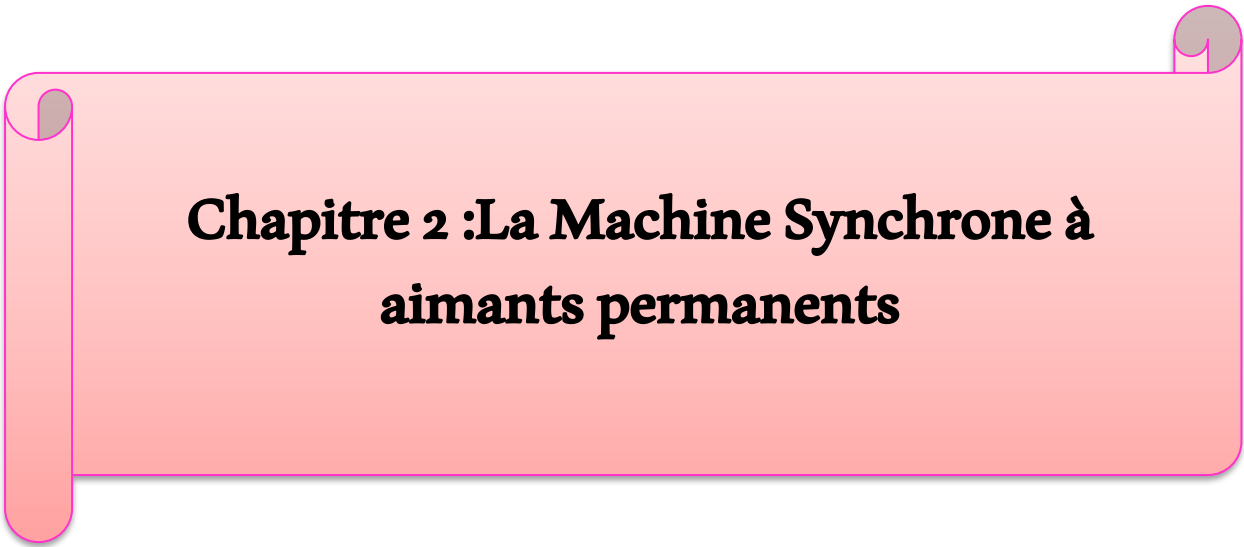
I.14. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter la généralité sur les onduleurs (définition, leurs classifications, et leurs type) puis nous avons donné le principe de fonctionnement l'onduleur de tension et leurs modélisations de MLI.

On présent aussi la simulation par la technique de commande de l'onduleur triphasé (modulation de largeur d'impulsion MLI) possède un meilleur résultat étudié car, elle repousse

Les harmoniques vers les fréquences les plus élevés ce qui :

- Facilite le filtrage
- Minimise la distorsion du courant.
- Faire réduire le coût du filtre de sortie, et elle donne des formes des tensions très proches à la forme sinusoïdale.



Chapitre 2 :La Machine Synchrone à aimants permanents

II.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 [24], [33], [34].

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.

II.2 Généralités sur les machines synchrones

II.2.1 Présentation de la MSAP

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator.

Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation.

La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose le synchronisme entre le champ tournant statorique et le rotor, d'où le nom de machine synchrone [9].

La machine synchrone, appelée ALTERNATEUR si elle fonctionne en génératrice, fournit un courant

En fonctionnement MOTEUR sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente l'induit. Au-delà de quelques kilowatts, les machines synchrones sont généralement des machines triphasées. Le rotor, souvent appelé « roue polaire », est alimenté par une source de courant continu ou équipé d'aimants permanents [20].

II.2.2 Principe de fonctionnement de la machine synchrone :

Une génératrice synchrone transforme de l'énergie mécanique (C, Ω) en énergie électrique (V, I de fréquence f). Un aimant tourne à la fréquence N , la spire est traversée par un flux variable $\lambda(t)$ d'où la création d'une f.e.m. induite $e(t) = -d\lambda/dt$.

La fréquence de cette f.e.m. est telle que : $f = p N$, soit $\Omega = p \omega$ avec Ω la vitesse de rotation du rotor (aimant), p le nombre de paires de pôles et (ω) la pulsation de la f.e.m. sinusoïdale induite, en rad/s.

II.2.3 Classement des machines synchrones :

En reprenant le principe de la classification de Chalumeurs et de ces collègues [21], on peut agencer l'ensemble des machines synchrones comme l'indiqué figure (2.1).

Les machines sont distinguées par la nature de leur excitation (bobinages, aimants permanents...) et par leur rapport de saillance : $\xi = \frac{L_q}{L_d}$

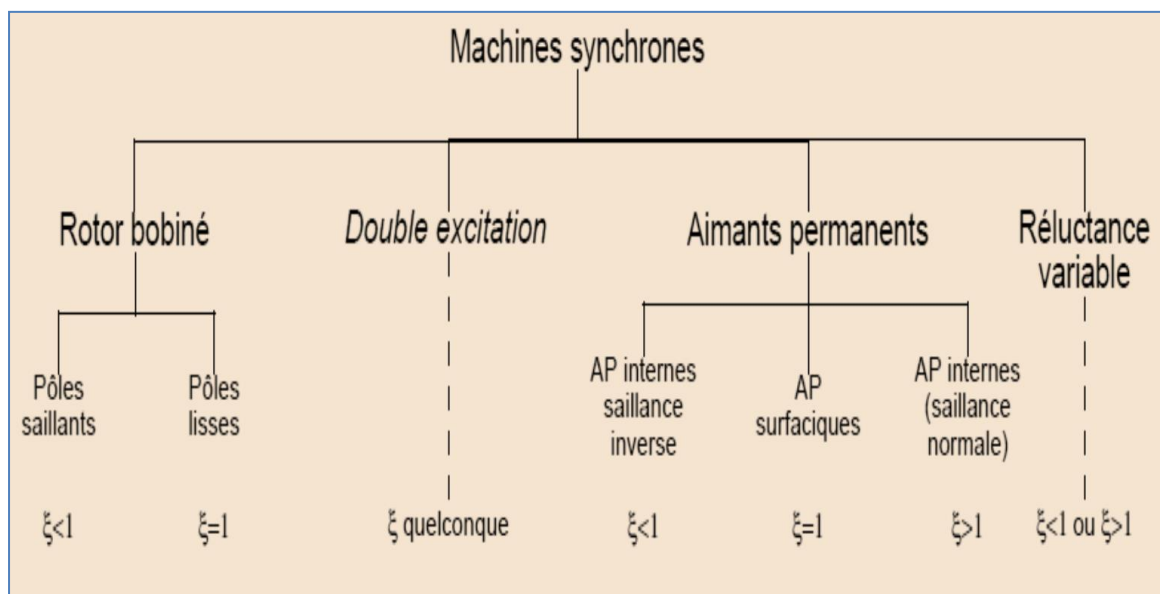


Figure 2.1 Classement des machines synchrones

II.3 Constitution de la machine synchrone :

La machine synchrone possède deux parties principales :

- L'inducteur porté le plus souvent par le rotor.
- L'induit porté par le stator parcouru par des courants alternatifs.

- Le stator

Il est similaire à celui de la machine asynchrone.

Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales.

Ce bobinage est représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électriques.

- Le rotor

Il se compose d'aimants permanents. Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique.

- Rotor à pôles saillants

C'est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires.

Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine [20,21].

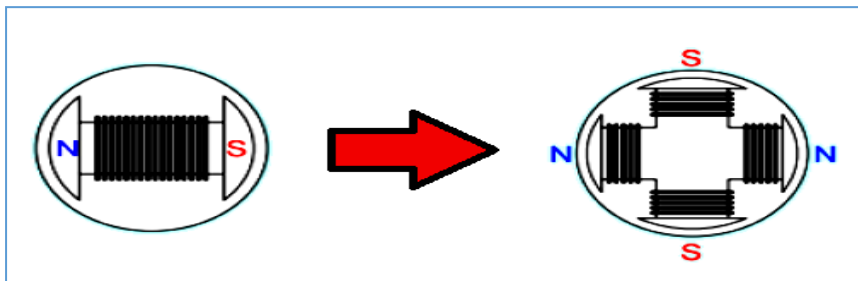


Figure 2.2 Rotor à pôles saillant

Rotor à pôles lisses :

Le rotor est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches.

Il possède les plus souvent deux pôles.

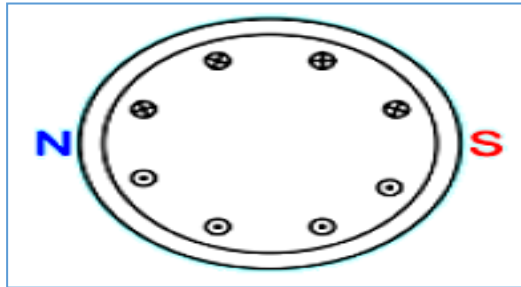


Figure 2.3 Rotor à pôles lisses

II.4 Machine synchrone à aimants permanents :

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou de terres rares (par exemple du type manico anilco, 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 [17].

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 restituer et 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 [20,22].

II 5 Matériaux pour aimants :

Selon les matériaux utilisés dans les aimants, on distingue deux types d'aimants permanents

[33], [34] :

Aimants « rigides » ou durs : bien adaptés aux aimants modernes à cause des caractéristiques linéaires.

Aimants « peut 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 2. 1) [33], [24] :

II.5.2 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 [33].

II.5.3 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 [33].

II.5.3 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 [33].

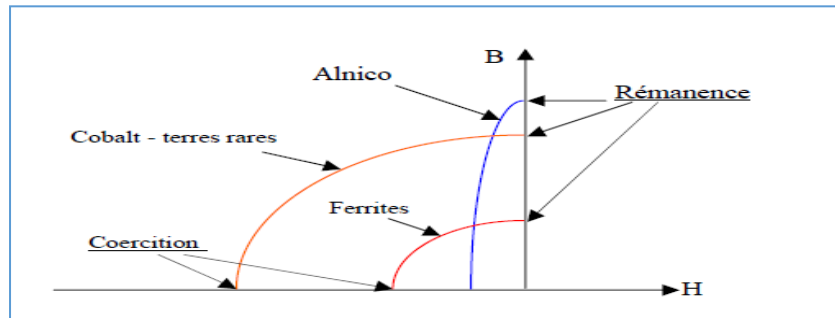


Figure 2.4 Caractéristiques magnétiques de quelques matériaux

II.6 Différentes types de MSAP :

II.6.1 Machines synchrones à flux radial :

Plusieurs MSAP à flux radial ont été proposées dans la littérature. La plupart sont à rotor intérieur mais certaines ont un rotor extérieur.

Ce type de machine permet d'avoir de bonnes performances sur une grande plage de variation de la vitesse de rotation [23].

La figure (2.5) montre une MSAP classique à flux radial et à rotor intérieur.

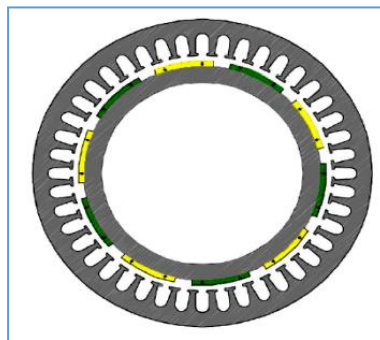


Figure 2.5 MSAP à flux radial

II.6.2 Machines synchrones à flux axial :

Ces machines (figures 2.6 et 2.7) ont fait l'objet de plusieurs études dans le cadre d'une application éolienne à attaque directe [23,27].

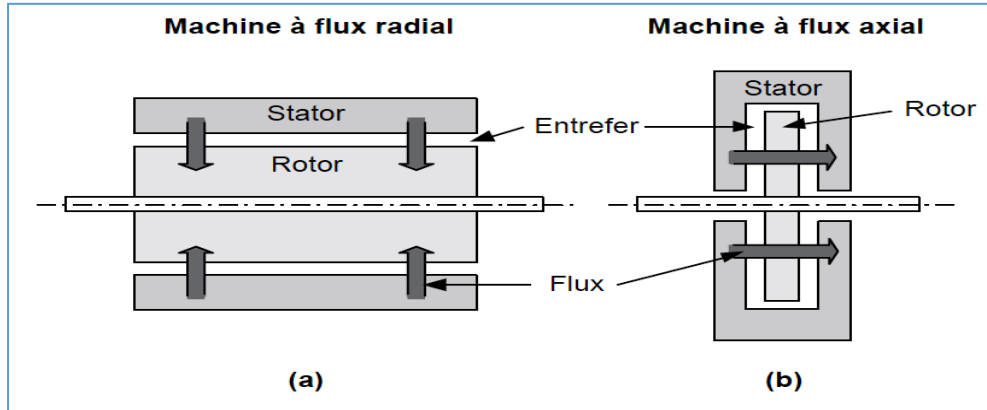


Figure 2.6 Machines à flux radial (a) et axial (b)

La figure 2.7 représente la machine synchrone à flux axial :

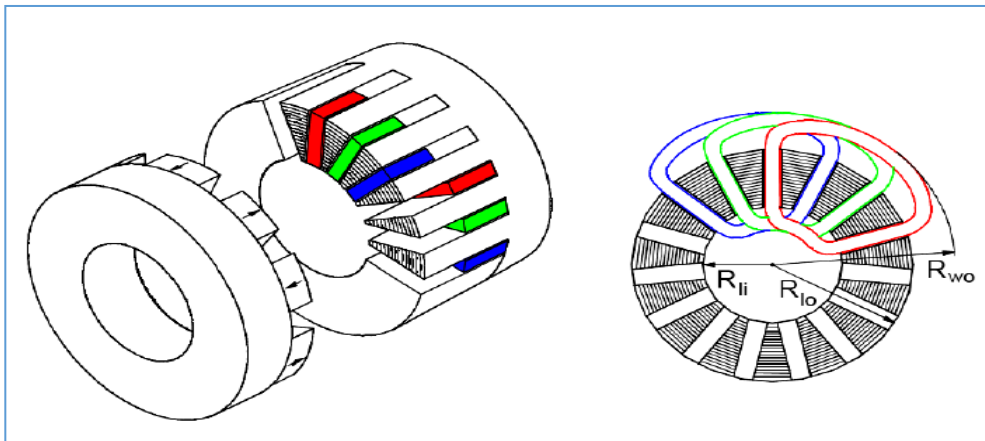


Figure 2.7 Machine synchrone à flux axial

Pour une machine axialement courte, le volume d'entrefer et donc le couple produit est plus important pour une machine à flux axial que pour une machine à flux radial.

$$\begin{cases} C_{radial} \propto R_{ext} L_m \\ C_{axial} \propto \frac{R_{ext}^2 - R_{int}^2}{2} \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec :

L_m : longueur de la machine

R_{ext} : rayon externe de la machine

R_{int} : rayon interne du rotor (machine axiale)

Pour les applications basses vitesses, la structure de la machine axiale reste compacte alors que la machine radiale tend vers une structure creuse.

Ceci conduit à un meilleur couple volumique pour la machine à flux axial.

II.6.3 Machine synchrone à flux transverse :

La machine à flux transverse est une technologie nouvelle et intéressante.

Il existe plusieurs topologies mais la plus pertinente utilise des aimants permanents avec concentration du flux.

Cette dernière semble bien adaptée à la vitesse variable de l'entraînement direct mais elle a été étudiée surtout en moteur [23].

II.7 Avantages et inconvénients de la MSAP :

II.7.1 Avantages de la MSAP :

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines [23,28] :

- puissances massiques importantes et élevées
- absence de contacts glissants
- pas des pertes résistives au rotor, ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression des équipements de refroidissement au rotor.

- suppression des bagues et des balais, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage
- grande fiabilité
- fonctionnement en survitesse.

II.7.2 Inconvénients de la MSAP :

Comme inconvénients de la MSAP, citons on cite :

- coût élevé des aimants.
- interaction magnétique due au changement de structure.
- influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- diminution de l'aimantation selon une loi logarithmique en fonction du temps.

II.8 Les domaines d'application de la MSAP :

Le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme :

- les équipements domestiques (machine à laver le linge),
- les automobiles,
- les équipements de technologie de l'information (DVD drivers),
- les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements,
- les équipements de soins médicaux et de santé (fraises dentaires de dentiste),
- les servomoteurs,
- les applications robotiques,

- la production d'électricité,
- la propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins,
- les machines-outils,
- les applications de l'énergie de l'éolienne.

II 9 Modèle de la MSAP :

Le modèle mathématique de la machine synchrone obéit à certaines hypothèses simplificatrices essentielles [29,30]:

- 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'encochage 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.

II.9.1 Equations électriques de la machine :

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

:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$[V_a \ V_b \ V_c]^t$: Vecteur tension de phases statoriques.

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

$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé.

La somme instantanée des courants statoriques est donc 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 [30].

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 2.8).

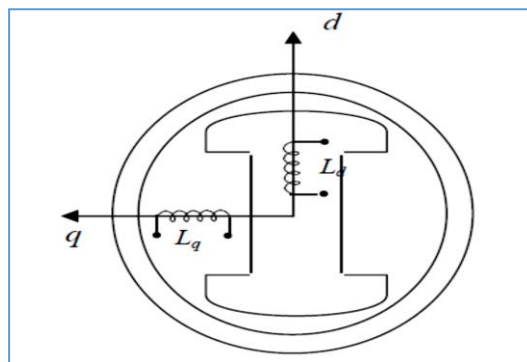


Figure 2.8 Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park [17]

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 du repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [29,30]

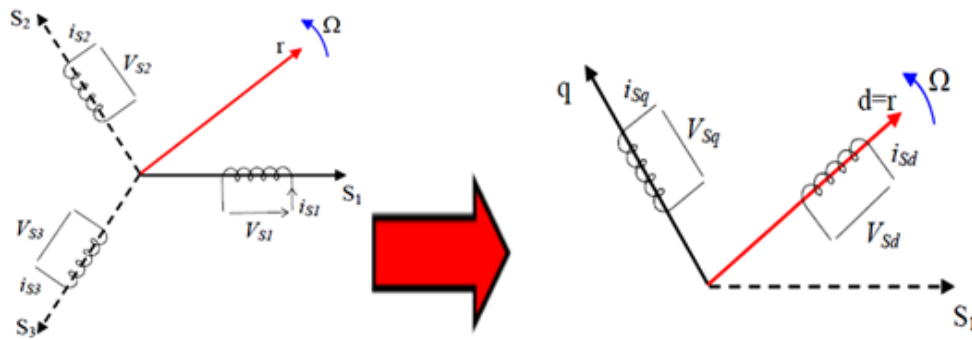


Figure 2.9 Passage du repère naturel du stator au repère (d,q) de Park

En appliquant la transformation de Concordia T32 définit par :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^t \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Avec :

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

La variable x peut être V , i ou φ .

On obtient :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_\alpha \\ \varphi_\beta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

En appliquant la transformation de Park au système d'équations (3.3), 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 :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} + \dot{\theta} P \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\text{Où } \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(-\theta) \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

V_d , V_q , i_d et i_q sont les composantes directe et en quadrature de tension et de courant.

Φ_d et φ_q sont les composantes directes et en quadrature du flux.

II.9.2 Equations magnétiques :

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, φ_d et φ_q sont fonctions linéaires des courants i_d et i_q [31] :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2.6)$$

L_d et L_q sont les inductances directes et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de θ . φ_f représente le flux des aimants.

En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (3.4), on aboutit à :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega P \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

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 la f.e.m. données par :

$$\begin{cases} e_d = 0 \\ e_q = p\varphi_f\Omega \end{cases} \quad (2.9)$$

Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit [32]:

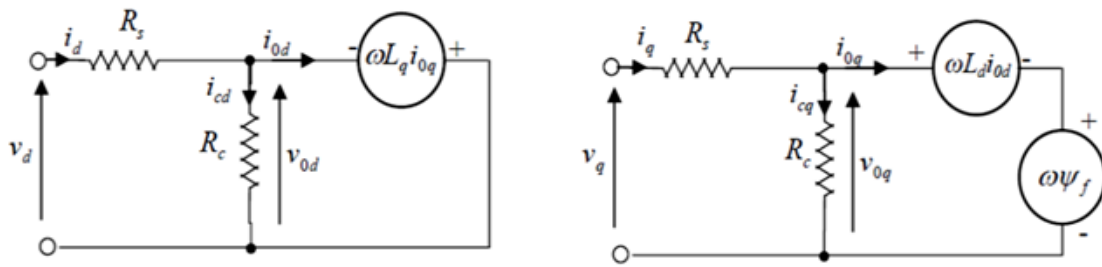


Figure 2.10 Circuit équivalent de MSAP (convention moteur)

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 [33,34]:

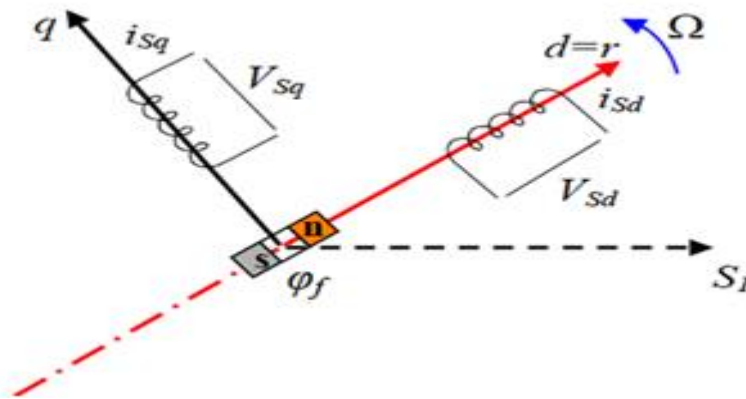


Figure 2.11: Modèle de PARK pour la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP)

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \phi_f \end{cases} \quad (2.10)$$

II.9.3 Equations du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée partielle du stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [29] :

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dW_e}{d\theta_e} \quad (2.11)$$

W_e : énergie emmagasinée dans le circuit magnétique.

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

P : nombre de paires de pôles.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par [32]:

$$P(t) = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad (2.12)$$

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

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s(i_d^2 - i_q^2) - \left(i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \right] \quad (2.13)$$

Les termes :

$\frac{3}{2} [-R_s(i_d^2 - i_q^2)]$ Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \left[i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt} \right]$ Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator [35,36].

$\frac{3}{2} \left[\frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \right]$ Représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$P\Omega = \omega \text{ et}$$

$$P_e = C_{em} \cdot \Omega \quad (2.14)$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (2.15)$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire [29]:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_d i_q + \varphi_f i_q] \quad (2.16)$$

II.9.4 Equations mécaniques :

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante [29,32]:

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.17)$$

Avec :

C_m : couple moteur appliqué sur la génératrice.

Ωf : couple de frottement.

J : moment d'inertie total de la machine.

f : coefficient de frottement visqueux.

II 10 Modes de fonctionnement :

II.10.1 Fonctionnement à vide du GSAP :

Le fonctionnement à vide est caractérisé par des courants nuls :

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

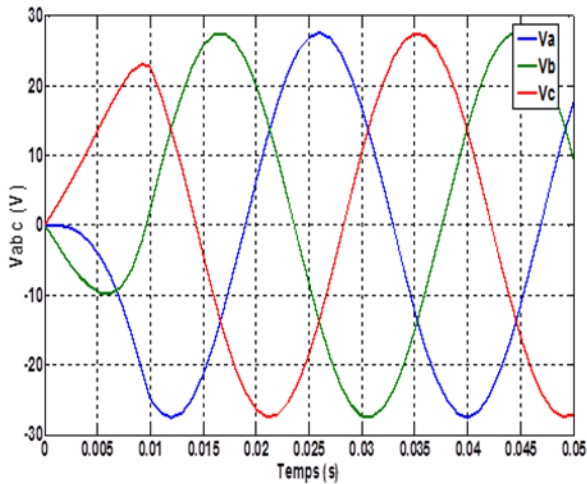
Les expressions des tensions et celle du couple deviennent :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \varphi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

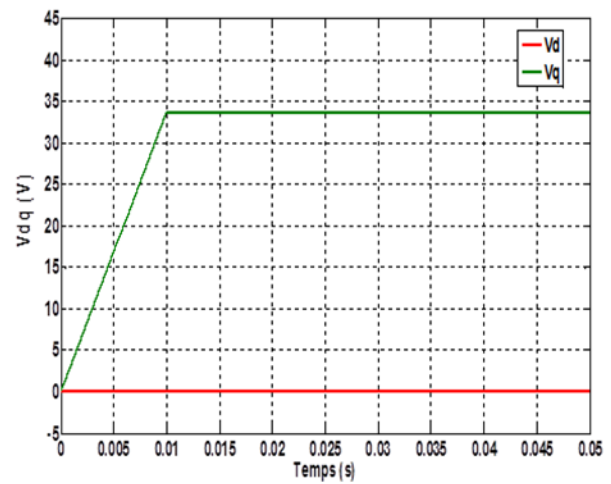
On lance la génératrice à l'aide d'un couple moteur égal à 2 N.m pour une durée de 10 ms puis, on la laisse tourner librement.

Etant donné que les frottements sont considérés nuls, on constate d'après la (figure 2.12) que la vitesse se stabilise à une valeur de 23,56 rad/s.

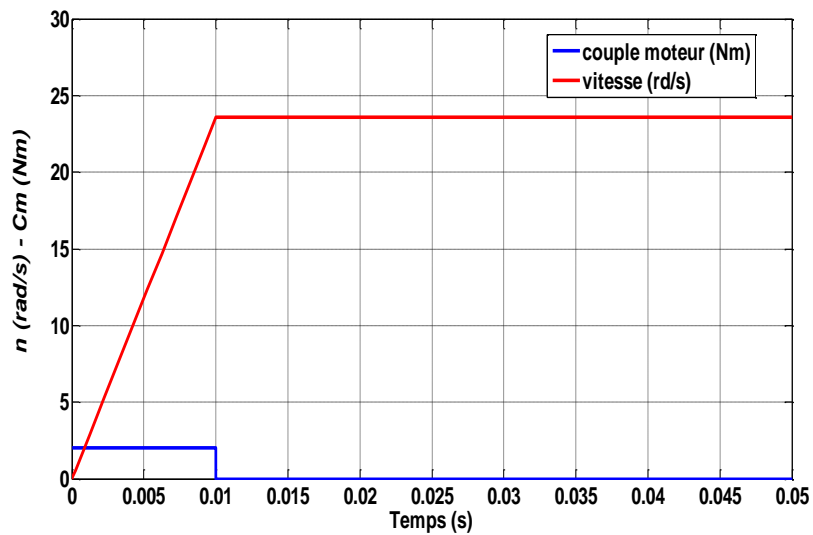
Les tensions de phase sont parfaitement sinusoïdales en régime stable avec une valeur crête de 27,5 V et une fréquence de 50 Hz.



A : Tension statorique



B: Composantes V_d et V_q



C : Vitesse de rotation et couple moteur

Figure 2.12 Simulation de la GSAP à vide

Tableau 2.1 Paramètre de la génératrice GSAP à vide

	Désignations	Valeur	Unité
R_s	Résistance statorique	1,137	Ω
L_d	Inductance statorique selon l'axe d	0,0027	H
L_q	Inductance statorique selon l'axe q	0,0027	H
Φ	Flux des aimants permanents	0,15	Wb
F	Coefficient de frottement	0	Nm/rd/s
J	Inertie de l'ensemble turbine et génératrice	0,0016	kg.m ²
P	Nombre de pôles	18	-

II.10.2 Fonctionnement en charge du GSAP :

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

Pour obtenir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique les expressions des tensions données par (2.9) [17] :

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

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

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} I_d + L_{ch} \frac{d}{dt} I_d - \omega L_{ch} I_q \\ V_q = R_{ch} I_q + L_{ch} \frac{d}{dt} I_q + \omega L_{ch} I_d \end{cases} \quad (2.20)$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (3.19), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch}) I_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_d + \omega (L_q + L_{ch}) I_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch}) I_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_q - \omega (L_d + L_{ch}) I_d + \omega \phi_f \end{cases} \quad (2.21)$$

En appliquant la transformée de Laplace aux équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} SI_d = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_d + \omega(L_q + L_{ch})I_q] \\ SI_q = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_q - \omega(L_d + L_{ch})I_d + \omega\varphi_f] \end{cases} \quad (2.22)$$

Le flux d'excitation φ_f est considéré comme grandeur de commande, et les courants I_d , I_q comme variables d'état [22,29].

II.10.2.1 Equations d'état :

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

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][V] \quad (2.23)$$

$$[X] = [i_d \quad i_q]^t, \quad [V] = [0 \quad \varphi_f] \quad (2.24)$$

Les équations (2.21) peuvent s'écrire sous la forme matricielle (2.24).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{sd} \\ \dot{I}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega\varphi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

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

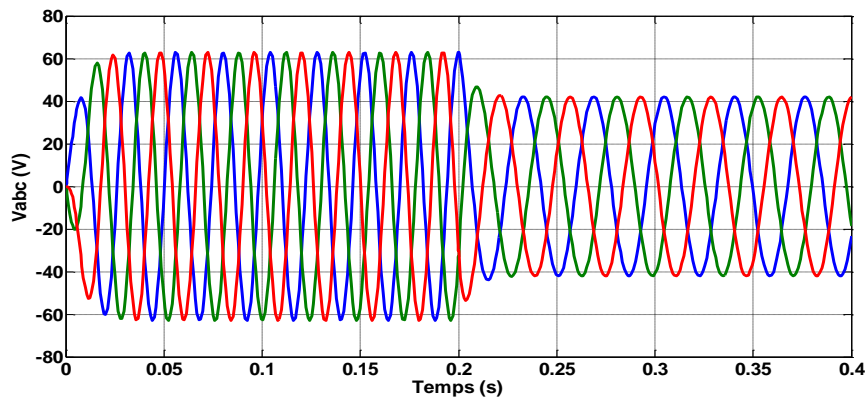
$$[A] = [A_1] + \omega[A_2];$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

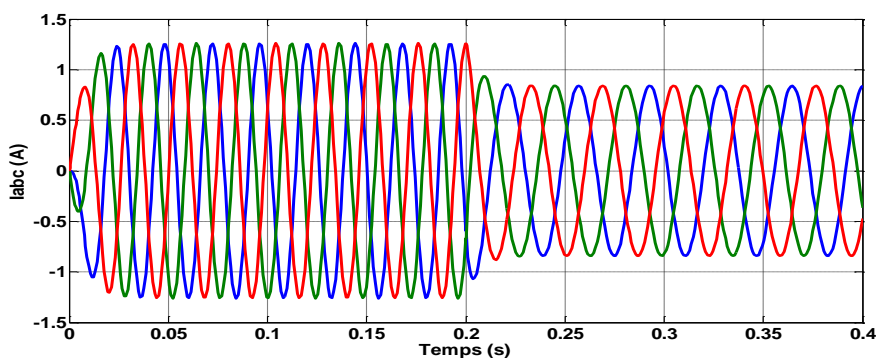
$$[B][V] = \omega \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

II.10.2.2 Résultats de simulation de la GSAP en charge :

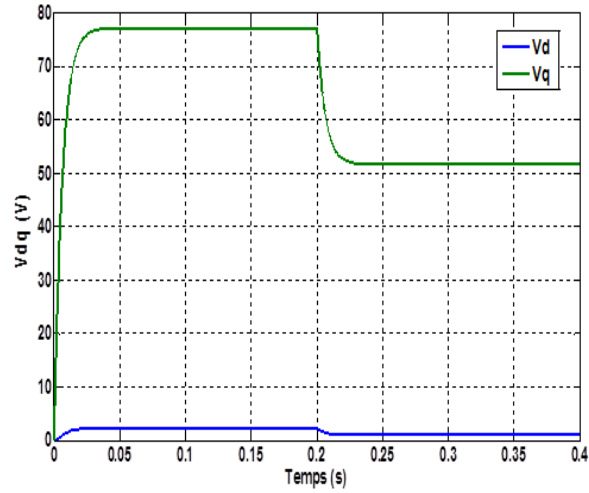
Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (figure 2.13e). On constate que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui se traduit par de faibles tensions V_{abc} et courants I_{abc} représentés sur les (figures 2.13a et 2.13b). Cela s'explique par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 6,28 N.m à 4,2 N.m, la vitesse mécanique varie de 261 tr/min jusqu'à 175 tr/min. La tension et le courant diminuent respectivement de 63 V à 42,1 V et de 1,26 A à 0,84 A. Il est donc clair que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.



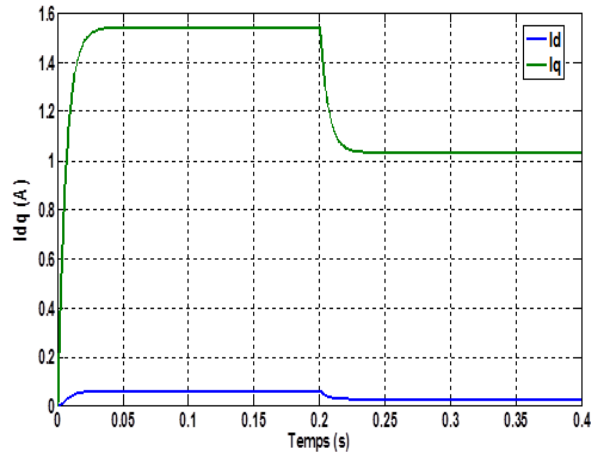
A : Tensions statoriques V_{abc}



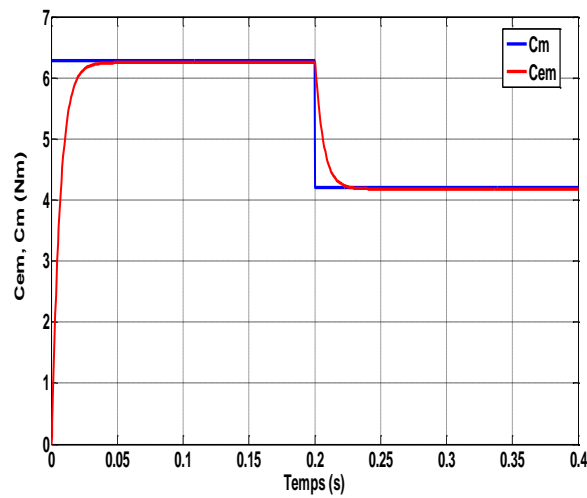
B : Courants statoriques I_{abc}



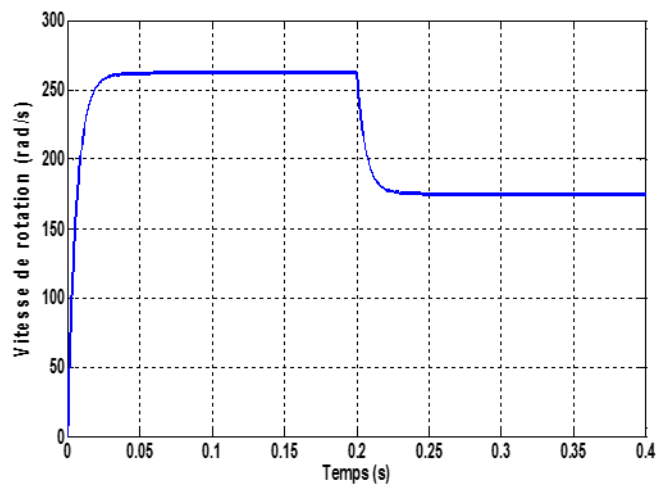
C : Composantes V_d ; V_q



D : Composantes I_d ; I_q



E : Couples électromagnétique et moteur



***F* : Vitesse de rotation**

Figure 2.13 Simulation de la GSAP avec une charge

Tableau 2.2 Paramètre de la génératrice GSAP en charge

	Désignations	Valeur	Unité
R_s	Résistance statorique	0,895	Ω
R_{ch}	Résistance de charge	50	Ω
L_d	Inductance statorique selon l'axe d	0,012	H
L_q	Inductance statorique selon l'axe q	0,0211	H
L_{ch}	Inductance de charge	0,002	H
φ_f	Flux des aimants permanents	0,9	Wb
F	Coefficient de frottement	0,001	Nm/rd/s
J	Inertie de l'ensemble turbine et génératrice	0,00141	$Kg.m^2$
P	Nombre de pôles	3	-
A1	[(R_s+R_{ch})/ (L_d+L_{ch}) 0; 0 (R_s+R_{ch})/ (L_q+L_{ch})];		
A2	[0 (L_q+L_{ch})/ (L_d+L_{ch}); -(L_d+L_{ch})/ (L_q+L_{ch}) 0];		
B	[0 ; Φ_f / (L_q+L_{ch})] ;		

II.11 Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents sous l'environnement Matlab/Simulink.

Après avoir présenté les types d'aimants permanents, les caractéristiques des matériaux utilisés, la description de la machine synchrone à aimants permanents et les différentes structures rencontrées, nous avons établi en premier lieu les différentes équations de la machine électrique triphasée dans sa structure générale, avant d'arriver à un modèle définitif de la génératrice synchrone à aimants permanents qui sera utilisé également par la suite.

Ce modèle a été validé par les résultats de simulation aboutis conformes pour un fonctionnement de la génératrice à vide et avec une charge.

Ces résultats montrent que la puissance mécanique fournie, la vitesse et la charge ont une influence directe sur les courants et les tensions de la machine.

Après la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée avec dans le contexte de la turbine d'une chaîne de conversion l'énergie éolienne dans ce chapitre, le cas où est la génératrice est connectée avec la charge par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance est abordé dans le chapitre qui suit.



Chapitre 3 : Généralités sur L'énergie Eolienne

III.1. Introduction :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est n'ai qu'au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe [25][26] [27]).

Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante.

Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones.

Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà.

Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs.

Depuis plus de cent ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale actuellement. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

III.2. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne :

Le vent, étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des

moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau.

Ces différentes utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable [28].

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne d'énergie, que le danois Poule La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [29].

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança le besoin d'utilisation des énergies renouvelables en remplacement des énergies fossiles. Des études sur l'utilisation de l'énergie éolienne ont été menées par plusieurs pays et des investissements importants ont été consentis pour améliorer et moderniser la technologie des chaînes de conversion éolienne. Ces investissements ont permis un développement important de l'utilisation de l'énergie éolienne par de nombreux pays dont l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark.

III.3. Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

L'énergie éolienne est une énergie intermittente "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les

installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière

L'énergie éolienne est utilisée par actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

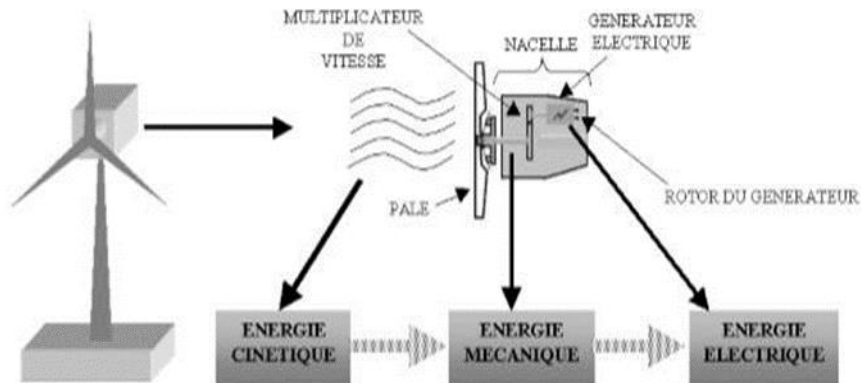


Figure 3.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent

II.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

Cette source d'énergie présente des inconvénients qu'il est nécessaire de palier pour qu'elle ne constitue pas un frein à son développement.

Le tableau ci-dessous montre les avantages et inconvénient de l'énergie éolienne :

Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

Avantages	Inconvénients
L'énergie éolienne est une énergie qui respecte l'environnement.	L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo.
L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules). [30]	Possède un mécanisme bruyant.
L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant. [30]	Le coût de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [30]
L'énergie éolienne ne produit pas de déchets toxiques.	L'impact visuel, « ça reste néanmoins un thème subjectif »
L'énergie éolienne produit de l'électricité : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols	La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les Aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
Le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.	
La surface occupée au sol est peu importante.	
C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables. [30]	

Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement.

Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer.

Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

III.5. Principaux composants de l'éolienne :

Une éolienne est généralement constituée de cinq éléments principaux :

La nacelle, la tour, la génératrice, le rotor, le multiplicateur.

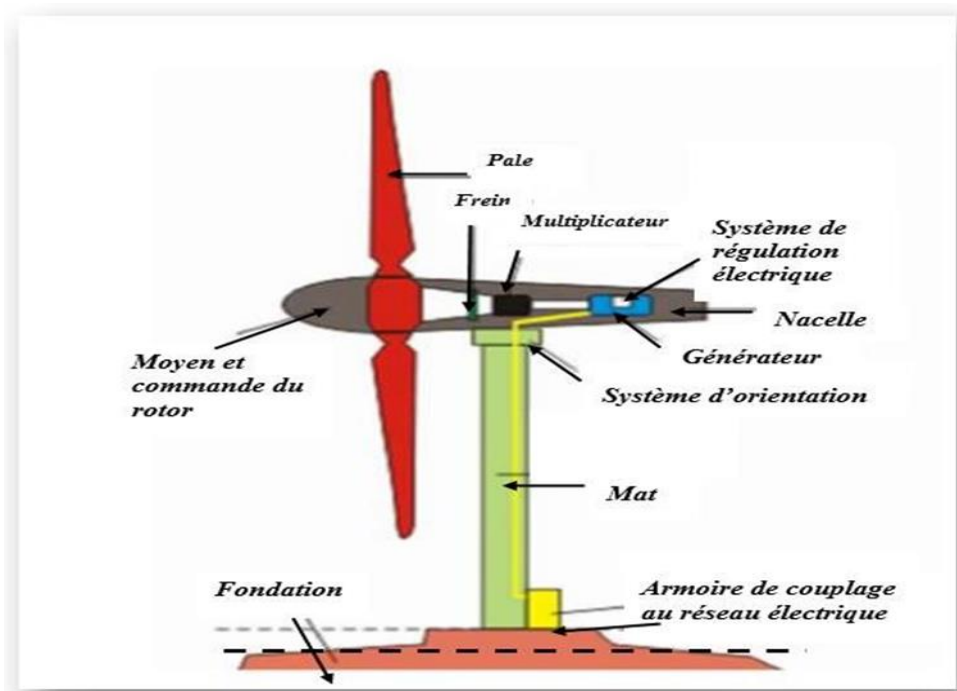


Figure 3.2 Schéma d'une éolienn

- **La nacelle** : Au sommet du mât se trouve la nacelle qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein, générateur...)
- **La tour (le mat)** : C'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum d'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Trois grands types de tour existent, à savoir :
 - **Tour mât haubané** de construction simple et moins coûteuse, elle s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
 - **Tour en treillis** qui sont les moins chères sont souvent mal acceptées et très peu utilisés. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.
 - **Tour en tubulaire** qui est beaucoup plus élégant, a un cout qui peut atteindre trois à quatre fois celui d'un pylône haubané.

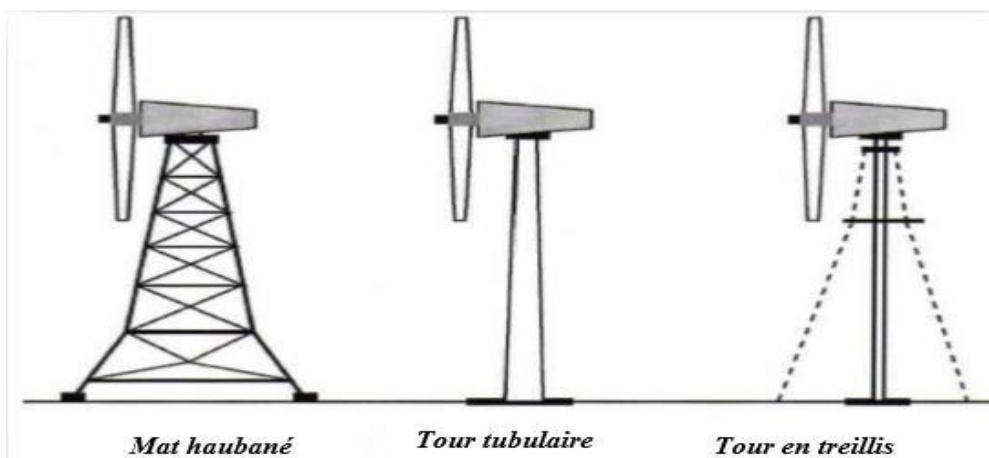


Figure 3.3 Différents types de tour

• **Le rotor** : Le rotor est entraîné par l'énergie du vent via des pâles, il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique ...).

• **Le multiplicateur** : Sert à adapter la vitesse de la turbine de l'éolienne à celle de la génératrice électrique.

• **La génératrice** : C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. C'est généralement soit une machine synchrone, ou une machine asynchrone à cage ou encore une machine à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.

III.6. Différents types d'éoliennes :

Il existe deux grandes familles d'éoliennes certaines ont un axe horizontal, parallèle au sol, et d'autres ont un axe vertical, perpendiculaire au sol.

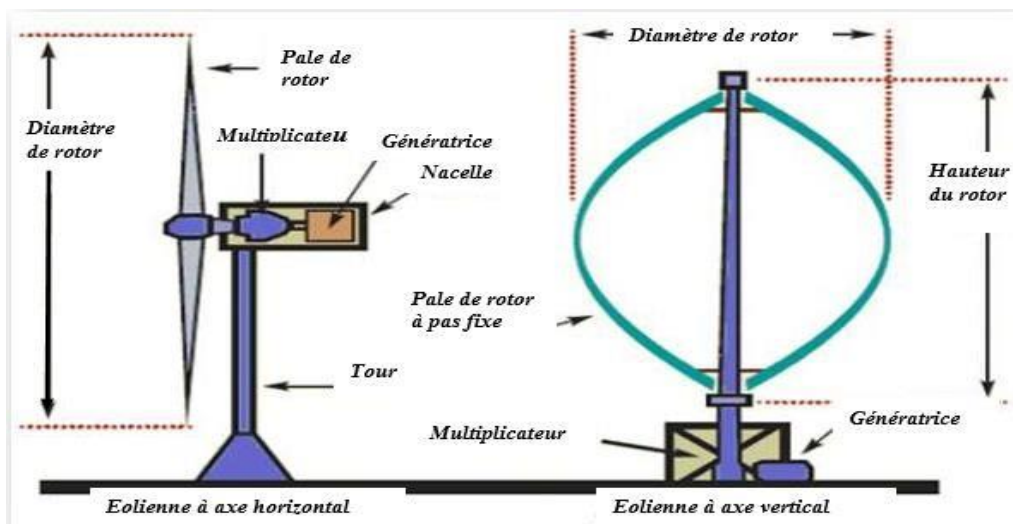


Figure 3. 4 deux types des éoliennes

• **Les éoliennes à axe horizontal** : Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent.

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois (les plus courantes) ou plusieurs pales.

Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion.

Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place.

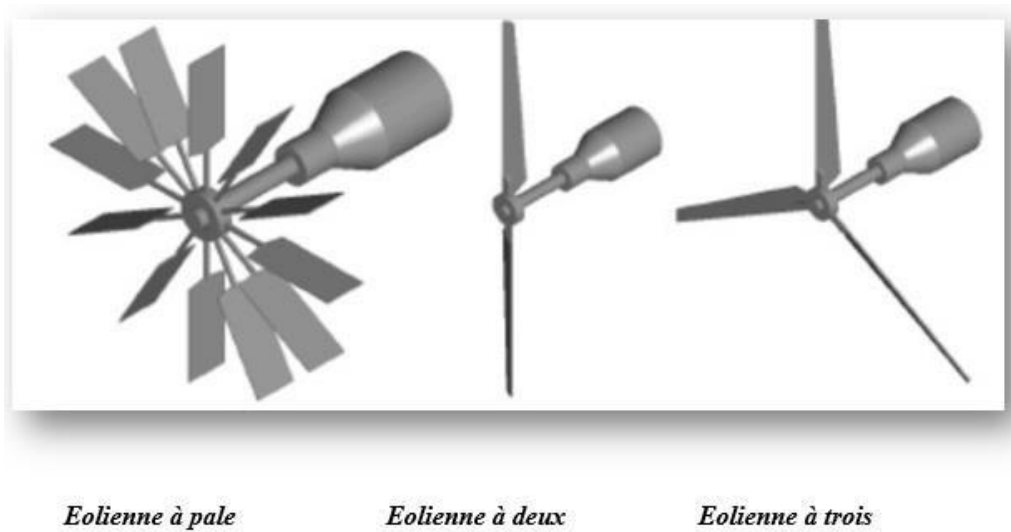


Figure 3.5 éoliennes à axe horizontal

- **Les éoliennes à axe verticale** : elles ont été les premières structures utilisées pour produire de l'électricité.

Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

Il existe deux types d'éolienne verticale, les éoliennes de Savonius (inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924), 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.

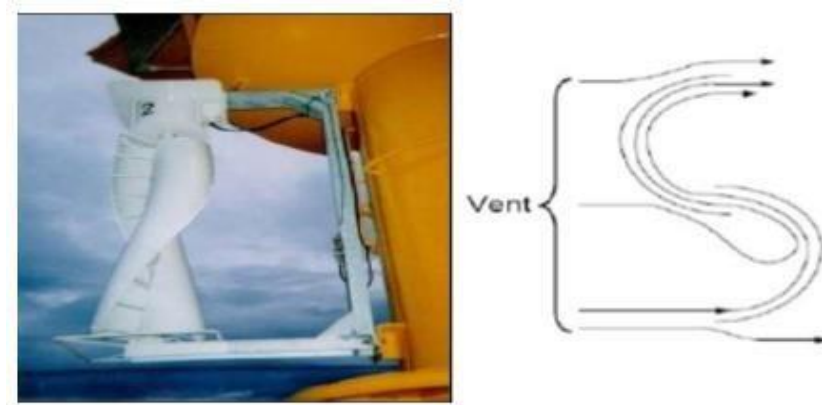


Figure 3.6 éoliennes à axe vertical de type Savonius et les éoliennes de Darrieus (conçu par l'ingénieur français George Darrieus).

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction de l'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Figure3.7).

La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

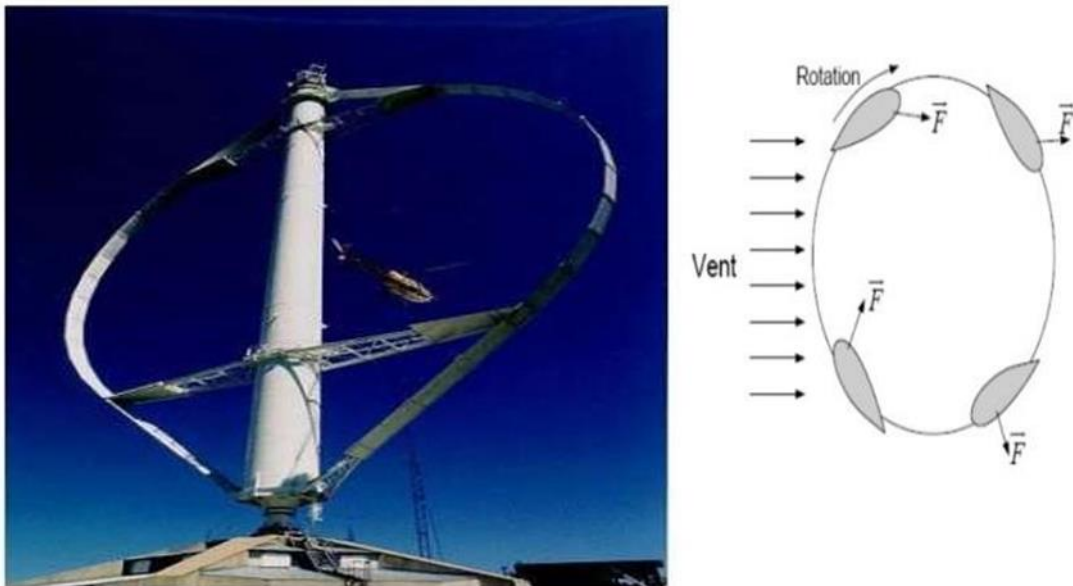


Figure3.7 éoliennes à axe vertical de type Darrieus

Parmi les avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontale et axe verticale, nous avons

Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontale et axe vertical

	Horizontal	Vertical
Avantages	Cout limité	De conception plus simple que Les machines à axe Horizontal
	Peu de contraintes mécaniques	Elle est plus facile d'accès
	Grande efficacité	
Inconvénients	Bruit conséquent	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal
	Vibrations non négligeables	Les éoliennes ne démarrent pas automatiquement, il faut utiliser la génératrice comme moteur pour permettre le démarrage de l'éolienne

	<p>Grande sensibilité au flux éolien variation</p>	<p>Leur implantation au sol exige utilisation des tirants qui doivent être au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour</p>
--	--	---

III.7. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique.

Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique transmise en suite au réseau électrique

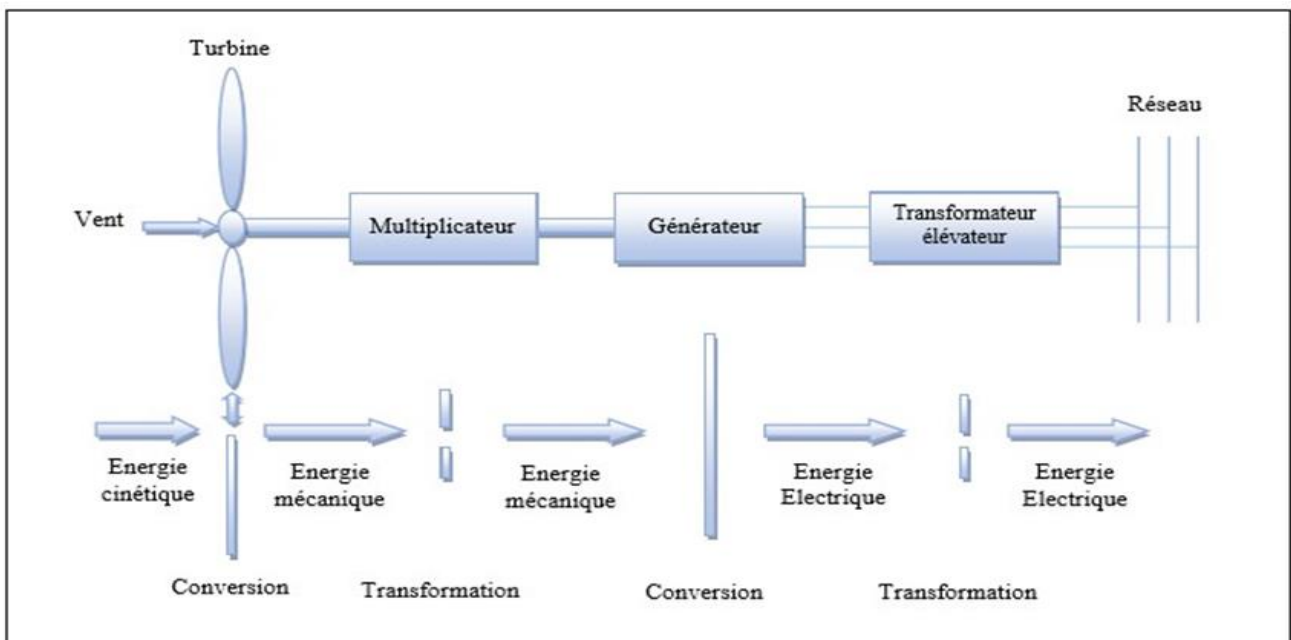


Figure3.8 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

Son principe de fonctionnement est donc relativement simple.

Pour résumer, le vent va faire tourner les pales qui elles-mêmes vont faire tourner le générateur.

A son tour le générateur va transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

L'électricité est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage.

III.8. Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) :

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent 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 [26].

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 (Figure 3.9).

Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (off-shore par exemple).

La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [26].

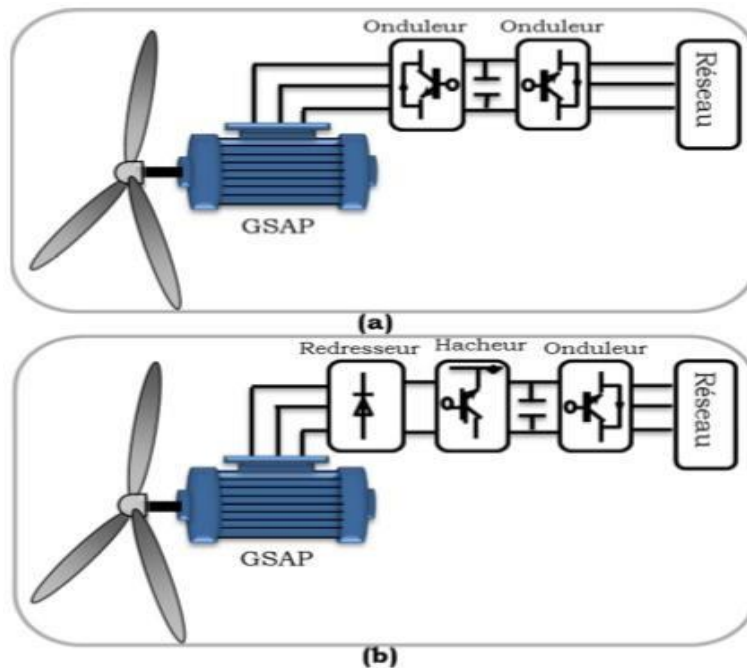


Figure 3.9 systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI, (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés.

Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix.

De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu sont constitués de matériaux classiques.

Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie.

Dans la configuration de la GSAP de la (Figure 3.9(b)), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique.

La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance [26].

L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension.

En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW) [26].

Dans la configuration de la (Figure 3.9 (a))

Un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI.

L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande (sinus triangle) ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal.

Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et la fréquence [26].

En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la (Figure 3.10), un système à vitesse « Non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu [25].

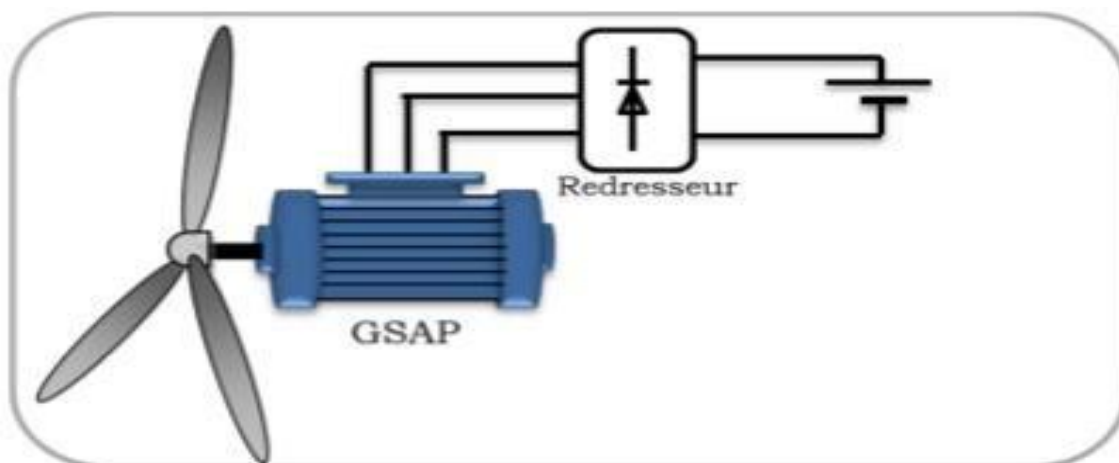
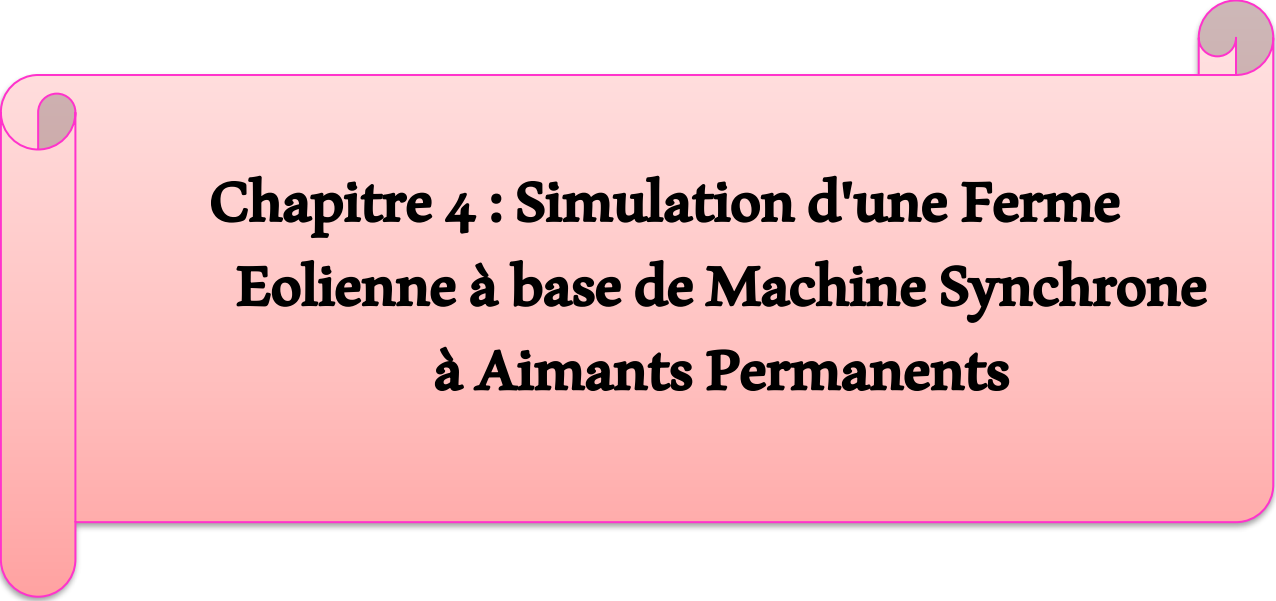


Figure 3.10 Système éolien à coût minimum basé sur GSAP [25]

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'exploitation de l'énergie éolienne et son importance en tant qu'énergie verte.

Nous avons également consacré ce chapitre à la description d'une éolienne, le calcul de la puissance extraite de la rotation de celle-ci, et les objectifs derrière le contrôle de son fonctionnement.



**Chapitre 4 : Simulation d'une Ferme
Eolienne à base de Machine Synchrone
à Aimants Permanents**

IV.1 Introduction :

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La turbine est accouplée à la génératrice et permet la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique.

Après avoir présenté le principe de la conversion d'énergie éolienne, et modéliser la chaîne complète de conversion éolienne et ses parties essentielles, qui sont la turbine, le vent et turbine-génératrice ; nous nous attachons dans ce chapitre, à présenter la structure globale de cette chaîne avec une modélisation détaillée des différents éléments et une simulation comportementale du système complet sur le plan électrique et énergétique. Les résultats de simulation sont présentés sous Matlab-Simulink .

Les composants électriques tels que les convertisseurs statiques et l'élément de filtrage disposés en aval de la génératrice, ont un rôle d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique, ont un rôle d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique entre la génératrice et la charge finale.

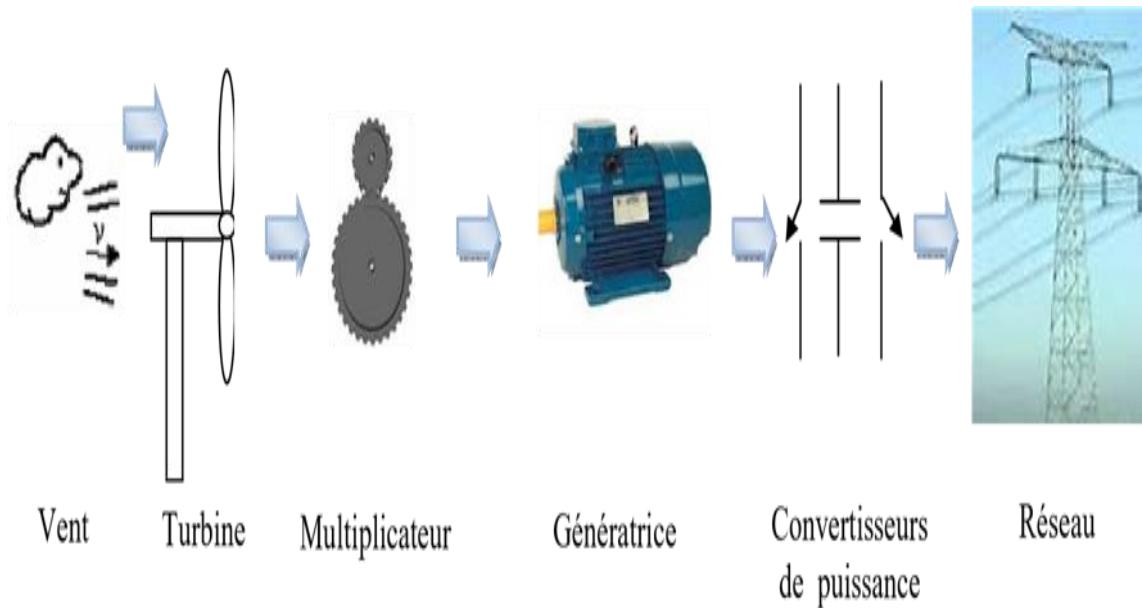


Figure 4.1 Exemple d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

IV.2. Modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne :

Dans cette partie, nous allons nous intéresser plus particulièrement à la modélisation des principales composantes d'une éolienne de petite taille adaptée à des régions sahariennes comme Adrar.

La chaîne de conversion éolienne est schématisée comme suit :

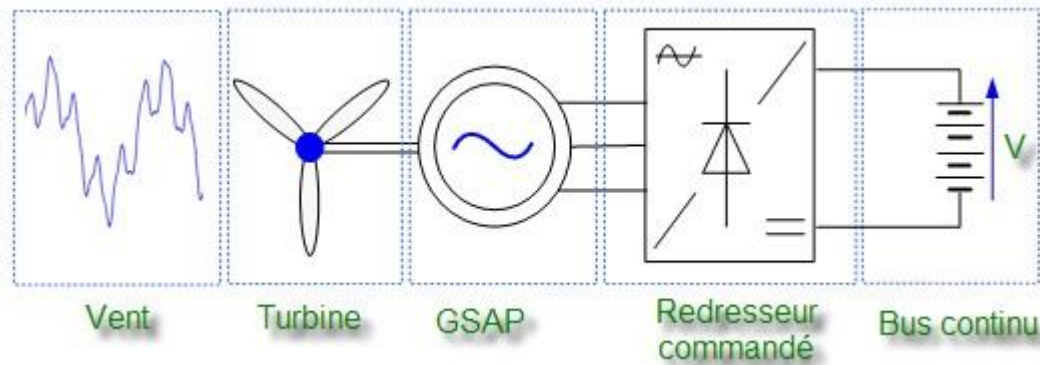


Figure.4.2 Structure de la chaîne éolienne.

Celle-ci est constituée d'une voilure couplée directement à une génératrice synchrone qui débite sur un bus continu via un redresseur à diodes ; c'est la structure que nous retenons pour ce travail.

IV.2.1. Modélisation du vent :

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre.

Il est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, donc pour la rentabilité [31].

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent (cf. formule (4.2)). Ces fluctuations étant influencées par le déplacement des masses d'air en altitude, mais également par le relief, le type de recouvrement du sol et la stabilité thermique de l'atmosphère.

Le vent varie en direction et en intensité, mais pour les besoins du modèle, on se limite à la variation du vent en intensité, dans une seule direction afin de déterminer une séquence valable et représentative de vents réels [33], [32].

Des différentes approches utilisées dans la littérature pour la génération d'une série synthétique de vent, dans notre cas, la vitesse de vent sera modélisée par une somme de plusieurs harmoniques [34] [35] [31] :

$$V_{vent}(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k \cdot t) \quad (4.1)$$

a_k : Amplitude des harmoniques

ω_k : Fréquence des harmoniques

La vitesse du vent est représentée par la fonction :

$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) \\ + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (4.2)$$

Il est à signaler que ce profil de vent particulier correspond à [34, 35, 36,37].

IV.2.2. Modélisation de la turbine éolienne :

Une turbine éolienne est une machine qui, par définition, transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.

Pour débiter, il y a lieu de quantifier la source d'énergie dont on dispose, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent présente une certaine vitesse "V" à un moment donné et traverse une certaine surface "A", la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (4.3)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air, qui vaut approximativement 1.2 kg/m^3 . A est la surface balayée par la turbine en m^2 , V est la vitesse du vent en m/s . C_p (coefficient de puissance).

La turbine, utilisée dans le cadre de notre travail, est une éolienne "Savonius" à axe vertical (voire Figure.4.3).

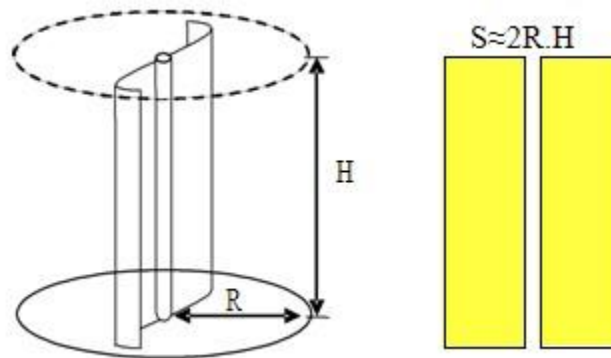


Figure 4.3 Voilure à axe vertical de type Savonius [37]

La surface "A " donnée par la formule suivante :

$$A = 2R.H \quad (4.4)$$

Où R représente le rayon de la voilure (m) et H sa hauteur (m).

La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante que nous normaliserons en pu:

$$P_m = C_p (\lambda). \rho. H. R. V^3 \quad (4.5)$$

où C_p est un coefficient qui exprime l'efficacité de la voilure dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, est en fait souvent donné en fonction de la vitesse réduite (la vitesse spécifique λ) qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit définie par :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{V} \quad (4.6)$$

où Ω la vitesse angulaire de rotation des pales en rad/s .

L'évaluation du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne.

A partir de relèves réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour cette turbine [34, 36, 37], par l'équation analytique en fonction de λ (résultante de l'interpolation) suivant :

$$C_p(\lambda) = -0.12992 \lambda^3 - 0.11681\lambda^2 + 0.45406 \lambda \quad (4.7)$$

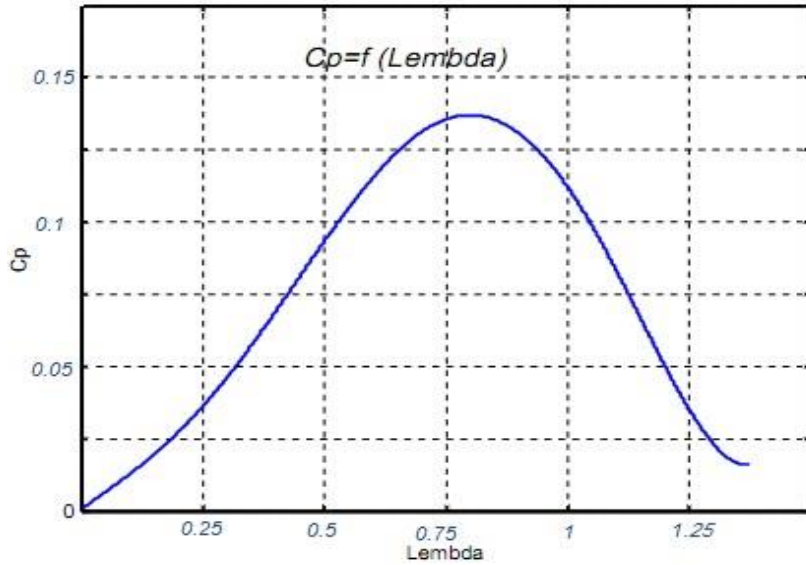


Figure 4.4 Courbe caractéristique retenue pour les essais.

La figure (Figure.4.4) représente les caractéristiques de coefficient de puissance en fonction de λ . Il présente un facteur de puissance maximal $C_{p \max} = 0.13$ pour $\lambda_{\max} = 0.85$.

Le couple éolien noté : C_e est obtenu à partir de l'équation (4.5) et en utilisant l'expression (4.6) de la vitesse réduite :

$$C_e = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot V^2}{\lambda} \quad (4.8)$$

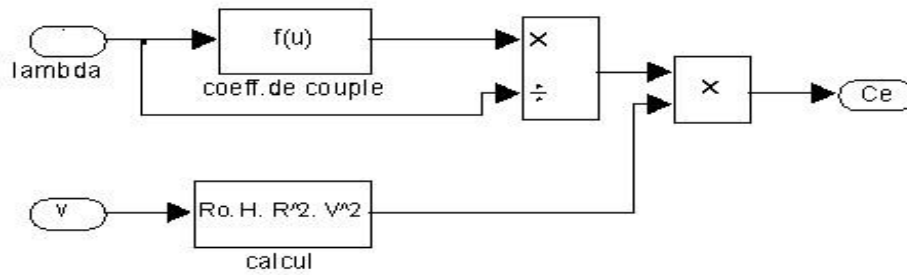


Figure.4.5 Modèle du couple éolien sous Simulink.

La figure (Figure 4.6) présente la caractéristique de la turbine à travers de la courbe d'extraction de puissance éolienne de la turbine en fonction de la vitesse de rotation.

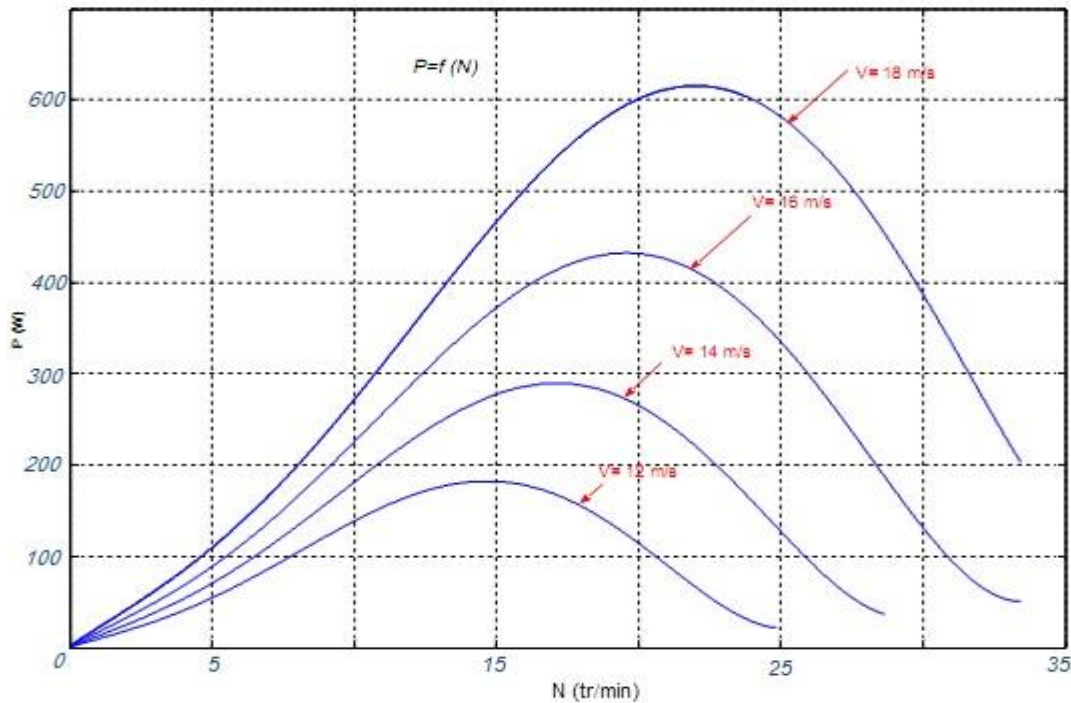


Figure 4.6 La puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de rotation

On remarque à la figure (Figure.4.6) que la puissance électrique est variable avec la variation de la vitesse angulaire mécanique de la turbine. L'allure de la puissance électrique en fonction de la vitesse angulaire mécanique est semblable à celle du C_p en fonction de λ . On remarque aussi que plus la vitesse du vent est grande plus la puissance délivrée est grande car la puissance est exprimée par la vitesse au cube du vent.

IV.2.3 Modélisation mécanique du couplage turbine – génératrice :

Le comportement dynamique (mécanique) de l'ensemble turbine et génératrice peut être représenté par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_{em} - C_f \quad (4.9)$$

où

Ω la vitesse sur l'arbre du générateur

C_f Le couple de frottement

C_{em} Le couple électromagnétique développé par le générateur

C_e Le couple mécanique appliqué à l'arbre de l'alternateur

J Le moment total d'inertie, calculé avec :

$$J = J_{gen} + \frac{J_t}{i^2} \quad (4.10)$$

On note que :

$$C_f = f_m \cdot \Omega \quad (4.11)$$

où f_m est le coefficient de frottement visqueux en N.m.

Le couple éolien fourni par la turbine, permet d'entraîner la génératrice. En tenant compte des chutes de couple causées par le frottement et l'inertie de la turbine, nous pouvons établir le modèle électromécanique de la figure (Figure.4.7).

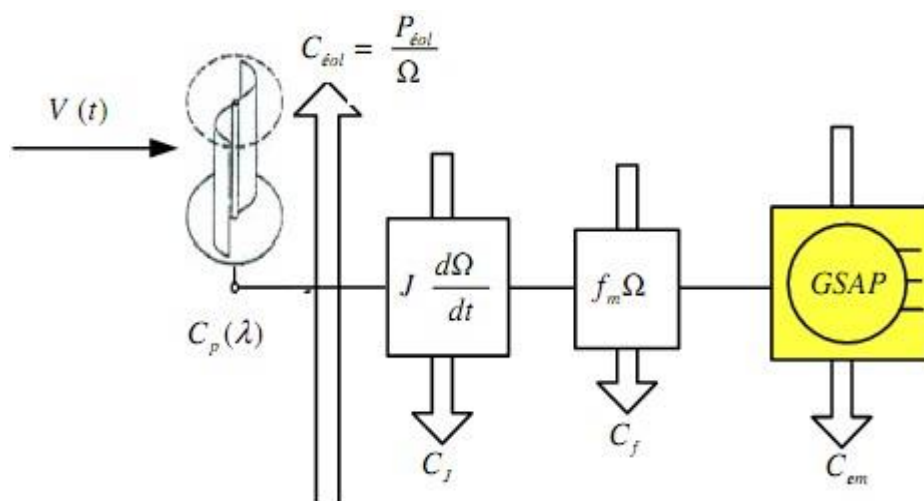


Figure 4.7 Modèle du couple de la turbine éolienne

On peut aussi, modéliser la turbine par le schéma bloc suivant :

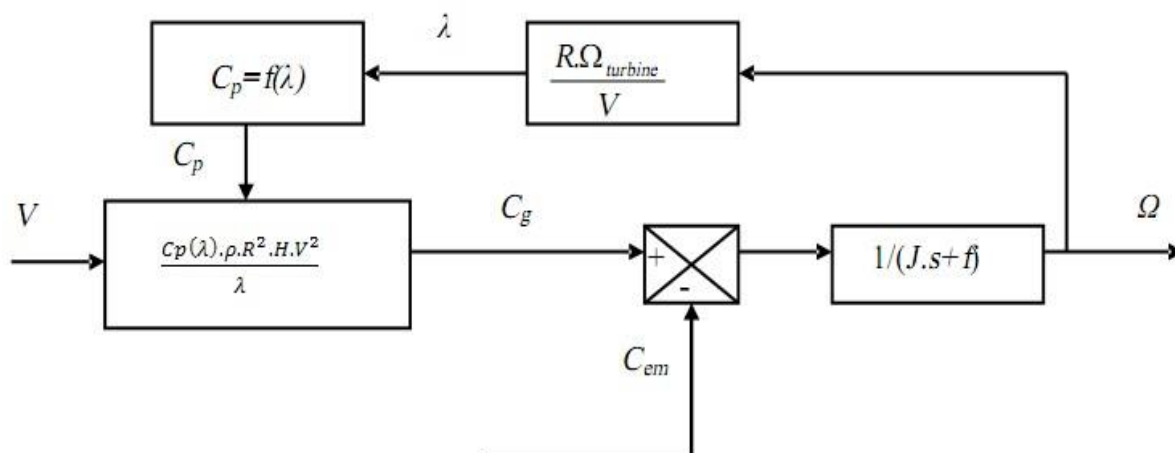


Figure 4.8 Schéma bloc de la turbine éolienne

IV.3.Simulation :

IV3.1.L'outil Matlab/Simulink :

MATLAB fait partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Tool boxés).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs
- Simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Block sets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop. SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communication et de traitement du signal.

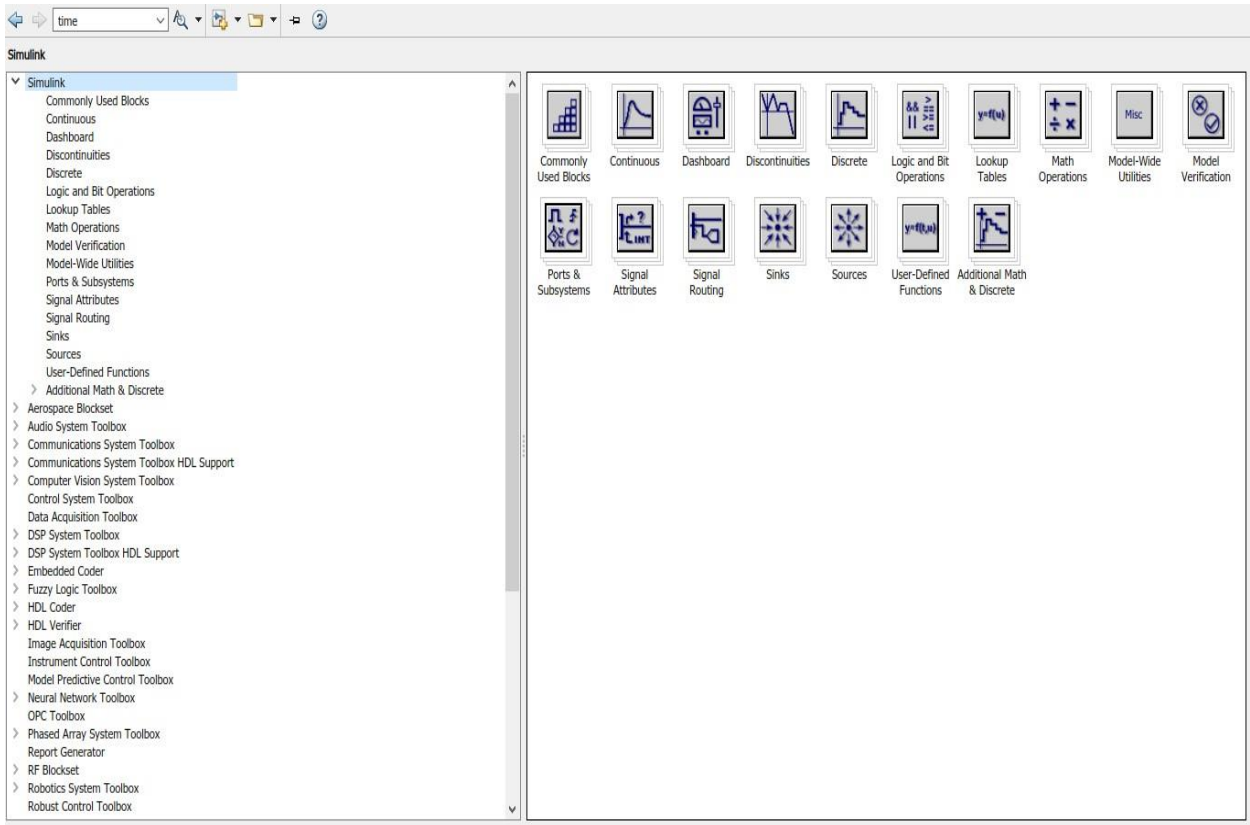


Figure 4.9 bibliothèque SIMULINK.

IV.3.2 Schéma bloc de simulation de la chaîne de conversion :

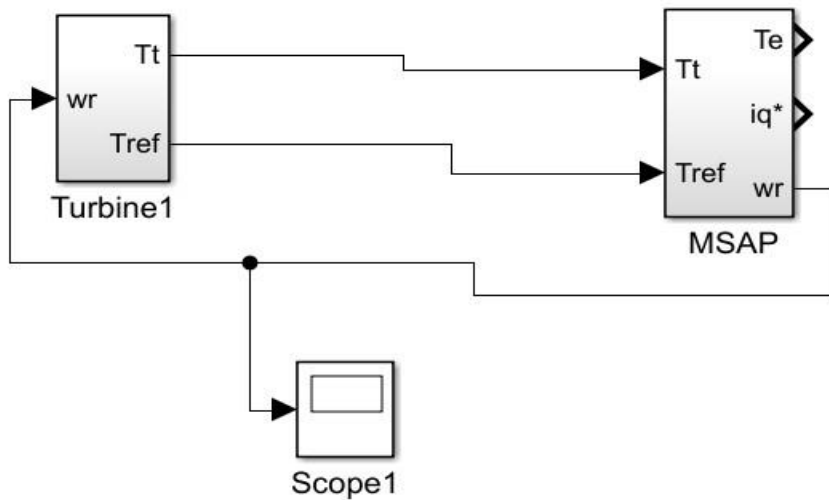


Figure 4.10 simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

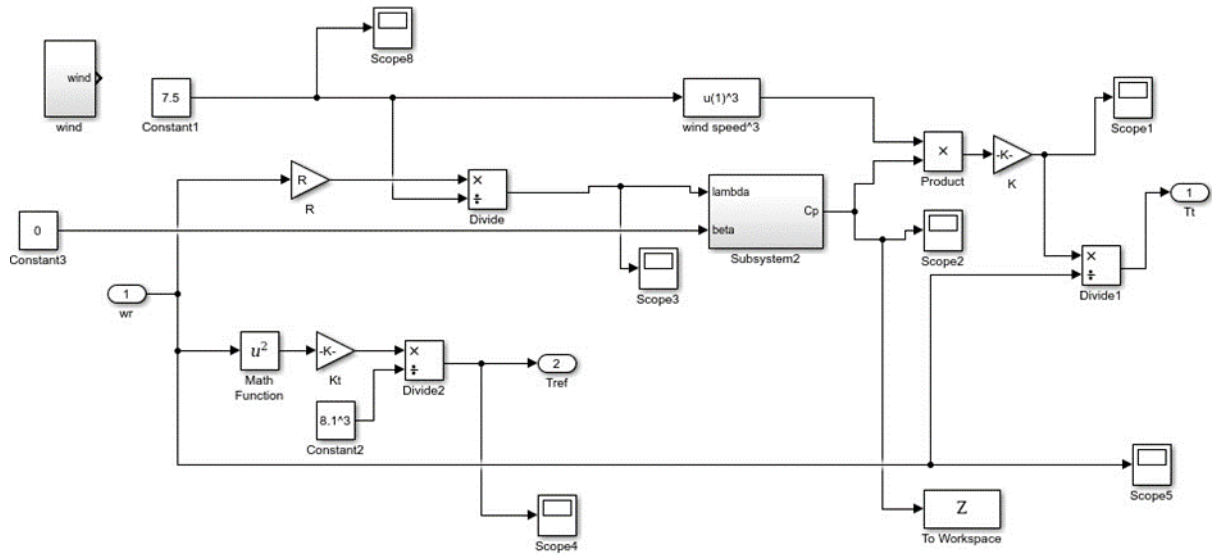


Figure 4.11 Schéma bloc du modèle de la turbine

IV. 3.3 La machine synchrone à aimant permanent

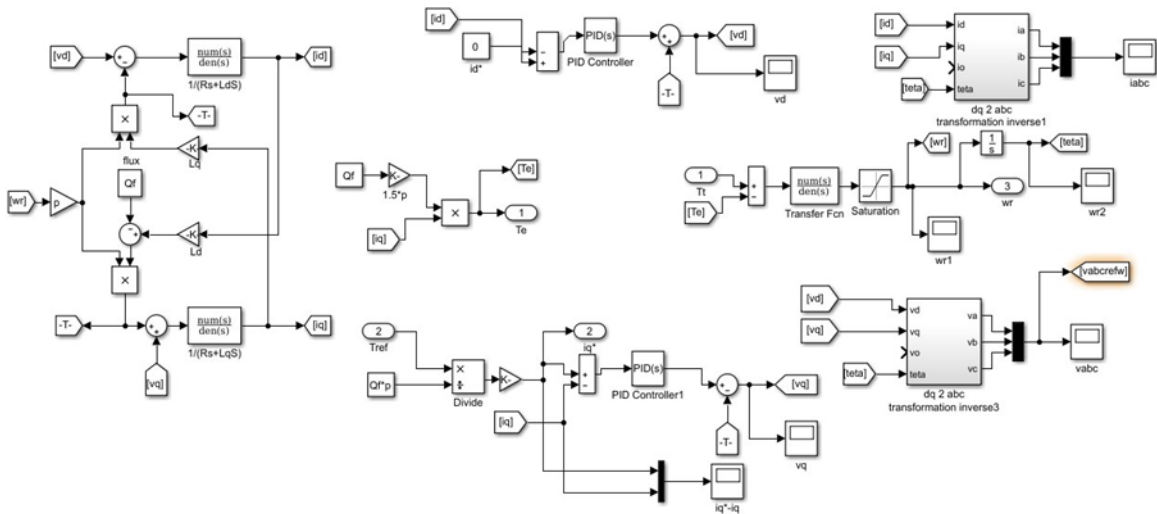


Figure 4.12 Schéma bloc de la machine

IV 3.4 Résultats de simulation

IV 3.4.1 Vitesse constante :

Nous avons connecté notre MSAP à une turbine à vitesse mécanique constante, égale à peu près à 25 rad/s, après un régime transitoire de 1.5 s .

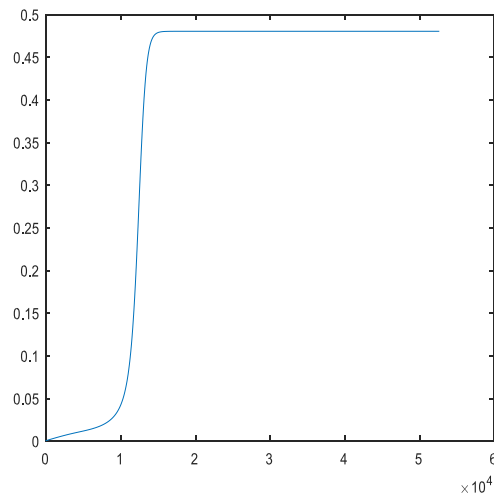
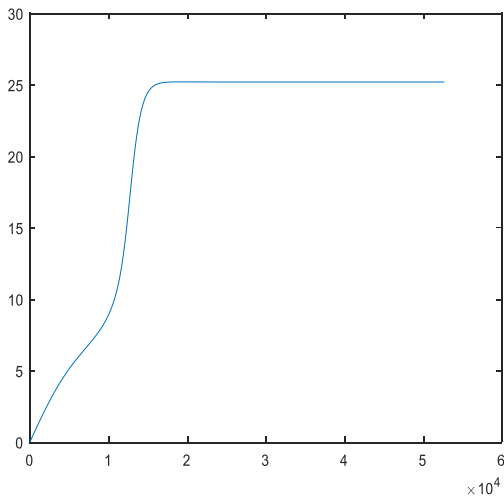


Figure 4.13 Vitesse mécanique de la turbine v_t [rad/s] Figure 4.14 Le Coefficient de puissance

Les Figure(4.13) présente la vitesse de rotation de la turbine et la Figure (4.14)le coefficient de couple, ainsi les Figure(4.15) et (4.16) présente le couple et la puissance à la sortie de la turbine à vide et pour une vitesse moyenne du vent égale à 7.5m/s.

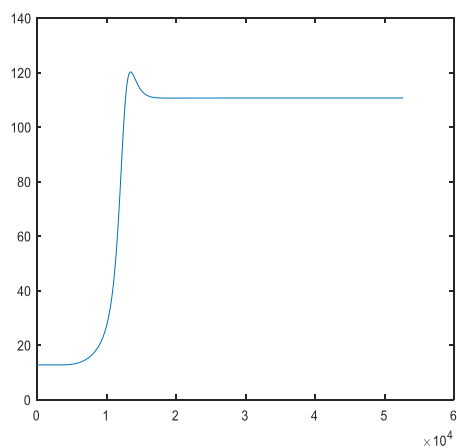


Figure 4.15 Le couple électromagnétique

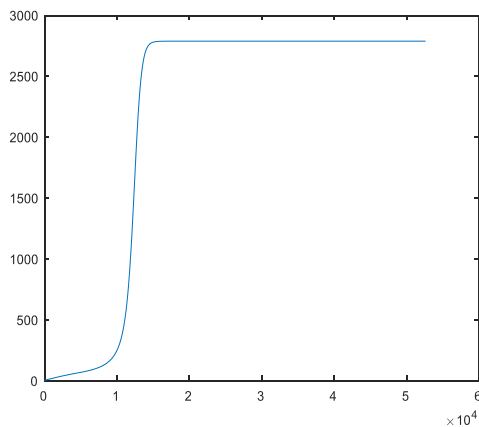


Figure 4.16 La puissance mécanique

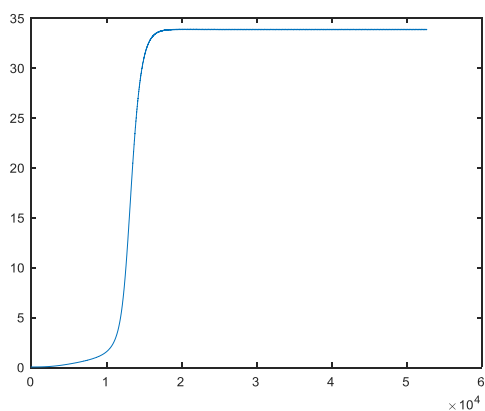


Figure 4.17 Tension direct Vd

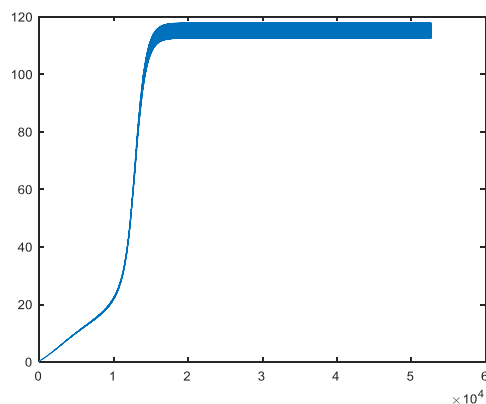


Figure 4.18 Tension de quadrature Vq

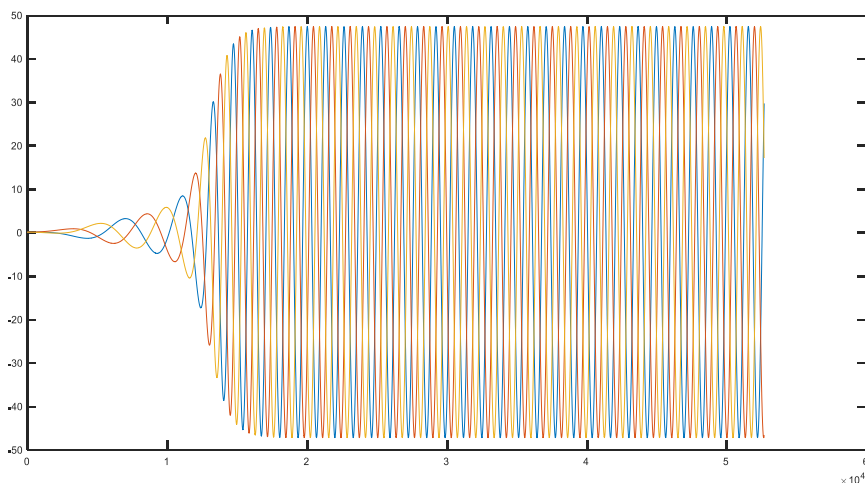


Figure 4.19 Courants statoriques i abc

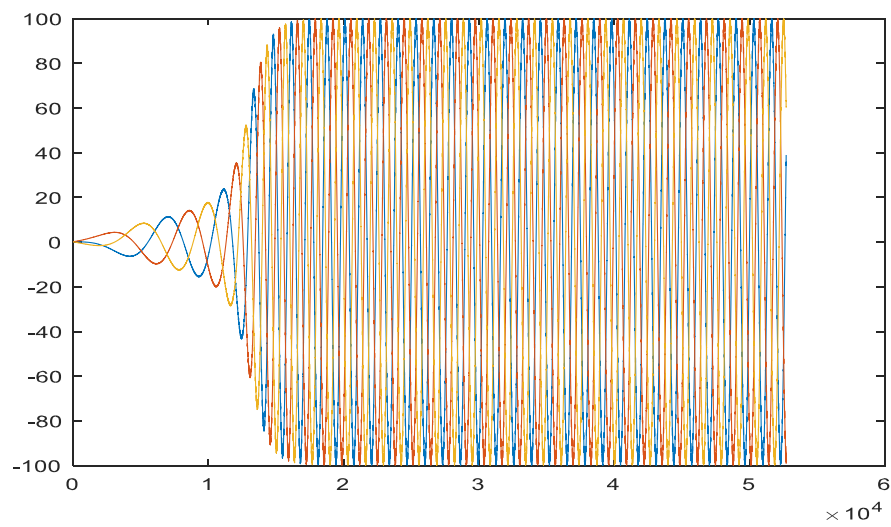


Figure 4.20 Tensions statoriques V abc

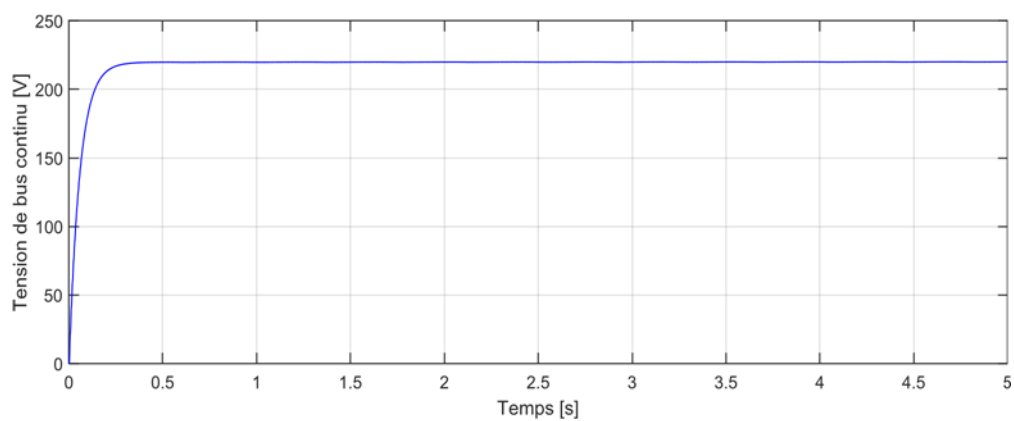


Figure 4.21 Tension redressée

IV 3.4.2 Vitesse variable :

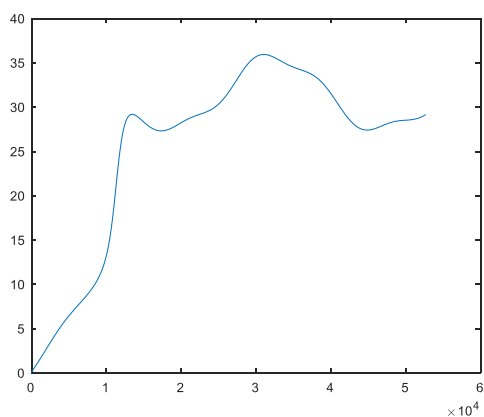


Figure 4.22 La vitesse de la turbine(a)

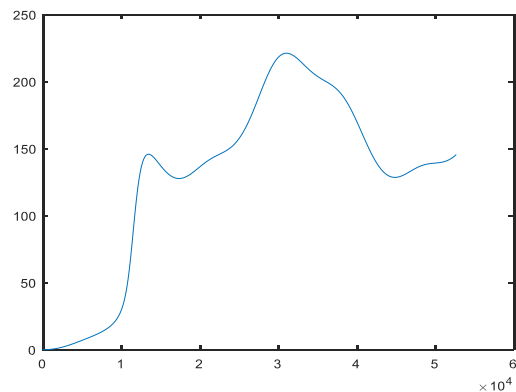


Figure 4.23 Le couple électromagnétique(b)

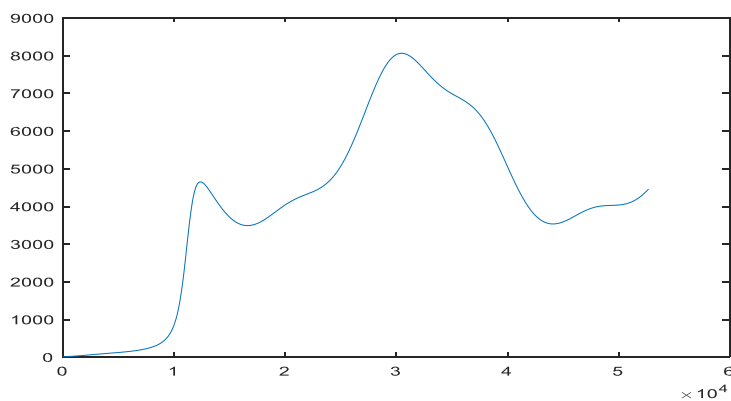


Figure 4.24 la puissance

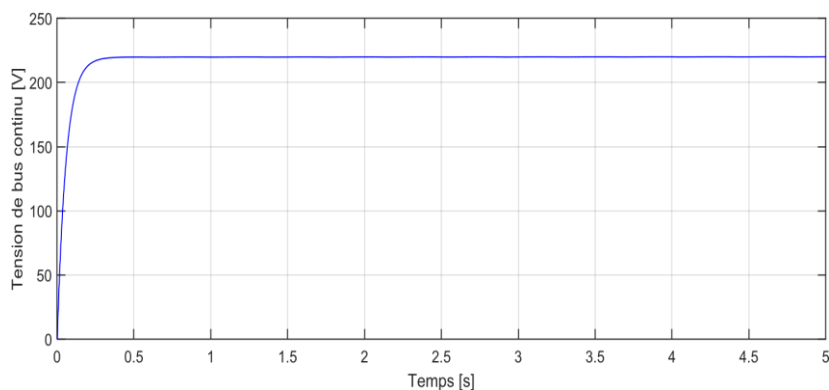


Figure 4.25 Tension redressée

Les Figures (4.22)et(4. 24) montrent que la vitesse et la puissance électrique en régime permanent ont une bonne adaptation aux variations de la vitesse du vent.

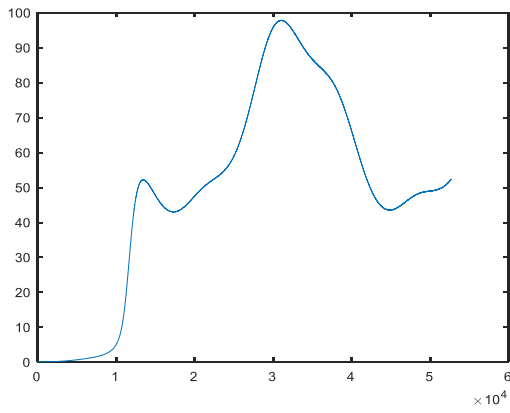


Figure 4.26 composante Vd (a)

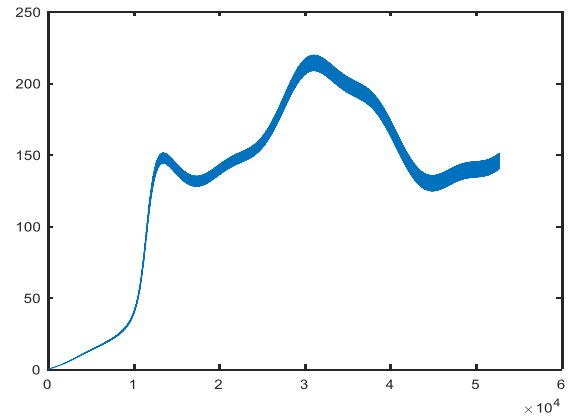


Figure 4.27 composante Vq (b)

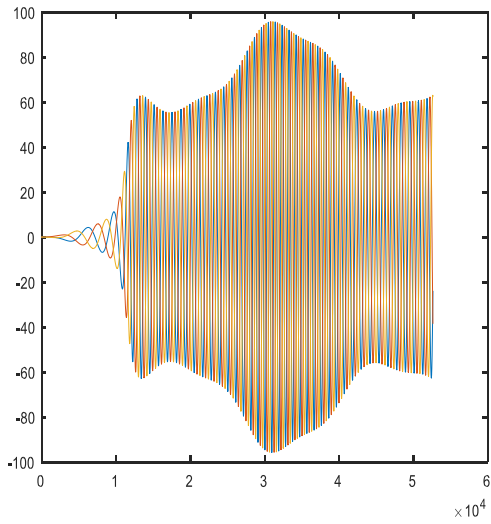


Figure 4.28 Courants statoriques i abc (e)

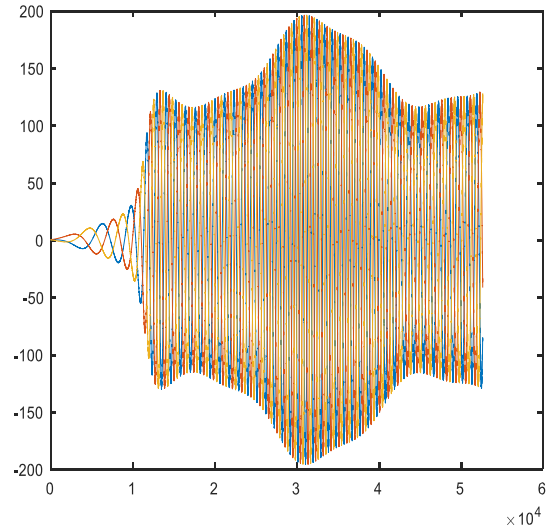


Figure 4.29 Tensions statoriques Vabc (f)

IV.4. Conclusion :

Dans ce chapitre on a établi un modèle global de la chaîne de conversion éolienne qui est constituée d'une machine synchrone à aimants permanents GSAP associé à une turbine éolienne.

La turbine utilisée est celle à axe vertical de type Savonius.

Ensuite, on a présenté la structure du système de conversion d'énergie éolienne.

Enfin on a présenté les résultats de simulation de la chaîne complète de production d'énergie éolienne.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était la modélisation et la commande floue optimisée d'une Génératrice Synchrones à Aimant Permanent, ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter dans un système éolien. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, la modélisation, l'analyse de fonctionnement et la commande.

La production de l'énergie éolienne importe de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie motrice de développement durable.

Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs aérodynamiques pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple. Tout cela a été conçu autour d'une GSAP.

Le premier chapitre a été réservé à l'étude du redresseur à MLI par la présentation de sa structure, son fonctionnement, ainsi que sa commande à MLI. Cette structure particulière du redresseur nous a permis d'avoir une tension parfaitement redressée quelque soient les fluctuations du vent. L'onduleur à MLI a la même structure de celle du redresseur étudié et nous a permis d'obtenir des tensions de phases de la fréquence désirée.

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

GSAP. L'écriture de ces équations dans le repère de Park c'est pour effectuer la commande afin de faciliter son étude et notamment sa simulation sous Matlab-Simulink.

Le troisième chapitre nous avons dressé un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. On a présenté aussi la machine synchrone à aimants permanents.

Le quatrième chapitre a été consacré sur la commande de la machine synchrone à aimant permanent associée avec le système éolien. Nous avons établi un modèle global de la chaîne de conversion éolienne qui est constituée d'une machine synchrone à aimants permanents GSAP associé à une turbine éolienne ; puis nous avons présenté les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolienne et nous avons décrit la commande de la liaison entre une GSAP, un redresseur commandé et la charge. La commande du système a été aussi détaillée ; et à la fin, nous avons présenté les résultats de simulation de la chaîne complète de conversion d'énergie éolienne.

En perspective, ce travail peut être poursuivi et complété afin d'améliorer la production décentralisée et ceci, par l'étude des points suivants :

- Étude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne - photovoltaïque –diesel) ...etc.
- Étudier la gestion des systèmes, c.à.d. réalisé des optimisations sur des critères de minimisation du coût.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **SEG 81:G.Seguir.FLabrique** "Les convertisseurs de l'électronique de puissance".vol 4,Lavoisier,1981.
- [2] **HAM 95:BHamata,NLouchen** "Commande vectorielle d'un moteur asynchrone alimentée en courant" Mémoire de magister,ENP Alger,1995.
- [3] **REZ09:S.Rezgui** "Commande de machine électrique en environnement,Matlab/Simulink et TempsRéel"Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine,Algérie;2009.
- [4]**G.Seguir and F.Labrique**, "Les convertisseurs de l'Electronique de puissance", Tome 4:La conversion Continu-Alternatif,Edition Lavoisier, Technologie et Documentation,1989.
- [5] **Benadel HANI Choudra MESSAOUD**,technique de commande d'un onduleur triphasé,projet de fin d'étude licence génie électrique.
- [6] **GRE00:G.Grellet,G.Clerc** "Actionneurs électriques:Principe, modèles et commandes",Eyrolles,Paris,France,2000.
- [7] **CIM05:G.O.Cimuca** "Système inertiel des stockage d'énergie associé à des «Métiers Centre de Lille,France,2005.
- [8] **KIR LKirsane** "Commande non linéaire de la machine induction aspect expérimental",Mémoire de magister, Université de Batna,2008.
- [9]<http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/stall.htm>
- [10] «convertisseurs et machines électrique» Techniques de l'ingénieur,D3960
- [11] **Y.Chen,A. Khan**, «PM Wind Generator Topologies »IEEE Tranaction onindustry application, vol.41mNo.6,Novembre/Décembre2005.
- [12] **M.Chinchilla,S.ArnaltesJ.carlos Burgos** «control of Permanent Maqnet Generators Applied to variable-Spend Wind- Energy Systems Connected to theGrid»,IEEE Transqction on energy conversion vol 21,n°,1,Mars 2006.
- [13] **F.Poitiers**,«Etude et coummande 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°.ED0366-125.

[14] **F.Sahin**, «Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine», thèse de doctorat de l'Université de Eindhoven, 2001.

[15] **Dr.Gary L.Johnson**, «Wind Energy Systems», Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001.

[16] **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

[17] **S.R.Guda** «Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation». thèse de master de l'université de Bozeman, Montana. Juillet 2005.

[18] **A.D. Hansen, C.Jauch, P.Sørensen, F.Iov, F. Blaabjerg**, « Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIGSILENT », projet de recherche, laboratoire national de Riso, Roskilde. Décembre 2003.

[19] <http://www.windpower.org/fr/tour/wres/betz.htm>

[20] **S. eier**, « Grid Integration of Wind energy Conversion Systems », John Wiley & Sons,

[21] **R. Bharanikumar, A. N. Kumar**, "Analysis of Wind Turbine Driven PM Generator with Power Converters", International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 4, 1793-8163, August, 2010.

[22] **S. B. Ozturk**, "Modeling, Simulation and Analysis of low-cost direct torque of PMSM using hall-effect sensors", Master's thesis, Texas A&M University, December 2005.

[23] **Adam MIRECKI**, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2005.

[24] **R. B. F. L. Guy Séguier**, Electronique de puissance: Structures, fonctions de base, principales applications, DUNOD, 2004.

[25] **A.MIRECKI** «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance» Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.

[26] **M.MESSAOUD** «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents» mémoire de magister Université de Batna, 2008.

[27] **NICOLAS LAVERDURE**«Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble,2005.

[28] **TOUAL BELKACEM**«Modélisation et Commande Floue Optimisé d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable»mémoire de magister Université de Batna,2010.

[29] **B.MULTON,O,GERGAUD,H.BEN AHMED,X.ROBOAAM,S.ASTIER,B.DAKYO, C.NICHITA**«état de l'art dans les aérogénérateurs électrique »paru mai en 2002.

[30] **HARITZA CAMBLONG** «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable»thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.

[31] **D.H. TRAN**, "Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive ; Analyse de robustesse, validation expérimentale", Thèse de Doctorat de L'université TOULOUSE, septembre 2010.

[32] **J. D. LANGLOIS**, "Modélisation et étude des performances des systèmes éoliens hors réseau ", Thèse Master à l'école de technologie Supérieurs, Montréal. 2006.

[33] **A. Harrouz, B. A Ali Harrouz**, " Modalisation d'une Petite Eolienne Hors Réseaux Basé sur la Génératrice Synchrone a Aimant Permanent", International Conférence on Energy and Sustainable Développement, p 5, 2011.

[34] **A.Mirecki** ," Etude Comparative de chaînes de Conversion d'Énergie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance". Institut nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.

[35] **A. Naima**, "Étude et Modélisation de l'Entrainement Électrique d'un Système Éolien à base de la Machine synchrone à Aimant Permanents", Mémoire de Magister en électronique, Université de Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, Décembre 2010.

[36] **S. BELAKEHAL**, "Conception & Commande des Machines à Aimant permanent Dédiées aux Énergies Renouvelable", Thèse de doctorat, Université de constantine, Juin 2010.

[37] **A. Abdelli**, "optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive", Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2007.

