

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

ELECTROTECHNIQUE
MACHINE ELECTRIQUE

Présenté par

ALI BEN YAHIA Abd Elghani

Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne

Proposé par : **Dr N. CHEGGAGA .**

Année Universitaire 2019-2020

بسم الله الرحمن الرحيم

وصلى الله وسلم على نبيِّنا محمد وعلى آله وأصحابه

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

. Nous remercions nos promotrice Dr. N. CHEGGAGA Enseignants à l'USDB pour nous avoir proposé ce sujet et pour leur disponibilité, leurs nombreux encouragements et les conseils qu'ils nous ont prodigués le long de ce travail.

Nos remerciements s'étendent aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail, ainsi qu'à nos professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

À ma chère mère,

À mon cher père qui a sacrifié son temps à nous ;

À mon frère Ibrahim ;

À mes adorables sœurs : DJahida ; Assia, Hadjira, Safia
Karima, Fatma ; et Linda

À mes très chers frères : Djeloule .

Pour les enfants : Asile ; Jawad.

À toute ma grande famille ALI BEN-YAHIA et ZERG LAINE .

À tous mes amis, oussama Mellak ; l'bachire ; Abdullah »

ALI BEN YAHIA Abd Elghani

ملخص:

في هذا البحث ، ندرس النمذجة والتحكم في مولد متزامن مغناطيسي دائم مرتبط بسلسلة تحويل طاقة الرياح الصغيرة في موقع معزول. قمنا باقتراح نظام من خلال مقوم تعديل عرض نبض الإخراج (MLI) الذي يتم التحكم فيه بشكل مستمر بواسطة خوارزمية (MPPT) التتبع الأقصى لنقطه الطاقه وهذا من أجل الحصول على أقصى قدر من كفاءة الطاقة. نتائج عمليات المحاكاة المختلفة لسلسلة التحويل بأكملها ، التي أجريت في بيئة ماتلاب / محاكاة ، جعلت من الممكن تقييم أداء النظام المقترح.

كلمات المفاتيح: مقوم تعديل عرض نبض الإخراج , التتبع الأقصى لنقطه الطاقه , مولد متزامن مغناطيسي دائم مرتبط بسلسلة تحويل طاقة الرياح.

Résumé :

Dans ce mémoire, nous étudions la modélisation et la commande d'une génératrice synchrone à aimants permanents associée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite taille en site isolé. Le système proposé débite à travers un redresseur MLI commandé en sortie continue par un algorithme MPPT afin d'obtenir un rendement énergétique maximal. Les résultats des différentes simulations de toute la chaîne de conversion, réalisées sous environnement MATLAB/Simulink, ont permis d'évaluer les performances du système proposé.

Mots clés : Commande MPPT - Eolienne - Génératrice synchrone à aimants permanents - Modélisation - Redresseur MLI.

Abstract:

In this paper, we study the modeling and the control of a synchronous permanent magnet generator associated to a chain of wind energy conversion of small size in isolated site. The proposed system outputs through a PWM rectifier checked up at continuous output by a MPPT algorithm in order to obtain a maximum energetic efficiency. The results of various simulations of all the chain of conversion, carried out under MATLAB/Simulink software, made it possible to evaluate the performances of the proposed system.

Keywords : Commande MPPT - Eolienne - Génératrice synchrone à aimants permanents - Modélisation - Redresseur MLI.

Listes des acronymes et abréviations

Symboles	ACRONYMES	Unité
α	Angle d'ouverture des aimants	rd
δ	Angle de charge	rd
Br	Induction rémanente	Tesla
Be	Induction dans l'entrefer	Tesla
E	Valeur efficace de la Force électromotrice	Volts
μ	Perméabilité du fer	H.m ⁻¹
μ_0	Perméabilité du vide	H.m ⁻¹
Ha	Le champ magnétique de l'aimant	Atr
He	Le champ magnétique d'entrefer	Atr4
ψ	Rendement	
ϕ_t	Vitesse mécanique du rotor	tr/min
ω	Vitesse angulaire	rd/s
ω_e	Vitesse de synchronisme	rd/s
od	Coefficient de dispersion d'axe d	
oq	Coefficient de dispersion d'axe q	
f	Coefficient de frottement visqueux	Nm.s/rd
0	Position électrique du rotor	rd
ϕ_{sd}	Flux magnétisant d'axe d	Wéber
ϕ_{sq}	Flux magnétisant d'axe q	Wéber
ϕ_{msd}	Flux magnétisant statorique d'axe d	Wéber
ϕ_{msq}	Flux magnétisant statorique d'axe q	Wéber
ϕ_{sp}	Flux sous 1 pole	Wéber
ϕ_{pm}	Flux max produit par les aimants	Wéber
I_{MR}	Courant magnétisant rotorique équivalent	Ampère
I_{md}	Courant magnétisant d'axe d	Ampère
I_{mq}	Courant magnétisant d'axe q	Ampère
ρ	La densité volumique de l'air.	Kg/ m ³
V_i	La tension au jeu de barre i.	Volt

m	La masse de l'air.	kg
C_p	Le coefficient de puissance.	Sans unité
P_m	La puissance mécanique de la machine.	<i>Watt</i>
l	Le ratio de vitesse.	Sans unité
K	Le facteur de forme.	
ΔY	Variation de la position de la vanne.	
J	Moment d'inertie de chaque groupe de production	$kg.m^2$
T_m	Couple mécanique de la turbine du machine	$N.m$
T_{em}	Couple électromagnétique de la turbine du machine	$N.m$
Ω	Vitesse de rotation de la turbine	rad/s
P_e	Puissance électrique	W

Abréviations

ZDE	Zone de développement éolien
LTECV	Transition énergétique pour la croissance verte
ER	Energies renouvelables
PD	Production décentralisée
MADA	Machine asynchrone a doublé alimentation
MSAP	Machine synchrone a aimants permanents
HTA	Haute tension A
HTB	Haute tension B

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur les machines synchrones à démarrage direct	2
1.1 : Introduction	2
1.2.1 : Généralités sur les machines synchrones	3
1.2.2 : Fonctionnement machine d'une machine synchrone	4
1.2.3 : Classement des machines synchrones	4
1.3 : Présentation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....	5
1.3.1 : Aperçu historique.....	5
1.3.2 : Principe de fonctionnement de la MSAP	5
1.3.3 : Catégories de la MSAP	6
1.3.4 : Rotors des machines synchrones à aimant permanent	7
1.3.5 : les Avantages et Inconvénients de la MSAP	7
1.3.6 : Les domaines d'application de MSAP	8
1.4 : Problème de démarrage des machines synchrones	9
1.4.1 : Démarrage des machines synchrones à l'aide d'un machine auxiliaire	10
1.4.2 : Démarrage des machines synchrones à l'aide d'une cage d'écureuil	10
1.4.3 : Machine synchrone à réluctance variable à démarrage direct	10
1.4.4 : Machine synchrone à aimants permanent à démarrage direct sur le réseau	11
1.4.5 : Les aimants permanents standards utilisés dans ce type de machines	12
1.4.6 : Aimants en surface.....	12
1.4.7 : Aimants insérés.....	13
1.4.8 : Aimants enterrés	13
1.4.9 : types d'alimentation de ces machines.....	14
1.5 : Conclusion.....	14
Chapitre 2 : Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents à démarrage direct	15
2.1 Introduction	15
2.2 Modèles circuits des machines étudiées.....	15
2.2.1 Hypothèses simplificatrices	16
2.2.2 Equations électriques dans le repère du stator a, b, c	16
2.2.3 Relation entre flux et courants	17
2.2.4 Expressions des inductances en fonction de T.....	17
2.2.5 Flux produit par l'inducteur à aimants dans une phase du stator	19
2.2.6 : Modèles avec variables d'état.....	19
2.3 : Modèle de la machine étudiée dans le référentiel (d-q) de Park	20

2.3.1 : Equations des tensions.....	20
2.3.2 : Expressions des flux en fonction des courants dans le repère (d-q).....	21
2.3.3 : Expression du couple électromagnétique	22
2.4 : Modèle linéaire à inductances de fuites séparées	23
2.4.1 : Séparation des inductances de fuites	23
2.5 : Modèle linéaire de la machine à inductances de fuites totalisées au stator	24
2.5.1 : Expressions des courants magnétisants.....	24
2.5.2 : Expressions des flux	26
2.5.3 : Modèle d'état de la machine avec les flux comme variables	26
2.6 : Modèle saturé de la machine synchrone à aimants à démarrage direct	27
2.6.1 : Prise en compte de la saturation dans les expressions des flux.....	28
2.6.2 : Expression du coefficient de saturation KST	31
2.6.3 : Modèle saturé où les flux sont choisis comme variables d'état.....	32
2.7 : Cas particulier de la machine synchrone à réluctance variable.....	32
2.8 : Cas particulier de la machine asynchrone	33
2.9 : Conclusion.....	33
Chapitre 3 : l'énergie éolienne.....	34
3.1 : Introduction	34
3.2 : Historique.....	34
3.3 : Les énergies renouvelable	36
3.4 : Potentiel d'énergie éolienne en Algérie	37
3.5 : Le gisement éolien	38
3.5.1 : Météorologie de vent	38
3.5.2 : Les différents types du vent	38
3.5.2.1 : Les vents globaux	38
3.5.2.2 : Les vents de surfaces	39
3.5.2.3 : Les vents locaux	39
3.5.3 : Les couches atmosphériques	39
3.5.4 : Les critères de choix des sites	39
3.5.4.1 : La brise de mer et de terre	39
3.5.4.2 : Effet venturi	39
3.5.4.3 : Effet colline	40
3.5.4.4 : La mer et le lacs	40
3.5.5 : Instruments de mesure de la vitesse du vent	40
3.5.5.1 : l'Anémomètre	40
3.5.5.2 : La girouette	41
3.5.5.3 : Logger	41

3.5.6 : La rose des vents	42
3.5.7 : Loi de BETZ	42
3.6 : Système éolienne	44
3.6.1 : Description d'une éolienne	44
3.6.2 : Principale composants d'une éolienne	45
3.6.3 : Principe de fonctionnement	46
3.6.4 : Les différents types d'éoliennes.....	46
3.6.4.1 : Eolienne a axe horizontale	46
3.6.4.1.1 : Avantages et inconvénients	47
3.6.4.2.1 : Les éoliennes Darrieus	47
3.6.4.2 EOLIENNE A AXE VERTICAL	47
3.6.4.2.1 LES EOLIENNE DARRIEUS	47
3.6.4.2.2 : Les Savonius	48
3.6.4.2.3 : Avantages et inconvénients.....	48
3.7 : Classification des tribunes éolienne	49
3.7.1 : Les éoliennes a vitesse fixe	49
3.7.2 : Les éoliennes a vitesse variable	49
3.8 : Avantages et inconvénients des énergies éoliennes	50
3.9 : Application des énergies éoliennes	50
3.10 : Conclusion	51

Chapitre 4 : Modélisation et commande d'une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne

4.1 : INTRODUCTION	52
4.2 : MODELISATION DU GENERATEUR EOLIEN	52
4.2.1 : Modèle de la turbine.....	53
4.2.2 : Modélisation de l'arbre de la machine.....	55
4.2.3 : Modèle de la machine synchrone	55
4.2.4 : Modèle du redresseur MLI	56
4.3 : COMMANDE DU GENERATEUR EOLIEN.....	58
4.3.1 : Stratégie de maximisation de la puissance	58
4.3.2 : Commande de la machine synchrone à aimants permanents	60
4.3.3 : Commande par MLI.....	60
4.3.4 : Régulation des courants.....	60
4.3.5 : Régulation de la tension V_{dc}	61
4.4 : RESULTATS DE SIMULATION	62
4.5 : CONCLUSION.....	64

Liste des figures

Figure I.1 : Différentes classes des machines électriques	2
Figure I.2: machine synchrone a rotor bobiné.	3
FigureI.3. : Classement des machines synchrones.	4
Figure I.4: Stator et rotor de la machine à aimant permanent.	6
Figure I. 5 : Machine synchrone à aimants permanents chapeautés.	6
Figure I. 6 : Machines synchrones à aimants permanents enterrés.	7
Figure 1.7 : Principales applications des machines synchrones à aimants permanents.....	8
Figure I.8 : Principales applications des machines synchrones à aimants permanents.....	9
Figure. I.9 : Rotor d'une machine synchrone à aimants muni d'une cage d'écureuil.	10
Figure 1.10 : Machine synchrone à réluctance variable.....	10
Figure 1.11 : Aimants en surface aimant.....	12
Figure 1.12 : aimants insérés.	13
Figure 1. 13 : Rotor à aimants enterrés.....	13
Figure 2.1 : Représentation symbolique de la machine.	16
Figure 2.2 : inductance propre L_a	17
Figure 2.3 : inductance propre M_{ab}	17
Figure2.4 Modèle équivalent dans le repère (d-q).....	22
Figure 2.5 : Représentation des flux et courants magnétisants dans la machine.	29
Figure 3.1 Les différentes types d'énergies renouvelables.	36
Figure 3.2 Carte de gisement éolienne en Algérie.	37
Figure 3.3 Anémomètre.	40
Figure 3.4 La Girouette.	41
Figure 3.5 Data logger	41
Figure 3.6 La rose de vent.	42
Figure 3.7 Tube de courant autour d'une éolienne.....	42
Figure 3.8 Coefficient de puissance.	44
Figure. 3.9 Système éolienne.	44
Figure. I.10 principales composantes d'une éolienne.....	46
Figure. 3.11 Type Darrieus.	47

Figure. I.13 Type Savonius.	48
Figure. 4.1: Structure du système de conversion éolien	52
Figure. 4.2: Structure du générateur éolien étudié.....	53
Figure. 4.3: Courbe C_p (Ω) de la voilure étudiée de type Savonius.....	54
Figure. 4.4: Caractéristiques P_{eol} (Ω)	54
Figure. 4.5: Caractéristiques C_{eol} (Ω).....	54
Figure. 4.7: Synoptique de la commande du redresseur et de la machine synchrone.....	58
Figure. 4.8: Caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation	59
Figure. 4.9: Boucle de régulation de courant.....	60
Figure.4.10: Modèle pour la boucle de tension	61
Figure. 4.11: Modèle complet en boucle fermée pour la régulation de tension.....	61
Figure. 4.12: Vitesse de vent = f (temps).....	62
Figure. 4.13: Tension redressée = f (temps).....	62
Figure. 4.14: Zoom de la tension redressée	62
Figure. 4.15: Vitesse de vent = f (temps).....	63
Figure. 4.16: Tension redressée = f (temps).....	63
Figure. 4.17: Zoom de la tension redressée	63

Introduction générale

Les énergies renouvelables ou EnR (hydraulique, solaire, éolienne, géothermique,..) ne représentent actuellement qu'environ 20 % de la production mondiale d'électricité ; en excluant l'hydroélectricité, ce taux tombe à 2 % [1]. Dans un contexte de crise énergétique mondiale sous-tendue par l'impératif d'un *développement durable* (problèmes environnementaux, épuisement des ressources fossiles, ...), les défis du futur énergétique nécessiteraient le développement des EnR comme sources de substitution, propres et inépuisables.

A titre indicatif, la Communauté Economique Européenne se donne comme triple objectif à l'horizon 2020 d'augmenter la part des EnR à hauteur de 20 %, de dépolluer de 20 % et d'économiser 20 % d'énergie et ce, grâce à de multiples actions politico- économiques et technologiques concertées.

Dans ce contexte, la filière éolienne représente le créneau à plus forte croissance dans la production d'électricité [2]. Parallèlement au marché de la génération éolienne de forte puissance, se développent de plus en plus des systèmes de petite taille en site isolé. Ces derniers s'adaptent bien aux spécificités de notre pays, l'Algérie [3]. Ce qui justifie quelque peu le choix de cette technologie pour notre présente étude.

En effet, les chaînes de conversion d'énergie associées utilisent souvent un générateur synchrone à aimants permanents [2, 4]. Afin de maximiser l'efficacité de l'aérogénérateur éolien, diverses solutions ont été examinées à différents niveaux de la chaîne de conversion [2]. En ce qui concerne l'interface électronique de puissance entre le générateur et la charge, son rôle est souvent de commander le générateur afin d'extraire le maximum de puissance du vent [2, 5].

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

L'objectif de notre travail est d'étudier Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne.

Chapitre 1 Etat de l'art sur les machines synchrones à aimants permanents

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur les machines synchrones en fonctionnement machine. Nous mettons en évidence les problèmes de démarrage des machines synchrones quand ils sont directement alimentés par le réseau. On s'intéresse dans ce cadre aux machines synchrones à aimants et à réluctance variable à démarrage direct sur le réseau.

Les machines électriques se partagent en différentes classes dont on cite : les machines statiques et les machines tournantes, dans cette dernière on distingue deux familles essentielles des machines tournantes (machines à courant continu et celles à courant alternatif). Dans la classe des machines à courant alternatif, on trouve les machines synchrones et celles asynchrones. Cette classification est montrée dans la figure (I.1).

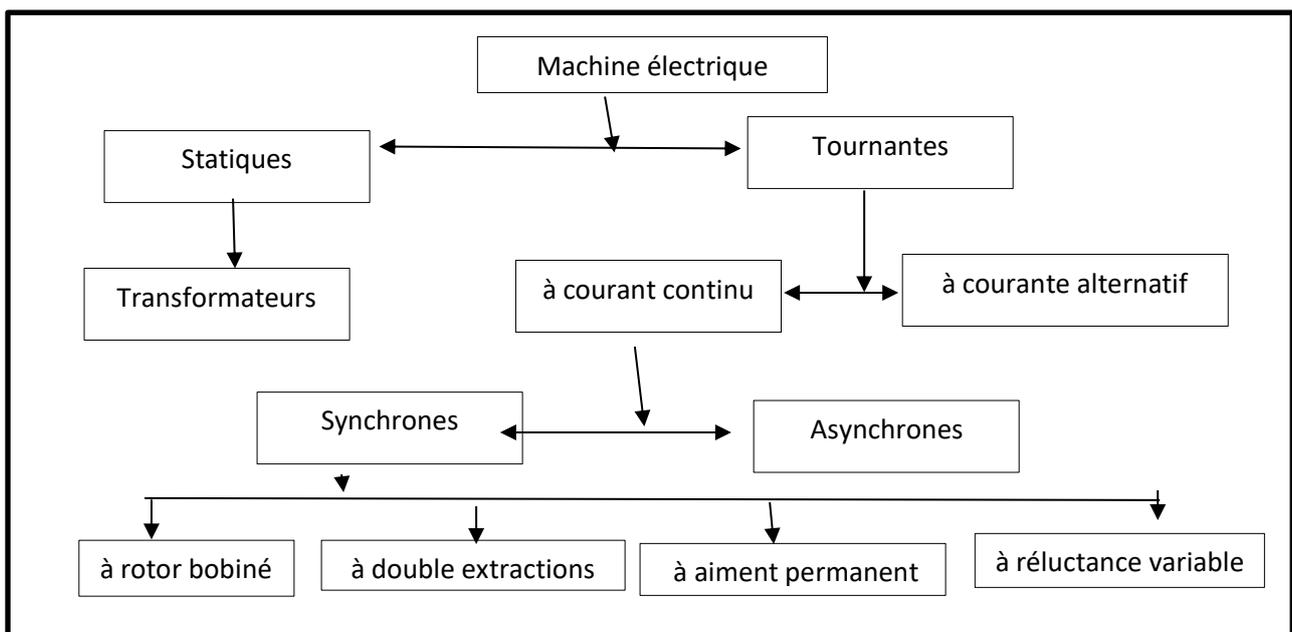


Figure I.1 : Différentes classes des machines électriques

1.2.1 Généralités sur les machines synchrones

Constitution La machine synchrone est une machine à courant alternatif constituée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor), voir Figure (1.2).



Figure 1.2: machine synchrone a rotor bobiné.

La vitesse de rotation de l'arbre de cette machine est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator.

Cette vitesse est liée à la fréquence de la source et comme cette fréquence est constante, la vitesse de la machine est rigoureusement constante. Elle ne varie ni avec la charge, ni avec la tension de la source.

a. Stator :

Le stator de la machine synchrone est similaire à celui d'une machine asynchrone. Le bobinage formé par des enroulements triphasé répartis dans des encoches portées dans un circuit magnétique feuilleté. Ce bobinage constitue l'induit de la machine car il est le siège de forces électromotrices induites par le champ tournant créée par l'inducteur.

b. Rotor :

Le rotor représente en fait l'inducteur, il peut prendre diverses formes car l'excitation peut être produite soit par des aimants montés en surfaces ou enterrés, soit par un bobinage placé dans des encoches ou sur des pôles saillants. Cet enroulement, destiné à être alimenté en continu, constitue l'inducteur de la machine car il sert à créer le champ magnétique qui va balayer les conducteurs de l'induit. Une variante particulière ne comporte aucune excitation au rotor et fonctionne grâce aux variations de réluctance [6, 7].

1. 2.2 Fonctionnement machine d'une machine synchrone

La machine synchrone est réversible ; elle peut fonctionner comme générateur ou comme machine. Lorsqu'on l'utilise comme machine (en la raccordant à une source de tensions triphasées équilibrées de courants de pulsation Ω_s , on l'appelle machine synchrone, le rotor de cette machine tourne en synchronisme avec le champ tournant du stator, c'est-à-dire à la même vitesse que ce champ.

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (1.1)$$

Avec : Ω_s : La vitesse synchrone, p : Pair de pôles.

1.2.3 Classement des machines synchrones

On peut classer l'ensemble des machines synchrones comme l'indique la Figure. 1.3. Les machines sont distinguées par leurs modes d'excitation (bobinages, aimants permanents, etc.) et par leurs rapports de saillance :

$$\frac{L_d}{L_q} = \delta \quad (1.2)$$

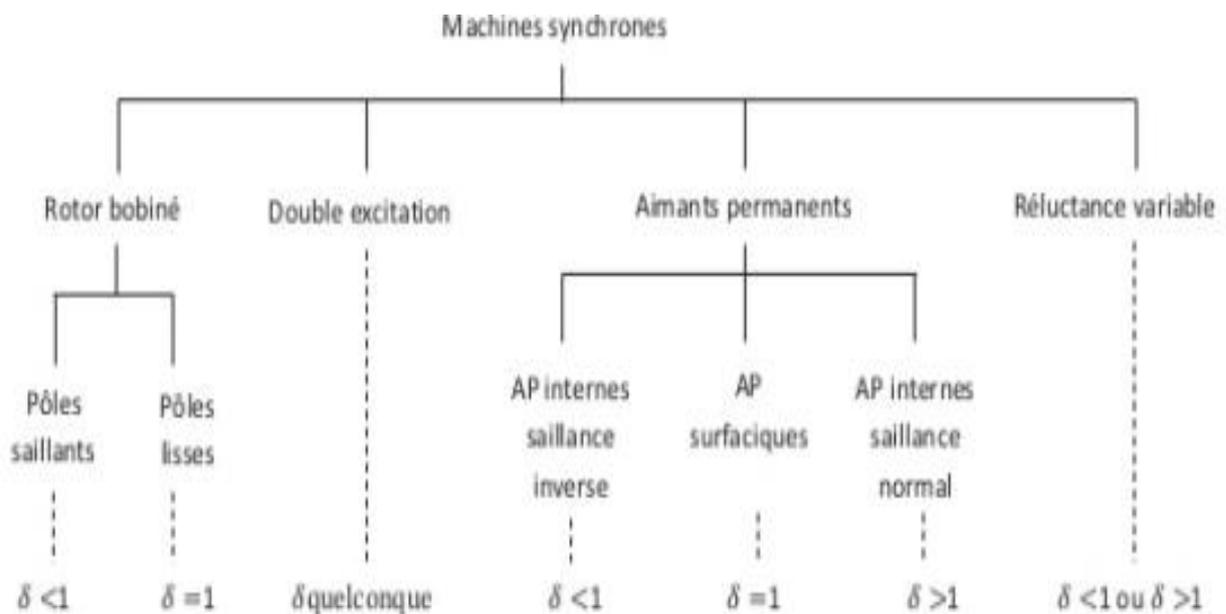


Figure 1.3. : Classement des machines synchrones.

1.3 Présentation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Pendant les années récentes, le machine à courant continue est remplacé par le machine synchrone à aimants permanents dans le milieu industriel. Cependant la présence du système balais collecteur a toujours posé des grands problèmes qui limitent de plus en plus son utilisation.

1.3.1. Aperçu historique

L'aimant doit son origine au latin ADAMAS qui signifie fer, diamant. Les aimants permanents ont vu le jour aux environ 600 ans avant J-C. Mais ce fut au début du ce siècle qu'eut lieu le véritable essor des aimants permanents qui ont pris leur place dans tous les domaines, en particulier dans les machines électriques.

1.3.2 : Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la Position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique

a. Stator : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe

b. Le rotor : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente 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

Il existe deux types de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors à pôles lisses et les rotors à pôles saillants.

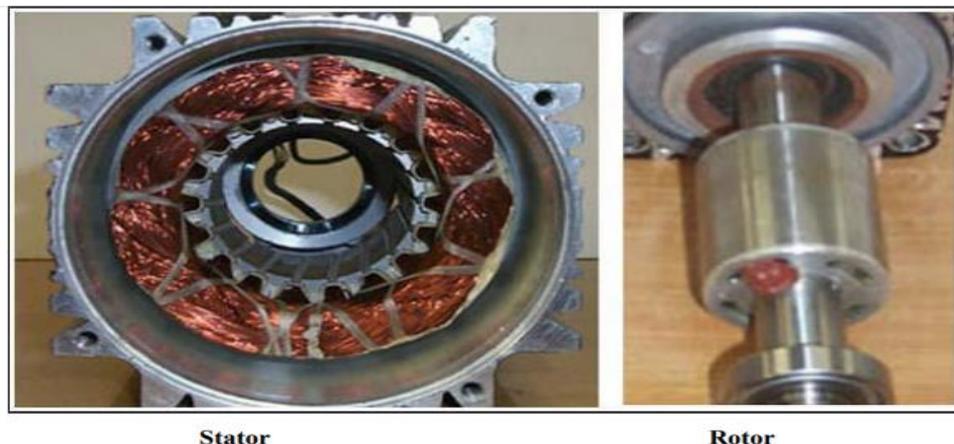


Figure I.4: Stator et rotor de la machine à aimant permanent.

1.3.3 : Catégories de la MSAP

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue construction mécanique :

a. Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAP) : Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés directement sur la périphérie du rotor. Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses.

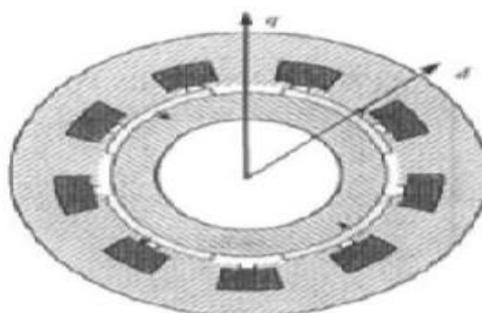


Figure I. 5 : Machine synchrone à aimants permanents chapeautés.

b. Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE) : Le principe de cette structure est d'augmenter l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents. En fait, les pièces polaires canalisent le flux généré par les aimants permanents à aimantation tangentielle dont la surface latérale est supérieure à la demi-surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entrefer

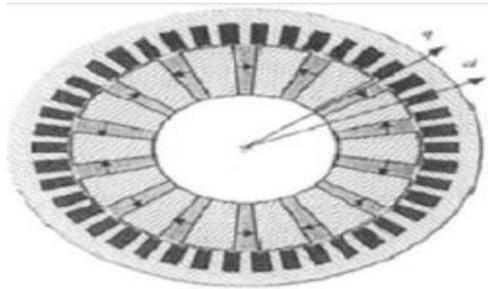


Figure I. 6 : Machines synchrones à aimants permanents enterrés.

1.3.4 : Rotors des machines synchrones à aimant permanent

Les machines à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs configurations rotoriques. Leur classification globale en termes de placement des aimants est la suivante [11] :

- Aimants en surface
- Aimants insérés
- Aimants enterrés
- Aimants à concentration du flux

1.3.5 : les Avantages et Inconvénients de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages et Inconvénients par rapport aux autres types de machines est donne par ce tableau :

Avantages	Inconvénients
-Puissances massiques élevées. -Absence de contacts glissants. -Un bon rendement. -Absence des balais et d'alimentation continue. -Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage. -Fonctionnement en survitesse.	-Technologie coûteuse liée au coût des aimants. -Interaction magnétique due au changement de structure. -Ondulations de couple.

1.1 Tableau : Avantages et les Inconvénients de la MSAP

Cette machine est donc bien indiquée pour les systèmes embarqués et peut être employée pour des systèmes de faible puissance (petites machines) ou de puissance plus importante (jusqu'à quelques dizaines de MW en fonctionnement machine).

1.3.6 : Les domaines d'application de MSAP

Maintenant on présente des exemples d'application des MSAP utilisées dans différentes plages de puissance.

Applications aux petites puissances $p < 600W$	Applications aux moyennes puissances $500W < p < 100kW$	Applications aux fortes puissances
<ul style="list-style-type: none"> -Disque Dur. -Micro Ventilateur. -Fraise de dentiste. -Programmateur Mécanique. 	<ul style="list-style-type: none"> -Vélo à assistance. -Voiture électrique (Toyota Prius). -Machine-outil. -Robot industrie. 	<ul style="list-style-type: none"> -Traction ferroviaire. -Propulsion navale.

1.2 tableau : Les domaines d'application de MSAP.

Voila les exemple de diferents application :

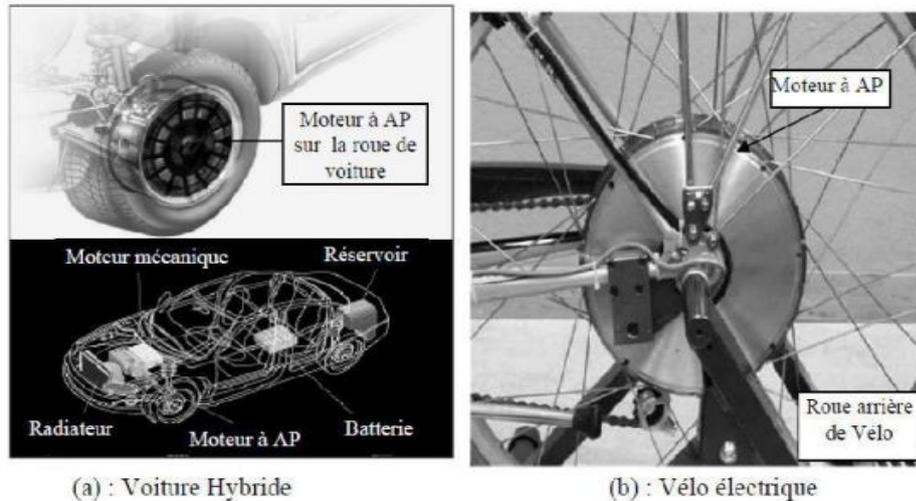


Figure 1.7 : Principales applications des machines synchrones à aimants permanents.



(c): Lecteurs CD/DVD et disque dur de PC

(d) : Lecteur vidéo, VCR

Figure 1.8 : Principales applications des machines synchrones à aimants permanents.

1.4 : Problème de démarrage des machines synchrones

La machine synchrone ne peut pas démarrer seul, car au démarrage, le champ magnétique créé par le courant continu dans l'enroulement d'excitation ou par des aimants est fixe par rapport au rotor. L'interaction de ce champ avec le champ tournant du stator crée un couple qui a une valeur moyenne nulle. Le démarrage autonome d'une machine synchrone alimentée à fréquence fixe n'est pas possible. Pour que la machine développe un couple de valeur moyenne non nulle au démarrage, il faut entraîner le rotor à la vitesse de synchronisme pour qu'il puisse accrocher à la vitesse du champ tournant du stator [8, 7].

Il existe différentes techniques de démarrage pour la machine synchrone. Les machines synchrones de très grande puissance (20MW et plus) sont parfois amenées à leur vitesse de synchronisme à l'aide d'une machine auxiliaire. Dans l'autre cas, soit on utilise un convertisseur électronique à fréquence variable pour accélérer la machine jusqu'à la vitesse synchrone, soit on le démarre comme une machine asynchrone à l'aide d'une cage d'écureuil.

1.4.1 Démarrage des machines synchrones à l'aide d'une machine auxiliaire

Le démarrage de la machine synchrone est effectué en employant une machine asynchrone auxiliaire qui entraîne le rotor (qui est excité soit par des aimants permanents soit par un électro-aimant) jusqu'à la vitesse de synchronisme. La machine auxiliaire doit être suffisamment puissante pour qu'il puisse amener la machine à sa vitesse synchrone. Dès que la machine atteint une vitesse proche de la vitesse de synchronisme, il est branché alors sur le réseau et il se synchronise [8, 7].

1.4.2 : Démarrage des machines synchrones à l'aide d'une cage d'écureuil

Le démarrage se fait en asynchrone, on place une cage d'écureuil sur le rotor de la machine synchrone afin qu'il puisse démarrer en machine asynchrone (Figure. 1.8). En appliquant la pleine tension triphasée sur le stator, on crée un champ tournant qui amène rapidement le machine à une vitesse légèrement inférieure à sa vitesse de synchronisme. En général, la résistance de la cage d'écureuil est assez élevée afin d'assurer un fort couple de démarrage [7 ,9].

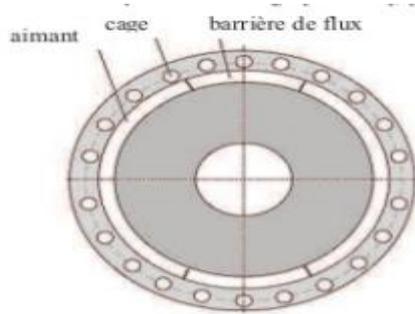


Figure. 1.9 : Rotor d'une machine synchrone à aimants muni d'une cage d'écureuil.

1.4.3 : Machine synchrone à réluctance variable à démarrage direct

La machine synchrone à réluctance variable est structurellement une machine synchrone à pôles saillants dépourvue d'excitation. La forme classique de la machine possède un rotor saillant muni d'une cage d'écureuil, il ne contient ni aimants, ni bobinage d'excitation (voir Figure. 1.9). Le stator a la même structure que celui d'une machine asynchrone. La cage permet d'assurer le démarrage direct sur le réseau et permet d'améliorer la stabilité de fonctionnement au synchronisme (lors d'un à-coup de couple résistant par exemple).

Cette machine présente l'avantage de conserver une vitesse constante en charge jusqu'à une certaine valeur du couple résistant, ce que ne permet pas une machine asynchrone à cause du glissement [10] [11].

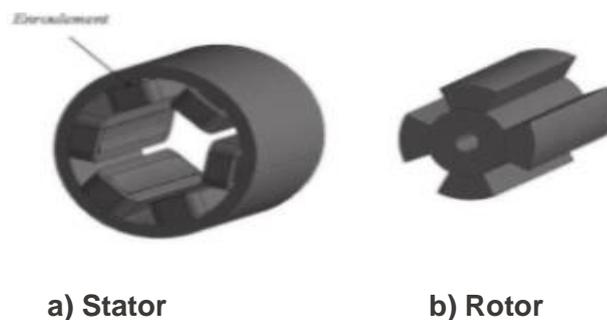


Figure 1.10 : Machine synchrone à réluctance variable.

1.4.4 : Machine synchrone à aimants permanent à démarrage direct sur le réseau

L'idée de combinée la grande efficacité de la machine synchrone à aimants permanents avec la capacité de démarrage de la machine asynchrone date d'avant 1950.

Dans le cas où la vitesse d'une machine électrique doit être constante comme le cas des pompes et des ventilateurs, l'utilisation des machines synchrones avec une capacité de démarrage direct sur le réseau est très intéressante. Cette machine avec auto-démarrage a été utilisée pendant plusieurs décennies. Son rotor est équipé d'une cage d'écurieil est aussi utilisée comme amortisseurs pour améliorer la stabilité de la machine à la phase transitoire. La combinaison de la capacité de l'auto-démarrage comme un machine asynchrone et la synchronisation ensuite avec le champ tournant est généralement connu sous le nom de machines synchrones à démarrage direct sur le réseau ou machines asynchrones synchronisés. Ils sont des machines à induction. Lors de la phase de démarrage, le machine fonctionne en mode asynchrone et lorsqu'il atteint une vitesse proche du synchronisme, il passe en mode synchrone [12 ,13, 14,9].

Cette particularité est obtenue par une construction spéciale du rotor qu'on présentera par la suite.

La machine synchrone à aimants permanent a eu une pénétration limitée dans le marché, probablement en raison d'un certain nombre de facteurs, dont certains sont :

- Le coût supplémentaire de matériau magnétique par rapport machine asynchrone.
- La construction du rotor complexe et donc augmentation du coût de la production
- La conception complexe de la machine, ce qui la rend difficile à optimiser.

Une des principales raisons est sans doute que le marché des machines est assez conservateur et qu'il a peu d'incitation à développer des machines avec rendement élevé [15].

Le rotor contient des aimants permanents et un dispositif de démarrage qui représente une cage constituée par des conducteurs électriques qui fonctionne comme amortisseurs pour produire l'accélération du couple asynchrone pendant la phase de démarrage et assure aussi la stabilité de la machine.

1.4.5 : Les aimants permanents standards utilisés dans ce type de machines

Ils ont été utilisés depuis les premiers jours de l'industrie électrique, mais ce n'est que très récemment que les aimants de terres rares avec de grandes performances deviennent disponibles, avec une densité d'énergie suffisante pour être utilisé dans des applications exigeantes.

a. Les Coûts réduits des aimants et avantages de taille et l'efficacité font PM machines de plus en plus populaire. Les ferrites sont connues pour leur longévité, et la disponibilité de l'ingrédient Fe_2O_3 en tant qu'un dérivé de la fabrication de l'acier ce qui leur donne un prix bas. Leurs principaux inconvénients sont la faible rémanence (0.4T) et faible densité énergétique.

b. Aimants samarium-cobalt ont été mis au point dans les années 1970 et ils ont une densité d'énergie beaucoup plus élevé que les ferrites. Ils peuvent fonctionner dans une plage de Température très large, leurs principaux inconvénients étant le prix élevé et la densité d'énergie plutôt faible rémanence que les Nd-Fe-B aimants.

c. Néodyme-fer-bore aimants ont été développés dans les années 1980 en partie en réponse à la forte augmentation des prix du cobalt à l'époque. Ils ont une densité d'énergie et une meilleure rémanence mais Une température de Curie inférieure à celle de Sm-Co. Protection contre l'humidité est nécessaire à cause de la teneur en néodyme. Ceci est habituellement réalisé par une couche mince d'oxyde métallique Différentes structures de machines synchrones à démarrage direct sont envisageables qui sont surtout liées à l'emplacement des aimants au niveau du rotor. En effet, les aimants peuvent être collés en surface, insérés ou enterrés au rotor.

1.4.6 : Aimants en surface

Ce type de rotor a des aimants en surface avec des conducteurs en anneau qui forme la cage (voir Figure. I.10). La cage est assemblée à l'extérieur du rotor. La machine synchrone est alors dite à pôles lisses car la perméabilité relative des aimants est proche de celle de l'air. Il n'y a donc pas de variation de réluctance du rotor vue du stator. Notant que cette structure donne au machine une robustesse mécanique [12 ,16].

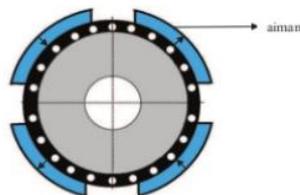


Figure 1.11 : Aimants en surface aimant

1.4.7 : Aimants insérés

Les aimants permanents sont déposés à la surface du rotor, mais ils sont cette fois-ci séparés par des plots magnétiques alors qu'ils étaient séparés par de l'air dans le cas des aimants montés en surface (voir Figure. I.11). L'aimantation des aimants peut être radiale ou tangentielle. L'arc du pôle peut être optimisé en changeant la taille de l'ouverture qui porte les aimants, le flux magnétique est concentré au milieu des pôles magnétiques. Le fer entre les aimants joue le rôle d'un rotor massif pour la machine à induction. La machine est dite à pôles saillants et il est donc possible de profiter du couple reluctant de la machine synchrone. De ce fait, ces machines ont un meilleur couple volumique que les machines avec des aimants montés en surface, mais sont aussi plus lourdes à dimensions égales [12, 17, 16].

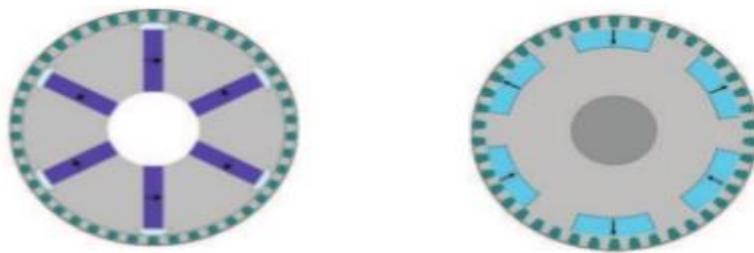


Figure 1.12 : aimants insérés.

1.4.8 : Aimants enterrés

Le rotor est équipé d'aimants à l'intérieur qui peuvent prendre diverses formes (voir Figure. I.13). En agissant sur la hauteur des aimants et sur la surface d'un pôle Magnétique, il est possible d'obtenir une induction magnétique dans l'entrefer plus importante que dans l'aimant. On parle alors de concentration de flux. L'aimantation des aimants pour de telles structures à concentration de flux est ortho-radiale. Par suite, l'induction magnétique dans l'entrefer étant plus grande que dans les aimants. Ce type de structure est à pôles saillants, donc il est possible de profiter aussi du couple reluctante [12, 16].

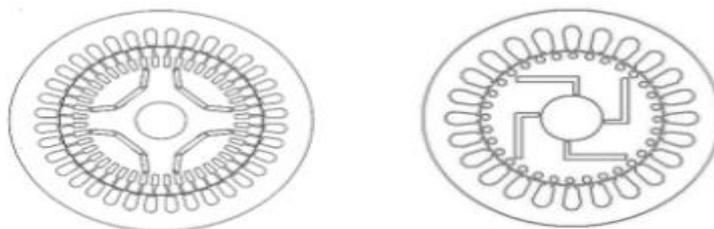


Figure 1.13 : Rotor à aimants enterrés.

1.4.9 : Machines synchrones monophasés à aimants à démarrage direct

Il existe de nombreux documents techniques et des brevets dans le domaine des machines synchrones à démarrage direct dans les deux versions monophasés et triphasés. Qui explique clairement le processus de synchronisation en tenant compte des catégories et de couples agissant pendant le démarrage. Cette machine électrique monophasé est adaptée pour des applications dans les appareils ménagers, tels que les compresseurs de réfrigérateurs.

La construction des machines synchrones à aimants à démarrage direct monophasée permanent est assez similaire à celui des machines triphasées, avec en plus on doit ajouter un condensateur auxiliaire.

Le principal problème dans ce type de machines est leur culasse de rotor relativement étroite de sorte que le volume pour la mise en place des aimants permanents soit très limité, et cela provoque des difficultés supplémentaires dans la conception des machines monophasée synchrones à aimants permanents à démarrage directe [18]

1.5 : Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit des généralités sur la machine synchrone. Nous avons mis l'accent sur le problème de démarrage quand ses machines sont directement alimentées par un réseau à tensions et à fréquence fixes. Nous avons passé en revue différents types de machines synchrones à aimants à démarrage direct qui constituent actuellement parmi les solutions adoptées pour y remédier au problème de démarrage direct des machines synchrones. Dans Le chapitre suivant en va étudier LA Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.

Chapitre 2 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous développons un modèle basé sur la théorie des circuits magnétiquement couplés, pour simuler les fonctionnements en régime transitoires des machines synchrones triphasées à aimants à pôles saillants à démarrage direct. Ce modèle tient compte de la saturation des circuits magnétiques. Ce type de machine comporte au rotor une cage inaccessible, le modèle qu'on développera, sera surtout exprimé avec des paramètres électriques mesurables.

2.2 Modèles circuits des machines étudiées

Le type de machines synchrones étudiées est représenté sur la figure. II.1. Le stator est muni de 3 enroulements repérés a, b et c, décalés de 120 degrés électrique. Le rotor à reluctance variable comporte une cage conductrice que nous représentons par deux enroulements équivalents, répartis selon deux axes : l'axe direct d correspondant à l'axe du faible entrefer et l'axe en quadrature q, perpendiculaire au précédent. Au niveau des encoches rotoriques sont insérés des aimants d'aimantation radiale. Nous plaçons arbitrairement l'axe en quadrature en retard sur l'axe direct par rapport au sens de rotation.

La machine synchrone peut être modélisée par des circuits électriques magnétiquement couplés, à

Paramètres localisés, constitués d'éléments que sont les inductances et les résistances.

La position du rotor par rapport au stator est indiquée par l'angle θ . Cet angle est défini entre l'axe de l'enroulement de la phase a et l'axe polaire d, mesuré positivement dans le sens anti-horaire. P étant le nombre de paires de pôles.

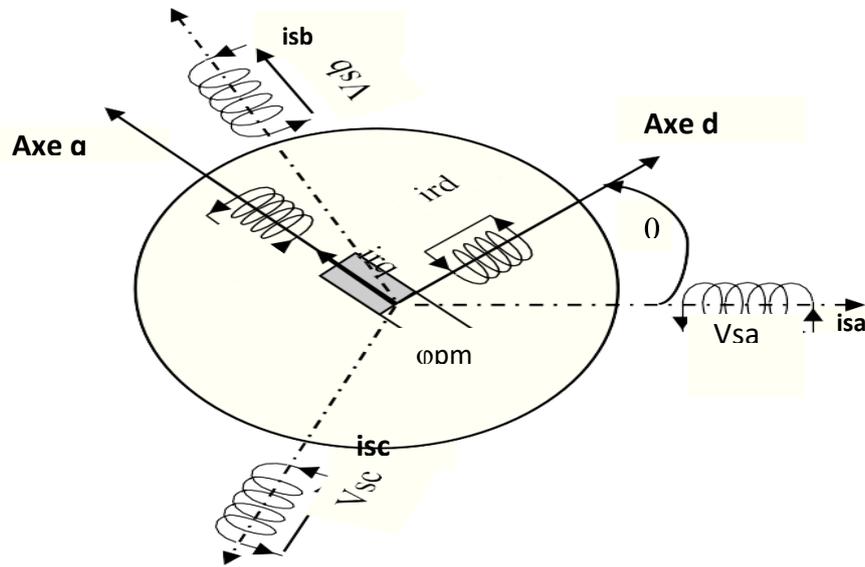


Figure 2.1 : Représentation symbolique de la machine.

2.2.1 Hypothèses simplificatrices

- On considère que les f.é.m. des enroulements statoriques sont à distribution sinusoïdale dans l'espace.
- Le champ produit par les aimants à une distribution sinusoïdale dans l'entrefer
- On néglige l'hystérésis et les courants induits dans les parties conductrices.
- On néglige l'effet de peau (en particulier dans les barres du rotor).
- On néglige le couplage capacitif entre enroulements.
- On néglige l'effet de la température sur les résistances.

2.2.2 Equations électriques dans le repère du stator a, b, c

L'induit est considéré comme récepteur. Cette convention de signe est sans intérêt pour les enroulements représentant la cage. En effet, ceux-ci sont en court-circuit. Dans ces conditions, les équations des tensions de la machine synchrone sont :

a. Pour les phases stator

$$\begin{cases} V_{as} = R_{as} i_{as} + \frac{d\phi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_{bs} i_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_{cs} i_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

b. Pour les circuits rotor

$$\begin{cases} 0 = R_{rd}i_{rd} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_{rq}i_{rq} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \end{cases} \quad (2.2)$$

En regroupant les deux systèmes d'équations, on obtient le système global sous forme matricielle suivant

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & & & & \\ & R_s & & & \\ & & R_s & & \\ & & & R_{dr} & \\ 0 & & & & R_{qr} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.2.3 Relation entre flux et courants

On peut écrire l'expression du flux en régime linéaire, sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) & L_{ard}(\theta) & L_{arq}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_b(\theta) & L_{bc}(\theta) & L_{brd}(\theta) & L_{brq}(\theta) \\ L_{ac}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_c(\theta) & L_{crd}(\theta) & L_{crq}(\theta) \\ L_{ard}(\theta) & L_{brd}(\theta) & L_{crd}(\theta) & L_{rd} & 0 \\ L_{arq}(\theta) & L_{brq}(\theta) & L_{crq}(\theta) & 0 & L_{rq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_{pma} \\ \phi_{pmb} \\ \phi_{pmc} \\ 0 \\ \phi_{pmrq} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2.4 Expressions des inductances en fonction de θ

La présence de la saillance au rotor induit une dépendance des inductances propres stator et mutuelles entre phase stator avec la position. Ces inductances sont évidemment des fonctions périodiques (Voir figures. 2.2 et 2.3), développées en série de Fourier, celles-ci comportent, en principe, des harmoniques d'espace.

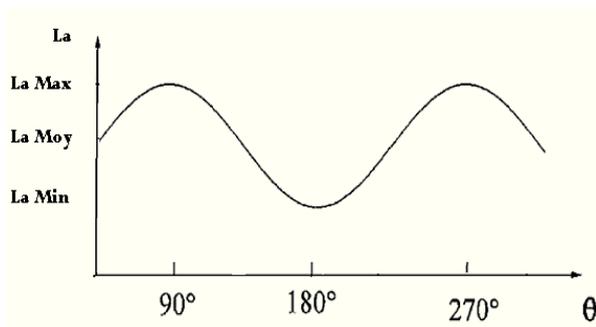


Figure 2.2 : inductance propre L_a

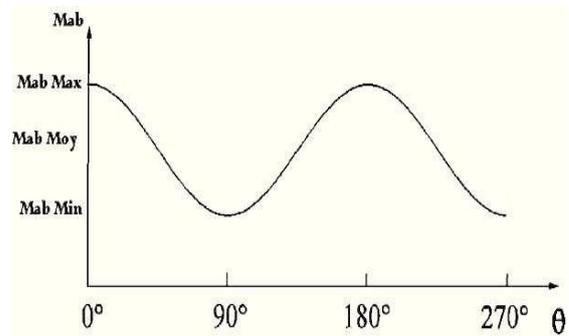


Figure 2.3 : inductance propre M_{ab}

a. Inductance propre

Les inductances propres L_a , L_b et L_c sont des fonctions périodiques de θ , de période π dont les développements en série de Fourier d'harmoniques donnent :

$$\mathbf{L_a = L_a + L_2 \cos 2\theta + L_4 \cos 4\theta} \quad (2.5)$$

On remarque que l'inductance propre peut être décomposée en une composante continue et une somme infinie.

Dans l'hypothèse de la répartition sinusoidale de la force magnétomotrice, les inductances propres et mutuelles relatives à l'induit seul sont la somme d'un terme constant et d'un harmonique de rang 2. En approximation du premier harmonique, nous pouvons donc supposer que pour les trois phases, on obtient alors :

$$\begin{cases} L_a = L_0 + L_2 \cos(2\theta) \\ L_b = L_0 + L_2 \cos(2(\theta - \frac{2\pi}{3})) \\ L_c = L_0 + L_2 \cos(2(\theta + \frac{2\pi}{3})) \end{cases} \quad (2.6)$$

Il est à noter que la self-inductance de la phase statorique est maximale quand l'axe direct coïncide avec l'axe de cette phase ($\theta = 0$). En effet, les lignes de champ trouvent alors le chemin maximal dans le matériau ferromagnétique. Pour la même raison, la self-inductance est minimale quand l'axe en quadrature coïncide avec l'axe de la phase ($\theta = \frac{\pi}{2}$).

b. Inductance mutuelle entre phase stator

$$\begin{cases} M_{ab} = M_0 + M_2 \cos(2(\theta + \frac{2\pi}{3})) \\ M_{bc} = M_0 + M_2 \cos(2\theta) \\ M_{ac} = M_0 + M_2 \cos(2(\theta - \frac{2\pi}{3})) \end{cases} \quad (2.7)$$

Les inductances propres et mutuelles relatives à l'induit seul sont la somme d'un terme constant et d'un harmonique de rang 2. Le coefficient étant le même pour les inductances propres et mutuelles.

On peut définir un rapport entre les coefficients L_0 et M_0 et entre les coefficients L_2 et M_2 dans les équations (2.6 et 2.7) des inductances propres et mutuelles du stator :

$$\frac{M_0}{L_0} = -\frac{1}{2} \quad \frac{M_2}{L_2} = 1 \quad (2.8)$$

c. Inductance mutuelle entre enroulements stator et rotor

Les inductances mutuelles dans (2.4) entre les enroulements statoriques et rotoriques ont comme expressions :

$$\begin{aligned}
 L_{ard}(\theta) &= M_{srd} \cdot \cos(\theta) & L_{arq}(\theta) &= M_{srq} \cdot \sin(\theta) \\
 L_{brd}(\theta) &= M_{srd} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{brq}(\theta) &= M_{srq} \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 L_{crd}(\theta) &= M_{srd} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{crq}(\theta) &= M_{srq} \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

2.2.5 Flux produit par l'inducteur à aimants dans une phase du stator

Nous pouvons définir l'expression du flux par phase comme suit :

$$\varphi_A = \varphi_{Aa} + \varphi_{Ab} + \varphi_{Ac} + \varphi_{pm} \tag{2.10}$$

En supposant que le champ produit par les aimants est à répartition sinusoidale dans l'entrefer, les flux par phase s'écrivent :

$$\varphi_{pm} = \varphi_{max} \cdot \sin p\theta \tag{2.11}$$

Soit φ_{pm} le flux des aimants, φ_{max} est l'amplitude du flux par phase.

Les équations des flux des aimants dans le repère a, b, c du stator s'exprime :

$$[\varphi_{pm}]_{abc} = \varphi_{max} \cdot \begin{cases} \sin(\theta) \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \tag{2.12}$$

2.2.6 Modèles avec variables d'état.

En choisissant les courants de phases comme variables d'état et en remplaçant (2.4) dans (2.3), on aboutit au système d'équations suivant :

$$\frac{d(i)}{dt} = L^{-1}(\theta) \left[v - Ri - \omega \cdot \frac{d}{dt} \cdot L(\theta) \cdot i \right] \tag{2.13}$$

Le système, ainsi obtenu, est non linéaire ($L(\theta)$) et sa résolution numérique est assez lourde du fait de la nécessité d'inversion de la matrice inductance à chaque pas d'intégration, le problème est simplifié en adoptant la transformation de Park.

2.3 Modèle de la machine étudiée dans le référentiel (d-q) de Park

Le modèle circuit de la machine dans le repère du stator a, b, c défini précédemment nous montre que la plupart des grandeurs dépendant de l'angle θ , ainsi que l'ordre élevé du système, qui présente des difficultés pour la résolution.

Donc, pour éliminer la dépendance de l'angle θ et d'abaisser l'ordre du système, nous exploitons la transformation de Park qui permet d'éliminer la dépendance vis-à-vis de θ et de baisser l'ordre du système.

La matrice de Park normée s'écrit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{2/3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Avec :

$$[p(\theta)]^{-1} = [p(\theta)]^t \quad (2.15)$$

Toutes les grandeurs électriques triphasées sont projetées sur le repère lié au rotor par la transformation de Park, nous écrivons alors dans le cas général :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [p(\theta)]^t \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

2.3.1 Equations des tensions

En appliquant la transformée de Park sur le système (2.1), on aura :

$$[U_{S_{dq}}] = [P(\theta)] \cdot [R_s] \cdot [i_{S_{abc}}] + [P(\theta)] \cdot \frac{d[\varphi_{S_{abc}}]}{dt} \quad (2.17)$$

$$[U_{S_{dq}}] = [P(\theta)] \cdot [R_s] \cdot [p(\theta)]^{-1} \cdot [i_{S_{dq}}] + [P(\theta)] \cdot [L] \cdot [p(\theta)]^{-1} \frac{d[i_{S_{dq}}]}{dt} + [P(\theta)] \cdot \frac{d[p(\theta)]^{-1}}{dt} \cdot [\varphi_{S_{dq}}] \quad (2.18)$$

Sachant que :

$$[p(\theta)]^{-1} \cdot [p(\theta)] = \mathbf{1} \quad (2.19)$$

Dans l'équation (2.18) et après calcul, on trouve :

$$[\mathbf{p}(\theta)] \cdot \left(\frac{d[\mathbf{p}(\theta)]^{-1}}{dt} \right) = \frac{d\theta}{dt} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

La transformée de Park appliquée au flux des aimants donne :

$$|\varphi_{pm}|_{dq} = [\mathbf{p}(\theta)] \cdot |\varphi_{pm}|_{abc} \quad (2.21)$$

Les flux des aimants dans le repère $(d-q)$ de Park deviennent :

$$\begin{cases} \varphi_{pmd} = 0 \\ \varphi_{pmq} = \sqrt{3/2} \cdot \varphi_{max} \end{cases} \quad (2.22)$$

On retrouve la même chose pour les flux des aimants dans le rotor $P_m = P_{md} = P_{mrd} = \text{Cte}$.

Les équations des tensions statoriques dans le nouveau repère s'écrivent :

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_c \cdot \varphi_{sq} \\ U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_c \cdot \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.23)$$

Dans les nouvelles expressions (2.23) on voit apparaître les termes $(-\omega_c \cdot \varphi_{qs}$ et $+\omega_c \cdot \varphi_{ds})$ qui représente les fem de rotation.

De la même façon, on peut obtenir les équations des tensions rotoriques, (les enroulements équivalents sont en court-circuit, donc les tensions à ces bornes sont nulles) :

$$\begin{cases} 0 = R_{rd} \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \\ 0 = R_{rq} \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \end{cases} \quad (2.24)$$

2.3.2 . Expressions des flux en fonction des courants dans le repère $(d-q)$

En appliquant la transformation de Park aux équations (2.4), la matrice d'inductances est obtenue en reliant le vecteur des flux au vecteur des courants en ajoutant le vecteur des flux des aimants permanents, après calculs on obtient :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_d & 0 \\ 0 & L_d & 0 & M_q \\ M_d & 0 & L_{rd} & 0 \\ 0 & M_q & 0 & L_{rq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \varphi_{pm} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Les flux totalisés au rotor et au stator d'axes d et q ont comme expression :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_d \cdot i_{sd} + M_d \cdot i_{rd} \\ \Phi_{qs} = L_q \cdot i_{sq} + M_q \cdot i_{rq} + \varphi_{pm} \\ \Phi_{dr} = L_{rd} \cdot i_{rd} + M_d \cdot i_{sd} \\ \Phi_{rd} = L_{rq} \cdot i_{rq} + M_q \cdot i_{sq} + \varphi_{pm} \end{cases} \quad (2.26)$$

Notant que L_d, L_q sont respectivement l'inductance synchrone longitudinale et l'inductance synchrone transversale, et L_h est l'inductance homopolaire, qui ont comme expression :

$$\begin{cases} L_d = L_0 + \frac{1}{2}L_2 + M_0 + M_2 \\ L_q = L_0 - \frac{1}{2}L_2 - M_0 - M_2 \\ L_h = L_0 - M_0 \end{cases} \quad (2.27)$$

Le modèle électrique équivalent de la machine dans le repère (d, q) lié au rotor est représenté sur la figure (2.4) :

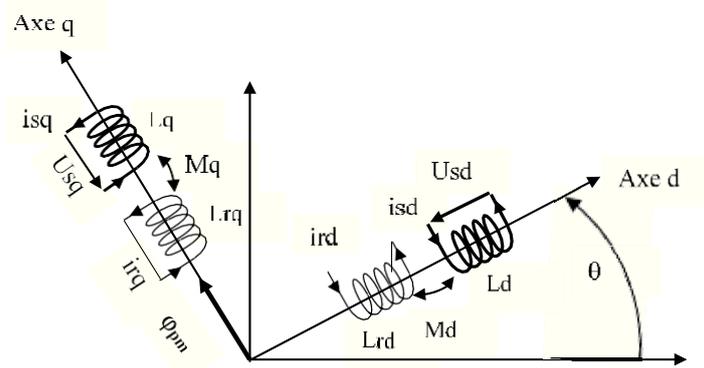


Figure 2.4 Modèle équivalent dans le repère $(d-q)$.

2.3.3. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les F_{mm} dans l'entrefer généré par les courants statoriques. Il s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} T_{em} = \frac{1[i_{dqh}]^t}{2} \cdot [p]^t \cdot \frac{\partial [L]}{\partial \theta_e} \cdot [i_{dqh}] \\ = \frac{1[i_{dqh}]^t}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [i_{dqh}] \\ = p \cdot ((L_d - L_q) \cdot i_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{pm} \cdot i_{sd}) \end{cases} \quad (2.28)$$

On obtient l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux et courant statoriques des axes d et q :

$$T_{em} = p \cdot (\varphi_{sd} \cdot i_{sd} - \varphi_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (2.29)$$

On peut définir la relation fondamentale de la dynamique des systèmes en rotation comme suit :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = T_{em} - T_r \quad (2.30)$$

Où :

- Ω : représente la vitesse de rotation du rotor,
- J : représente le moment d'inertie du système,
- f : représente le coefficient de frottements visqueux,
- T_{em} : représente le couple électromagnétique,
- T_r : représente le couple résistant.

2.4 Modèle linéaire à inductances de fuites séparées

Nous développons un modèle linéaire pour la machine synchrone à aimants permanents à démarrage direct en ne faisant apparaître que des paramètres mesurables.

2.4.1 Séparation des inductances de fuites

Les inductances propres des enroulements statoriques et rotoriques peuvent être décomposées en deux termes, un terme qui représente les fuites magnétiques et l'autre terme représentant le flux commun (inductance mutuelle) :

$$\begin{cases} L_d = I_s + M_d \\ L_q = I_s + M_q \end{cases} \quad \begin{cases} L_{rd} = I_{rd} + M_d \\ L_{rq} = I_{rq} + M_q \end{cases} \quad (2.31)$$

Dans ces équations, l_s , l_{rd} et l_{rq} représentent respectivement l'inductance de fuites d'un enroulement statorique, l'inductance de fuites de l'enroulement rotorique d'axe d et les inductances de fuites de l'enroulement rotorique d'axe q .

Nous pouvons alors, écrire les expressions (2.26) des flux totaux statoriques et rotoriques de la machine de la façon suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = I_s \cdot i_{sd} + M_d \cdot (i_{sd} + i_{rd}) \\ \varphi_{sq} = I_s \cdot i_{sq} + M_q \cdot (i_{sq} + i_{rq}) + \varphi_{pm} \\ \varphi_{rd} = I_{rd} \cdot i_{rd} + M_d \cdot (i_{sd} + i_{rd}) \\ \varphi_{rq} = I_{rq} \cdot i_{rq} + M_q \cdot (i_{sq} + i_{rq}) + \varphi_{pm} \end{cases} \quad (2.32)$$

On peut définir les flux magnétisants des axes d et q qui sont fonction des courants magnétisants I_{md} et I_{mq} . Ils sont des flux communs entre les enroulements statorique et rotorique, leurs expressions sont définies

comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{md} = M_d \cdot i_{md} \\ \varphi_{mq} = M_q \cdot i_{mq} + \varphi_{pm} \end{cases} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} I_{md} = I_{sd} + I_{rd} \\ I_{mq} = I_{sq} + I_{rq} \end{cases} \quad (2.33)$$

2.5 Modèle linéaire de la machine à inductances de fuites totalisées au stator

Dans le cas d'une machine à cage d'écureuil, les paramètres du rotor R_r et L_r et le paramètre de couplage M ne sont pas mesurables directement puisqu'aucune connexion n'est possible sur ce rotor. Il est donc intéressant de réécrire les équations en utilisant des grandeurs accessibles par l'expérimentation [6].

2.5.1 Expressions des courants magnétisants

A partir des équations de Park développées précédemment, on peut obtenir les courants magnétisants rotoriques des axes d et q en divisant les expressions des flux rotoriques des équations (2.32) par M_d et M_q respectivement :

$$\begin{cases} I_{mrd} = I_{sd} + \frac{L_{rd}}{M_d} \cdot i_{rd} \\ I_{mrq} = I_{sq} + \frac{L_{rq}}{M_q} \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (2.35)$$

On peut obtenir les courants rotoriques i_{rd} et i_{rq} à partir de ces deux expressions précédentes :

$$\begin{cases} i_{rd} = (I_{mrd} - I_{sd}) \cdot \frac{M_{rd}}{L_d} \\ i_{rq} = (I_{mrq} - I_{sq}) \cdot \frac{M_{rq}}{L_q} \end{cases} \quad (2.36)$$

De la même façon, les flux rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = M_d \cdot i_{mrd} \\ \varphi_{mrq} = M_q \cdot i_{mrq} + \varphi_{prm} \end{cases} \quad (2.37)$$

Les termes $(\sigma_d \cdot L_d \cdot i_{sd}$ et $\sigma_q \cdot L_q \cdot i_{sq})$ qui apparaissent dans l'équation (2.35) représentent respectivement les fuites magnétiques totalisées au stator et les termes $(L_d \cdot (1 - \sigma_d)$ et $L_q \cdot (1 - \sigma_q))$ les flux commun stator-rotor (ou flux magnétisant) vu par les enroulements statoriques.

On peut exprimer les flux magnétisants statoriques des axes d et q en fonction des courants magnétisants I_{mrd} et I_{mrq} :

$$\begin{cases} \varphi_{msd} = L_d \cdot (1 - \sigma_d) \cdot I_{mrd} \\ \varphi_{msq} = L_q \cdot (1 - \sigma_q) \cdot I_{mrq} \end{cases} \quad (2.38)$$

Les flux statoriques des équations (2.35) s'écrivent alors :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \sigma_d \cdot L_d \cdot i_{sd} + \varphi_{msd} \\ \varphi_{sq} = \sigma_q \cdot L_q \cdot i_{sq} + \varphi_{msq} + \varphi_{pm} \end{cases} \quad (2.39)$$

Pour la suite, nous supposons que les termes $(\sigma_d \cdot L_d$ et $\sigma_q \cdot L_q)$ qui représente les inductances de fuites totalisées au stator sont indépendants de la saturation. En effet, les fuites magnétiques correspondent à des lignes de champ traversant une grande partie d'air (encoches) et sont par conséquent peu affectées par la saturation [LUB 03].

On exprime les termes $(\sigma_d \cdot L_d$ et $\sigma_q \cdot L_q)$ en fonction de l'inductance de fuites statoriques L_s et des inductances de fuites rotoriques L_{rd} et L_{rq} on aura :

$$\begin{cases} \sigma_d \cdot L_d = L_s + \left(\frac{M_d}{L_{rd}}\right) \cdot I_{rd} \\ \sigma_q \cdot L_q = L_s + \left(\frac{M_q}{L_{rq}}\right) \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (2.40)$$

On suppose pour la suite que les inductances de fuites statoriques et rotoriques $(L_s, I_{rd}$ et $I_{rq})$ sont indépendantes de la saturation. Les inductances de fuites totalisées au stator seront indépendantes de la saturation si les rapports $\left(\frac{M_d}{L_{rd}}\right)$ et $\left(\frac{M_q}{L_{rq}}\right)$ qui apparaissent dans les équations précédentes sont constants.

En utilisant les expressions des coefficients de dispersion σ_d et σ_q , on peut obtenir une relation entre les flux rotoriques (2.37) en fonction des flux magnétisants statoriques (2.38) on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(\frac{L_{rd}}{M_d}\right) \cdot \varphi_{msd} \\ \varphi_{rq} = \left(\frac{L_{rq}}{M_q}\right) \cdot \varphi_{msq} \end{cases} \quad (2.41)$$

2.5.2 Modèle d'état de la machine avec les flux comme variables

Pour pouvoir effectuer la simulation en régime linéaire, nous présentons un modèle où les flux sont choisis comme variables d'état. Le vecteur d'état est composé des flux totaux statoriques et des flux magnétisants statoriques, il est donné par :

$$X = |\varphi_{sd} \ \varphi_{sq} \ \varphi_{msd} \ \varphi_{msq}| \quad (2.42)$$

Des équations (2.39), on fait ressortir les courants statoriques i_{sd} et i_{sq} :

$$\begin{cases} i_{sd} = 1/\sigma_d \cdot L_d \cdot (\varphi_{sd} - \varphi_{msd}) \\ i_{sq} = 1/\sigma_q \cdot L_q \cdot (\varphi_{sq} - \varphi_{msq} - \varphi_{pm}) \end{cases} \quad (2.43)$$

Il suffit donc de remplacer ces deux relations précédentes dans les expressions des tensions statoriques (2.23) pour obtenir les deux premières équations d'état du modèle :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = U_{sd} - R_s/\sigma_d \cdot L_d \cdot (\varphi_{sd} - \varphi_{msd}) + \omega_e \cdot \varphi_{sq} \\ \frac{d\varphi_{sq}}{dt} = U_{sq} - R_s/\sigma_q \cdot L_q \cdot (\varphi_{sq} - \varphi_{msq} - \varphi_{pm}) + \omega_e \cdot \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.44)$$

Pour trouver les équations d'état des flux magnétisants, on remplace les équations des flux rotoriques (II.43) dans les équations des tensions rotoriques (2.25) :

$$\begin{cases} 0 = R_{rd} \cdot i_{rd} \cdot \left(\frac{M_d}{L_{rd}}\right) + \frac{\varphi_{msd}}{dt} \\ 0 = R_{rq} \cdot i_{rq} \cdot \left(\frac{M_q}{L_{rq}}\right) + \frac{\varphi_{msq}}{dt} \end{cases} \quad (2.45)$$

On peut obtenir l'expression des courants magnétisants rotoriques i_{rd} et i_{rq} à partir des relations (II.38) des flux magnétisants statoriques φ_{msd} et φ_{msq} :

$$\begin{cases} I_{msd} = \frac{1}{L_d \cdot (1 - \sigma_d)} \cdot \varphi_{msd} \\ I_{msq} = \frac{1}{L_q \cdot (1 - \sigma_q)} \cdot \varphi_{msq} \end{cases} \quad (2.46)$$

On obtient aussi les expressions des courants rotoriques i_{rd} et i_{rq} à partir des équations (2.34) des courants magnétisants rotoriques des axes d et q :

$$\begin{cases} i_{rd} = (I_{mrd} - i_{rd}) \cdot \frac{M_d}{L_{rd}} \\ i_{rq} = (I_{mrq} - i_{rq}) \cdot \frac{M_q}{L_{rq}} \end{cases} \quad (2.47)$$

On remplace les expressions des courants rotoriques i_{rd} et i_{rq} dans (2.45), on trouve :

$$\begin{cases} 0 = R_{rd} \cdot (I_{mrd} - i_{rd}) \cdot \left(\frac{M_d}{L_{rd}}\right)^2 + \frac{\varphi_{msd}}{dt} \\ 0 = R_{rq} \cdot (I_{mrq} - i_{rq}) \cdot \left(\frac{M_q}{L_{rq}}\right)^2 + \frac{\varphi_{msq}}{dt} \end{cases} \quad (2.48)$$

On définit T_{rd} , T_{rq} comme les constantes du temps rotorique des axes d et q respectivement, leurs expressions sont les suivants :

$$\begin{cases} T_{rd} = \frac{L_{rd}}{R_{rd}} \\ T_{rq} = \frac{L_{rq}}{R_{rq}} \end{cases} \quad (2.49)$$

Enfin, on obtient :

$$\begin{cases} 0 = \frac{(I_{mrd} - i_{rd})}{T_{rd}} \cdot \left(\frac{M_d}{L_{rd}}\right)^2 + \frac{d\varphi_{msd}}{dt} \\ 0 = \frac{(I_{mrq} - i_{rq})}{T_{rq}} \cdot \left(\frac{M_q}{L_{rq}}\right)^2 + \frac{d\varphi_{msq}}{dt} \end{cases} \quad (2.50)$$

On exprime les expressions des courants rotoriques (2.50) en fonction des coefficients de dispersion de Blondel :

$$\begin{cases} 0 = \frac{(I_{mrd} - i_{rd})}{T_{rd}} \cdot (1 - \sigma_d) \cdot L_d + \frac{d\varphi_{msd}}{dt} \\ 0 = \frac{(I_{mrq} - i_{rq})}{T_{rq}} \cdot (1 - \sigma_q) \cdot L_q + \frac{d\varphi_{msq}}{dt} \end{cases} \quad (2.51)$$

Il suffit maintenant de remplacer les expressions des courants statoriques (2.43) et les expressions des courants de magnétisation rotoriques (2.46) dans le système (2.51) pour obtenir les deux autres équations d'état, celles des flux magnétisants :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{msd}}{dt} = -\frac{1}{T_{rd}} \varphi_{msd} + \frac{(1-\sigma_d)}{T_{rd} \cdot \sigma_d} \cdot (\varphi_{sd} - \varphi_{msd}) \\ \frac{d\varphi_{msq}}{dt} = -\frac{1}{T_{rq}} \varphi_{msq} + \frac{(1-\sigma_q)}{T_{rq} \cdot \sigma_q} \cdot (\varphi_{sq} - \varphi_{msq} - \varphi_{pm}) \end{cases} \quad (2.52)$$

2.6 Modèle saturé de la machine synchrone à aimants à démarrage direct

La saturation affecte les matériaux magnétiques. C'est un phénomène physique local. Dans les machines électriques, la saturation apparaît surtout dans les régions où l'induction magnétique est la plus intense. Elle affecte habituellement les dents statoriques et rotoriques mais également les épanouissements polaires pour les machines à réluctance variable. La saturation magnétique se traduit donc par une diminution de la perméabilité des parties magnétiques.

Pour tenir compte de la saturation dans un modèle basé sur la théorie des circuits, on considère son effet sur les grandeurs globales mesurables telles que les courants ou les flux magnétiques. Ainsi, les inductances et mutuelles qui sont considérées constantes dans un modèle linéaire seront fonction des courants circulants dans les enroulements de la machine.

La démarche qui sera adoptée dans notre travail consiste à modifier le modèle linéaire développé dans le repère de Park.

On note que l'hypothèse du premier harmonique est toujours conservée. De plus, la machine est toujours couplée en étoile à neutre isolé annulant ainsi la composante homopolaire du courant statorique.

2.6.1 Prise en compte de la saturation dans les expressions des flux

Les inductances de fuites sont considérées constantes. En effet, les flux de fuites correspondant à ces inductances traversent des parties situées dans l'air comme les têtes de bobines et les encoches.

Alors seules les inductances représentant les flux circulant dans les circuits magnétiques statoriques ou rotoriques sont affectées par la saturation. Ainsi, ces flux sont des fonctions non linéaires avec les courants magnétisants.

En observant les expressions des flux statoriques (2.39) et des flux rotoriques (2.40), on note que les termes σ_d, L_d, i_{sd} et σ_q, L_q, i_{sq} correspondent aux flux de fuites. Donc, seuls les flux magnétisants (2.38) peuvent être affectés par la saturation. Pour tenir compte de la saturation dans le modèle développé, il suffit donc de réécrire les expressions des flux magnétisants sous la forme :

$$\begin{cases} \varphi_{msd} = K_{STd}(I_{mrd} \cdot I_{mrq}) \cdot I_d \cdot (1 - \sigma_d) \cdot I_{mrd} \\ \varphi_{msq} = K_{STq}(I_{mrd} \cdot I_{mrq}) \cdot I_q \cdot (1 - \sigma_q) \cdot I_{mrq} \end{cases} \quad (2.53)$$

Où :

$K_{STd}(I_{mrd} \cdot I_{mrq}), K_{STq}(I_{mrd} \cdot I_{mrq})$ sont des coefficients dépendant des courants de magnétisation I_{mrd}, I_{mrq} qui expriment la non linéarité entre ces courants et les flux magnétisants φ_{msd} et φ_{msq} . Pour la machine synchrone à aimants à démarrage direct étudiée, on a défini un coefficient de saturation pour chaque axe. Ainsi, comme montré sur la figure 2.5, le vecteur flux $\varphi_{ms}(\varphi_{msd}, \varphi_{msq})$ et le vecteur courant $I_{ms}(I_{msd}, I_{msq})$ ne sont pas colinéaires.

Pour éviter d'utiliser deux coefficients de saturation, il est possible de définir une transformation mathématique qui permet de rendre colinéaire les deux vecteurs courants magnétisant rotorique et flux magnétisant statorique. On obtient alors une machine équivalente à pôles lisses.

La figure traduit les relations (II.34) entre les flux et les courants magnétisants suivant les deux axes.

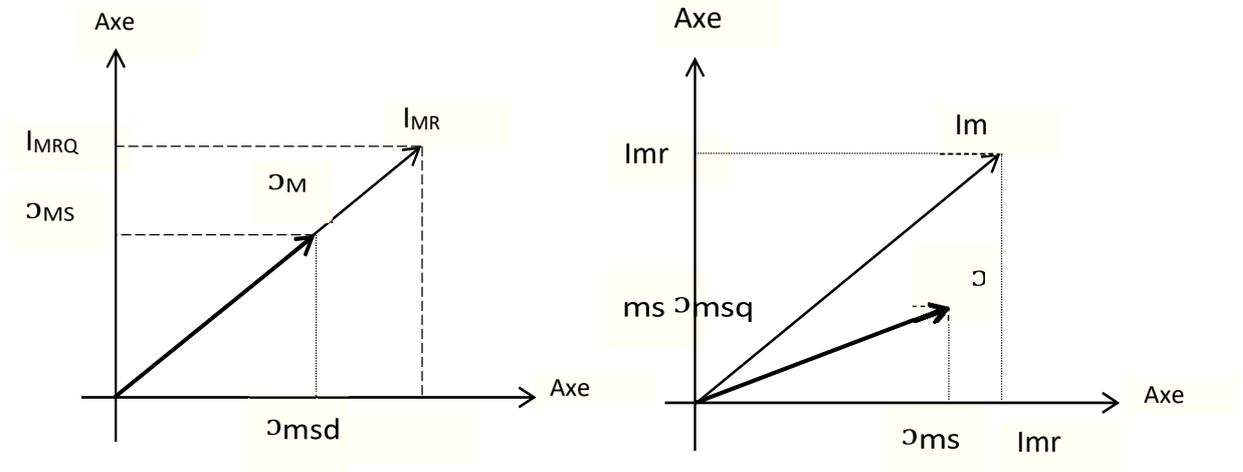


Figure 2.5 : Représentation des flux et courants magnétisants dans la machine.

La machine à pôles lisses équivalente permet d'utiliser un seul coefficient de saturation. En effet, pour ce type de machines le vecteur flux magnétisant statorique φ_{ms} et le vecteur courant magnétisant rotorique I_{mr} soient colinéaires. Il faut donc trouver un vecteur flux magnétisant équivalent qu'on appellera φ_{MS} et un vecteur courant magnétisant rotorique I_{MR} comme c'est indiqué dans la partie a sur la Figure. 2.5.

Pour la suite, on considère le rapport :

$$\frac{\varphi_{MS}}{I_{MR}} = L_d \cdot (1 - \sigma_d) \quad (2.54)$$

Ainsi, on prendra le terme $L_d \cdot (1 - \sigma_d)$ comme étant le rapport entre le flux et le courant magnétisant équivalent, on introduit une transformation mathématique pour l'axe q en gardant la caractéristique magnétique d'axe d , On introduit deux coefficients k et k' tels que :

$$\begin{pmatrix} I_{MRD} \\ I_{MRQ} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{mrd} \\ I_{mrq} \end{pmatrix} \quad (2.55)$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{MSD} \\ \varphi_{MSQ} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & K' \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_{mrd} \\ \varphi_{mrq} \end{pmatrix} \quad (2.56)$$

A partir de cette transformation, on peut constater que les grandeurs suivant l'axe d sont conservées de (2.55) et (2.56), nous obtenons :

$$\begin{pmatrix} I_{MRD} = I_{mrd} & \varphi_{MRD} = \varphi_{mrd} \\ \varphi_{MRQ} = k \cdot I_{mrq} & \varphi_{MSQ} = k' \cdot I_{msq} \end{pmatrix} \quad (2.57)$$

On constate qu'on peut définir une relation entre ces deux coefficients à partir de la figure. 2.3 - (a).

$$\begin{cases} \varphi_{msd} = L_d \cdot (1 - \sigma_d) \cdot I_{mrd} \\ \varphi_{MSQ} = L_d \cdot (1 - \sigma_d) \cdot I_{MRQ} \end{cases} \Leftrightarrow \varphi_{MS} = L_d \cdot (1 - \sigma_d) \cdot I_{MR} \quad (2.58)$$

A partir des équations (2.55) et (2.56), on introduit la valeur de flux et courant magnétisant équivalent, on obtient alors la relation suivante :

$$k' \cdot I_{msq} = L_d \cdot (1 - \sigma_d) \cdot k \cdot I_{mrq} \quad (2.59)$$

On remplace les équations (2.46) dans la relation précédente, on obtient le rapport suivant :

$$\frac{k}{k'} = \frac{L_q \cdot (1 - \sigma_d)}{L_d \cdot (1 - \sigma_d)} \quad (2.60)$$

L'expression de l'énergie magnétique dans l'entrefer de la machine à pôles saillants est la suivante :

$$W_{emps} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{msd} \cdot I_{mrd} + \varphi_{msq} \cdot I_{mrq}) \quad (2.61)$$

L'expression de l'énergie magnétique pour la machine à pôles lisses équivalente, et après changement de variable, sera :

$$W_{empl} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{msd} \cdot I_{mrd} + \varphi_{MSQ} \cdot I_{MRQ}) \quad (2.62)$$

L'égalité ($W_{emps} = W_{empl}$) permet de noter que la machine à pôles lisses équivalente est physiquement identique à la machine à pôles saillants.

Alors de cette égalité, on établit une nouvelle relation entre les coefficients k et k' :

$$\varphi_{msd} \cdot I_{mrd} = \varphi_{MSQ} \cdot I_{MRQ} \quad \Rightarrow k \cdot k' = 1 \quad (2.63)$$

Finalement, on peut définir un seul coefficient noté K_s qu'on appelle le coefficient de saillance de la machine :

$$k_s = k_1 = \sqrt{\frac{L_q \cdot (1 - \sigma_d)}{L_d \cdot (1 - \sigma_d)}} \quad (2.64)$$

Avec la colinéarité du vecteur courant magnétisant équivalent et le vecteur flux magnétisant équivalent, nous pouvons définir notre coefficient de saturation qui est seul et unique.

En reprenant l'expression liant ces deux grandeurs à partir de (2.49) en faisant introduire notre coefficient de saturation noté K_{ST} :

$$\varphi_{MS} = K_{ST}(I_{MR}) \cdot L_d \cdot (1 - \sigma_d) \cdot I_{MR} \quad (2.65)$$

$$I_{MR} = \sqrt{I_{mrd}^2 + k_s^2 \cdot I_{mrq}^2} \quad (2.66)$$

En introduisant le coefficient de saturation K_{ST} dans les expressions (2.38) des flux magnétisants statoriques des axes d et q , on aura :

$$\begin{cases} \varphi_{msd} = K_{ST}(I_{MR}) \cdot L_d \cdot (1 - \sigma_d) \cdot I_{mrd} \\ \varphi_{msq} = K_{ST}(I_{MR}) \cdot L_q \cdot (1 - \sigma_d) \cdot I_{mrq} \end{cases} \quad (2.67)$$

2.6.2 Expression du coefficient de saturation K_{ST}

a Cas où les flux sont des variables d'état

Dans le modèle où les flux sont choisis comme variable d'état le coefficient de saturation peut se décomposer en deux parties l'un pour la zone linéaire et l'autre pour la zone saturée dépendant du courant I_{MR} [10] :

$$K_{ST}=1 \quad \text{Pour} \quad I_{MR} \leq 1.5 \text{ A}$$

$$K_{ST}=\frac{a}{1+b \cdot I_{MR}} \quad \text{Pour} \quad I_{MR} > 1.5 \text{ A} \quad (2.68)$$

Les paramètres a et b sont donnés dans la suite [LUB 03] :

$$a = 2.35 \quad b = 0.9 \quad (2.69)$$

Le coefficient de saturation K_{ST} varie en fonction du courant magnétisant rotorique équivalent I_{MR} , et ce dernier dépend des courants circulants dans les enroulements de la machine, à savoir I_{mrd} , I_{mrq} qu'on peut avoir à partir des équations des flux statoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \sigma_d \cdot L_d \cdot i_{sd} + L_d \cdot (1 - \sigma_d) \cdot I_{mrd} \\ \varphi_{sq} = \sigma_q \cdot L_q \cdot i_{sq} + L_q \cdot (1 - \sigma_q) \cdot I_{mrq} + \varphi_{pm} \end{cases} \quad (2.70)$$

On obtient ainsi :

$$\begin{cases} I_{mrd} = \frac{\varphi_{sd} - \sigma_d \cdot L_d \cdot i_{sd}}{L_d \cdot (1 - \sigma_d)} \\ I_{mrq} = \frac{\varphi_{sq} - (\sigma_q \cdot L_q \cdot i_{sq} + \varphi_{pm})}{L_q \cdot (1 - \sigma_q)} \end{cases} \quad (2.71)$$

b Cas où les courants sont pris comme variables d'état

On peut choisir des fonctions mathématiques différentes pour représenter le coefficient de saturation K_{ST} . La fonction mathématique adoptée pour représenter le coefficient de saturation est un rapport de polynômes d'ordre 4, définis ci-dessous [10] :

$$K_{ST}(I_{MR}) = \frac{1+a \cdot I_{MR}+b \cdot I_{MR}^2+c \cdot I_{MR}^3+d \cdot I_{MR}^4}{1+e \cdot I_{MR}+f \cdot I_{MR}^2+g \cdot I_{MR}^3+h \cdot I_{MR}^4} \quad (2.72)$$

On donne les paramètres de l'équation (II.73) :

$$\begin{array}{llll} a=-1.376 & b=0.586 & c=-0.0247 & d=0.005 \\ e=-1.381 & f=0.619 & g=-0.080 & h=0.033 \end{array} \quad (2.73)$$

2.6.3 Modèle saturé où les flux sont choisis comme variables d'état

Le modèle qu'on développera pour tenir compte de la saturation est donc un modèle à un seul coefficient de saturation. Le coefficient de saturation K_{ST} varie en fonction des courants magnétisants rotoriques, donc on n'aura aucun changement pour les deux premières équations d'état du modèle en régime linéaire représentant les équations du stator (Equation 2.44).

En introduisant le coefficient de saturation K_{ST} , les expressions des courants magnétisants rotoriques I_{mrd} et I_{mrq} deviennent :

$$\begin{cases} I_{mrd} = \frac{1}{K_{ST} \cdot L_d \cdot (1 - \sigma_d)} \cdot \varphi_{msd} \\ I_{mrq} = \frac{1}{K_{ST} \cdot L_q \cdot (1 - \sigma_q)} \cdot \varphi_{msq} \end{cases} \quad (2.74)$$

Cas où les courants sont pris comme variables d'état

On peut choisir des fonctions mathématiques différentes pour représenter le coefficient de saturation K_{ST} . La fonction mathématique adoptée pour représenter le coefficient de saturation est un rapport de polynômes d'ordre 4, définis ci-dessous [10] :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{msd}}{dt} = \frac{1}{K_{ST} \cdot T_{rd}} \cdot \varphi_{msd} + \frac{(1 - \sigma_d)}{(T_{rd} \cdot \sigma_d)} \cdot (\varphi_{sd} - \varphi_{msd}) \\ \frac{d\varphi_{msq}}{dt} = -\frac{1}{K_{ST} \cdot T_{rd}} \cdot \varphi_{msq} + \frac{(1 - \sigma_q)}{(T_{rq} \cdot \sigma_q)} \cdot (\varphi_{sq} - \varphi_{msq} - \varphi_{pm}) \end{cases} \quad (2.75)$$

2.7 Cas particulier de la machine synchrone à réluctance variable

La machine synchrone à réluctance variable représente un cas spécial de la machine synchrone à aimants permanents à démarrage direct. D'un point de vue de constitution, le stator des deux machines est identique. Donc, on peut construire une machine synchrone à aimants permanents à démarrage direct à partir d'une machine synchrone à réluctance variable à démarrage direct en modifiant la structure de son rotor. Nous pouvons alors, exploiter directement le modèle saturé qu'on a obtenu pour la machine synchrone à aimants permanents à démarrage direct à La machine synchrone à réluctance variable. Il suffit juste d'imposer le flux produit par les aimants égal à zéro dans le modèle développé.

2.8 Cas particulier de la machine asynchrone

Le modèle saturé que nous avons développé peut aussi s'appliquer à la machine asynchrone en reprenant les équations de la machine synchrone à aimants permanents à démarrage direct qu'on a développé précédemment en respectant deux conditions, à savoir :

- On pose : $\varphi_{pm} = 0$.
- On prend des valeurs identiques pour les paramètres électriques des axes d et q , c-à-dire :

$$\begin{cases} I_d = I_q = I_s \\ \sigma_d = \sigma_q = \sigma \\ T_{rd} = T_{rq} = T_R \end{cases} \quad (2.76)$$

Dans ce cas il faut noter que le coefficient de saillance k défini par l'équation (2.64) soit égal à un :

$$K_s = \sqrt{\frac{L_q(1-\sigma_q)}{L_d(1-\sigma_d)}} = 1 \quad (2.77)$$

Nous pouvons alors, obtenir le modèle saturé de la machine asynchrone à partir du modèle de la machine synchrone à aimants permanents à démarrage direct en modifiant légèrement les équations de ce dernier, en prenant en considération les égalités précédentes.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents à démarrage direct.

Le modèle qu'on a obtenu est un modèle à un seul coefficient de saturation, donc on peut utiliser cette fonctionnalité pour obtenir les deux modèles possibles de la machine. Un modèle représentant le régime non saturé (en posant $K_{ST} = 1$) et l'autre représente le régime saturé.

Nous avons montré que ce modèle peut également s'appliquer à la machine synchrone à réluctance variable et à la machine asynchrone qui représentent des cas particuliers de la machine synchrone à aimants permanents à démarrage direct. Dans Le chapitre suivant en va voir l'énergie éolienne.

Chapitre 3 L'énergie éolienne

3.1 INTRODUCTION

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable, le rôle d'une éolienne est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents composants sont conçus pour maximiser cette conversion d'énergie [19] Dans ce chapitre nous donnerons une présentation générale sur l'énergie éolienne. En premier lieu. On parle de potentiel éolien en Algérie ainsi que son gisement. La deuxième partie sera consacrée à une présentation d'un système éolienne et son principe de fonctionnement.

3.2 HISTORIQUE

Depuis l'antiquité, l'homme a utilisé l'énergie éolienne pour moudre le grain ou pomper l'eau. Avec la découverte de l'électricité à la fin du 19^{ème} siècle, les premiers prototypes d'éoliennes ont été construits, avec la technologie modélisée sur des éoliennes.

- XIV^e siècle (14^{ème} siècle) : Des améliorations sont apportées progressivement aux moulins à vent européens.
- En 1700 : Les turbines éoliennes font leur apparition au Canada.
- En 1800 : Les homes teaders américains utilisent les moulins à vent pour pomper l'eau.
- En 1887-1888 : L'américain Charles F. Brush, construit la première éolienne entièrement automatisée.
- En 1890 : Danois Poul, permettant de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.
- En 1891 : l'inventeur danois Poul découvre que des turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales.
- En 1920 : Georges J.M. développe le concept d'un rotor à axe vertical.
- En 1930 : Développement de petites éoliennes dans les régions rurales.
- En 1955 : En France une éolienne expérimentale de 800 kVA fonctionne de 1955 à 1963.
- En 1957 : Johannes Juul crée la turbine Gedser pour la compagnie d'électricité (SEAS).
- En 1960 : Elaboration de turbines à axe horizontal en Allemagne.

- En 1971 : Premier parc d'éoliennes en mer au large du Danemark d'une puissance totale de 5 MW.
- En 1973 : La crise pétrolière provoque les recherches sur les énergies renouvelables.
- En 1980 : Californie décide que d'ici l'an 2000, 10 % de son alimentation énergétique proviendra de l'énergie éolienne .
- En 1984 : Projet Éole, la plus grande éolienne de type Darius au monde.

- En 1996 : Premier programme éolien français.
- En 2000 : Loi de modernisation du service public de l'électricité.
- En 2001 : Arrivée de tarifs d'achat de l'électricité.
- En 2002 : Mise en service du plus grand parc éolien offshore au monde au Danemark .
- En 2003 : Introduction des enquêtes publiques.
- En 2004 : La capacité mondiale d'énergie éolienne dépasse les 39 000 MW
- En 2005 : Mise en place La zone de développement éolien (ZDE) [20].
- En 2006 : Le seuil des 1000 MW est dépassé.
- En 2011 : Lancement des premiers sites en mer.
- En 2013 : Le Danemark produit 33,2% de son électricité grâce aux éoliennes.
- En 2014 : Le choc de simplification en faveur de développement économique, Simplifier consiste, sur la durée, à rendre les procédures plus rapides, plus efficaces.
- En 2015 : Publication de La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) [22].
- En 2016 : La filière retrouve le bon rythme.
- En 2017 : Mise en place du complément de rémunération.
- En 2018 : Groupe de travail et appels d'offres.
- En 2019 : Publication de la PPE (Programmation pluriannuelle de l'énergie) [23].
- En 2020 : l'Allemagne, au mois de février atteint les 61,2 %.

3.3 LES ENERGIES RENOUVELABLES

Une énergie renouvelable (ER) est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à échelle humaine de temps. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), la Lune (marée), mais aussi le vent (éolien) et la Terre (énergie géothermique). Leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes. Toutes ces ressources peuvent être transformées en énergie directement utile à l'homme sous forme de chaleur, d'électricité ou de force mécanique. Elles contribuent au développement durable et à la protection de l'environnement [24].

- L'énergie solaire, c'est la transformation du rayonnement lumineux du soleil en électricité. On trouve des différents types et technologies concernant cette source [25].
- L'énergie éolienne, consiste à utiliser l'énergie mécanique par l'intermédiaire d'un rotor et de pales. Cette source est non polluante [26].
- L'énergie hydraulique, l'énergie mécanique générée par la chute de l'eau qui fait tourner une turbine liée à un alternateur ce qui permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique [27].
- La géothermie, le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre.
- La biomasse, les matières issues des végétaux (comme le bois) et des animaux. Le bois est une matière organique et, lorsqu'il brûle, il dégage de l'énergie sous forme de chaleur.

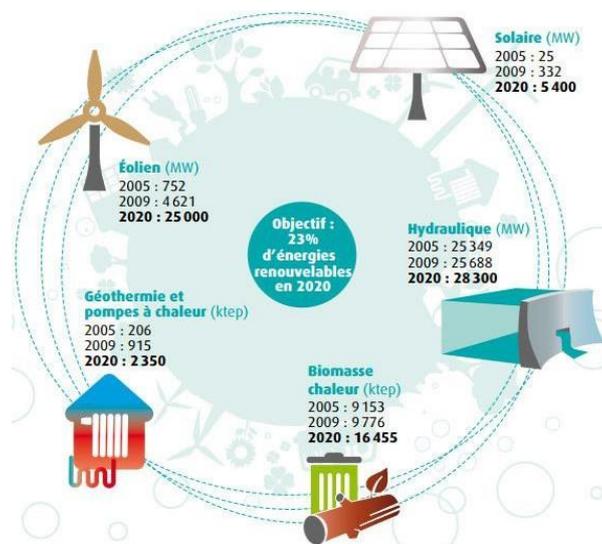


Figure 3.1 Les différentes types d'énergies renouvelables.

3.4 POTENTIEL D'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE

Le potentiel éolien dans une région donnée se calcul à partir des distributions de la vitesse moyenne. Lorsqu'on dispose de mesures de vent, l'information peut être représentée sous forme d'histogramme Ce dernier illustre la variation de la fréquence relative des vitesses de vent. La modélisation de la distribution de la vitesse du vent se fait à partir de plusieurs Modèles, présents dans la littérature qui sont utilisées pour ajuster les distributions de la vitesse du vent sur une période de temps. Le modèle le plus utilisé pour caractériser la distribution des vitesses du vent est la distribution de probabilité de Weibull [28].

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie considérablement d'un endroit à l'autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très divers. Le pays est divisé en deux zones géographiques distinctes : la Méditerranée septentrionale et la Méditerranée orientale. Caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de et l'atlas saharien. Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar [29]. Le parc éolien de **Kaberten** est composé de 12 éoliennes de puissance unitaire 850 kW. Il est situé à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar. Les études d'évaluation du potentiel éolien disponible en Algérie montrent que les vitesses de vent moyennes dans cette région sont de l'ordre de 6 m/s, à 10 m de hauteur, étant installées sur des mâts de 55 m.

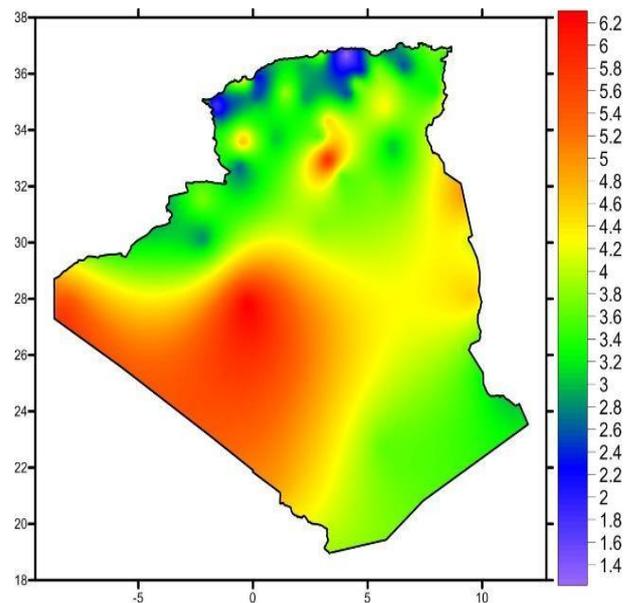


Figure 3.2 Carte de gisement éolienne en Algérie. [27].

3.5 LE GISEMENT EOLIEN

3.5.1 METEOROLOGIE DE VENT

Le vent est une grandeur stochastique, intermittente qui dépend d'un ensemble de facteurs tels que la situation géographique, les saisons, l'altitude, la température et la hauteur de captage. Cette grandeur est causée par le déplacement de la masse d'air qui est dû indirectement l'ensoleillement de la Terre. En effet par la rotation de la terre qui provoque une déviation des vents vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud et par effet de centrifuge une surélévation de la hauteur d'atmosphère à l'équateur. Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes altitudes. Sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire.

3.5.2 LES DIFFERENTS TYPES DU VENT

Le vent est généralement appliqué aux mouvements horizontaux naturels de l'atmosphère. Les mouvements verticaux sont appelés courants. Les vents sont produits par des différences de pression atmosphérique causées principalement par des gradients de température. Les variations de la distribution de la pression et de la température sont principalement dues à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences dans les propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Lorsque les températures dans les régions voisines deviennent inégales, l'air plus chaud a tendance à circuler sur l'air plus froid. La direction des vents ainsi générés est généralement fortement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la Terre [29].

3.5.2.1 LES VENTS GLOBAUX

L'air s'élève à l'équateur, s'étendant vers le nord et le sud dans la haute atmosphère. Dans les deux hémisphères, à approximativement 30 degrés de latitude, la force de Coriolis empêche les courants d'air d'aller beaucoup plus loin. L'air commençant de redescendre à cette latitude, il se crée ici une zone de haute pression (appelée aussi un anticyclone).

Lorsque l'air s'élève à l'équateur, il se crée au niveau du sol une zone de basse pression attirant des masses d'air du nord et du sud.

3.5.2.2 LES VENTS DE SURFACE

Jusqu'à une hauteur d'environ 100 m, l'influence de la surface du sol sur les vents est significative. En raison de la rotation de la terre, les directions des vents près de la surface diffèrent également légèrement de celles des vents globaux. Dans le domaine de l'énergie éolienne, ce sont les vents de surface et leur capacité énergétique qui présentent le plus grand intérêt [30].

3.5.2.3 LES VENTS LOCAUX

Il est d'abord chaud et sec, puis il se charge d'humidité en traversant la mer Méditerranée. En Antarctique, le catabatique est un vent glacial des montagnes qui souffle vers les côtes. Les vents qui viennent des régions chaudes et des déserts font monter la température de l'air. Le föhn est un exemple de vent chaud qui souffle en montagne. Il se forme quand l'air perd de son humidité en s'élevant le long d'un versant au vent [18].

3.5.3 LES CRITERES DE CHOIX DE SITES

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Ils incluent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion [28].

3.5.3.1 LA BRISE DE MER ET DE TERRES

Ces brises sont très influencées par des facteurs tels que la mer, la terre et les montagnes. Ainsi, l'échauffement non uniforme et inégal du sol et de l'eau, sous l'effet du rayonnement solaire, la variation de température est beaucoup plus sensible au-dessus de la terre qu'au-dessus des grandes étendues d'eau. Cela induit au soulèvement de l'air chaud qui s'étend ensuite vers la mer. L'air froid provenant de la mer est attiré par la dépression créée au niveau de la terre à cause de son réchauffement. Ce phénomène est appelé la brise de mer. Durant la nuit, la direction de cette brise prend le chemin inverse, c'est la brise de terre. On cite aussi la brise de pente et la brise de vallée [27].

3.5.3.2 EFFET VENTURI

Lorsque l'air passe entre deux objets tels que deux montagnes ou de grands bâtiments, il est accéléré par l'effet Venturi. Lorsqu'il arrive sur la Colline, l'air est accéléré au sommet. Ils sont le plus souvent de petite superficie [29].

3.5.3.3 EFFET COLLINE

Les collines, c'est à cause de la différence de pression qui existe à l'avant et à l'arrière de celles-ci. Ainsi, le vent se trouve comprimé par la colline à la face exposée au vent, pour s'étendre ensuite, une fois passé le sommet, vers la zone de basse pression du côté sous le vent de la colline [27].

3.5.3.4 LA MER ET LES LACS

La mer et les lacs (près d'une côte non exploitée) sont également des endroits de choix : il n'y a pas d'obstacles au vent, donc même à basse altitude, les vents ont une vitesse plus élevée et sont moins turbulents [31].

3.5.4 INSTRUMENTS DE MESURE DE LA VITESSE DE VENT

Le vent est caractérisé par deux grandeurs variables : la vitesse et la direction.

3.5.4.1 L'ANEMOMETRE

L'anémomètre a été inventé par le physicien anglais Robert Hooke (1635-1703); c'est un anémomètre utilisé par les marins pour mesurer la vitesse du vent quand ils sont en mer ou même par des particuliers : vous pouvez vous balader avec votre anémomètre dans votre poche. Il en existe plusieurs types. On peut les classer en quatre catégories principales :

- ANEMOMETRES A ROTATION.
- ANEMOMETRES A PRESSION.
- ANEMOMETRE A VARIATION DE SECTION.
- ANEMOMETRE A ULTRASONS [32].



Figure 3.3 Anémomètre.

3.5.4.2 LA GIROUETTE

Girouette est un dispositif généralement métallique, principalement installé sur un toit, constitué d'un élément rotatif monté sur un axe vertical fixe. Sa fonction est de montrer l'origine du vent ainsi que, contrairement à la manche à vent, son origine cardinale. Ceci est rendu possible par sa structure asymétrique, généralement matérialisée par une flèche ou un coq, dont la pointe ou la tête, plus courte que les éléments indicateurs (le corps), pointe vers la source du vent portant sur l'élément de guidage de la structure. L'axe fixe est généralement muni d'une croix directionnelle indiquant les quatre points cardinaux [33].



Figure 3.4 La Girouette.

3.5.4.3 LOGGER

Data logger Permet d'enregistrer des données mesurées sur un intervalle donné. Par exemple, toutes les 10 minutes, il calcule les données de mesure moyennes de chaque instrument et les stocke dans sa mémoire. Après la campagne de mesure, l'enregistreur de données est connecté à un ordinateur pour extraire les données sous la forme d'une feuille de calcul Excel [34].



Figure 3.5 Data logger.

3.5.5 LA ROSE DE VENTS

La rose des vents, les fréquences relatives des vents provenant de chacun des douze secteurs sont indiquées dans le graphique central gauche comme étant l'étendue radiale des segments de cercle couvrant les secteurs. La contribution de chaque secteur au total la vitesse moyenne et le cube moyen total de la vitesse sont donnés sous forme de segments plus étroits et les segments centraux respectivement. Pour chaque quantité, la normalisation est telle que le plus grand segment s'étend jusqu'au cercle extérieur en pointillés [35].

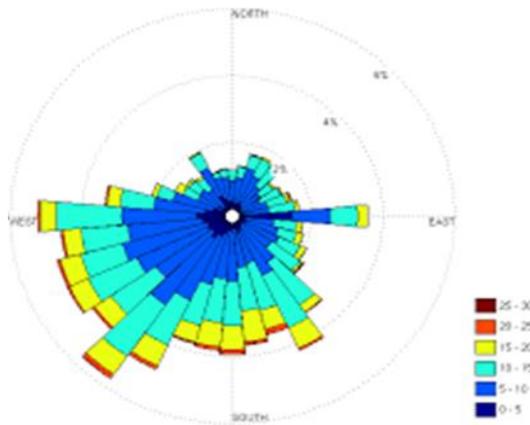


Figure 3.6 La rose de vent.

3.5.6 LOI DE BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure 3.7 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

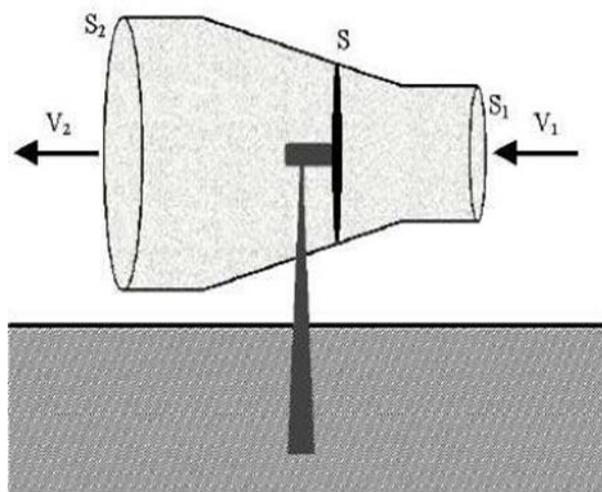


Figure 3.7 Tube de courant autour d'une éolienne [31].

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit $\frac{v_1+v_2}{2}$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en seconde est :

$$m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)}{2} \quad (3.1)$$

La puissance P_m , est donnée par la loi de Newton qui s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent :

$$P_m = \frac{\rho S (v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (3.2)$$

En remplaçant m par son expression dans (3.1)

$$P_m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (3.3)$$

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (3.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{v_1}{v_2})(1 - \frac{v_1}{v_2})^2}{2} \quad (3.5)$$

La figure (3.8) représente la caractéristique correspondante à l'équation (3.5). On constate que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé ; aussi coefficient de puissance C_p présente une limite égale à 0,59.

Cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [36].

On peut estimer la valeur maximale de ce coefficient, donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne, c'est la valeur maximale de ce coefficient

qui correspond à la limite dénommée la limite de Betz [37].

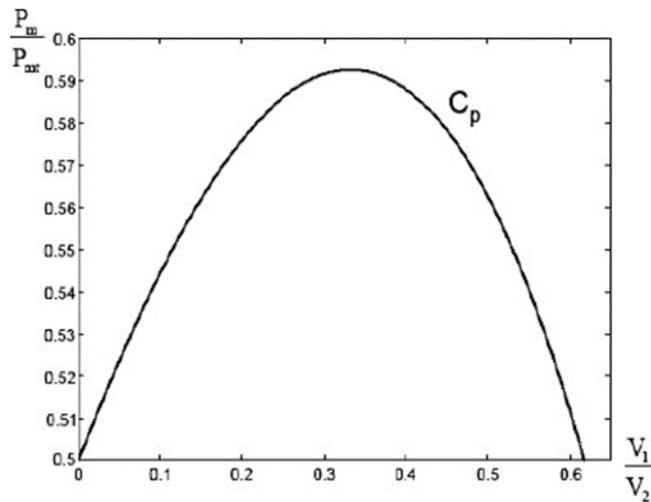


Figure 3.8 Coefficient de puissance [29].

3.6 SYSTÈME EOLIENNE

Une éolienne est une machine permettant de la conversion d'énergie. Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau). L'application « connecté réseau » ou « grand éolien » représente, en termes de puissance installée.

3.6.1 DESCRIPTION D'UNE EOLIENNE

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor, cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées.

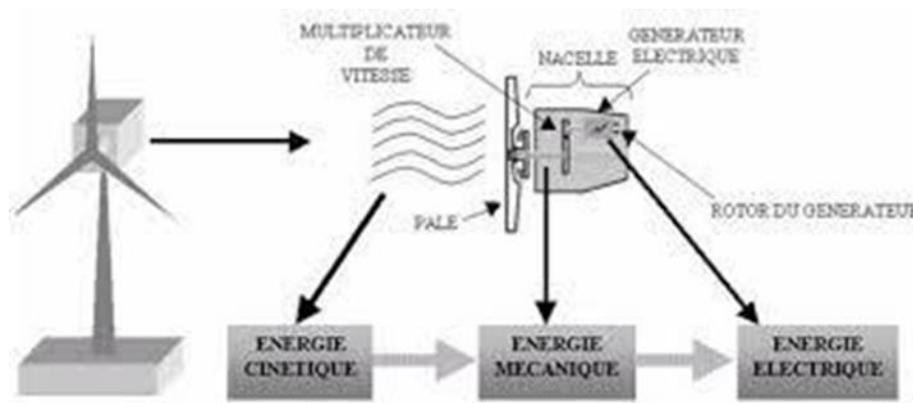


Figure. 3.9 Système éolienne.

3.6.2 PRINCIPALES COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE

- . **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
- . **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- . **L'arbre primaire (ou arbre lent)** : relie les pales au multiplicateur.
- . **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- . **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- . **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- . **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- . **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'une machine qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- . **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
- . **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- . **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- . Au pied du mât se trouve un **transformateur [20]**.

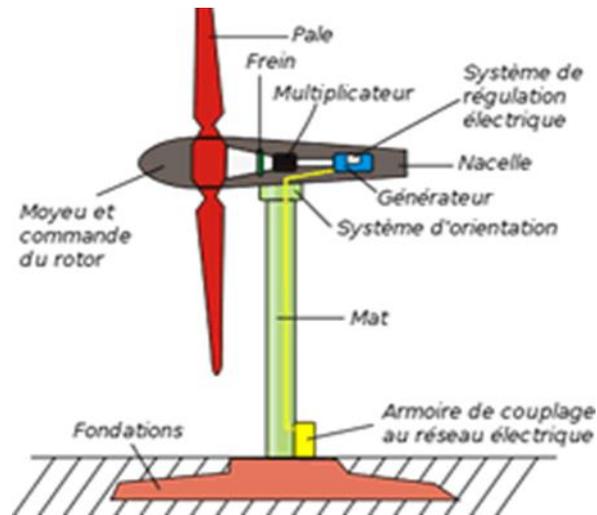


Figure. I.10 principales composantes d'une éolienne

3.6.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une éolienne est constituée d'un mât en haut duquel se situe une nacelle. Dans cette nacelle se trouvent les principaux dispositifs de production d'énergie. Tout d'abord l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie mécanique due à un mouvement de rotation du rotor. Celui-ci est entraîné par le moyeu qui supporte les pales. La rotation du rotor est transmise à la boîte de vitesse par l'intermédiaire de l'arbre. La boîte de vitesse permet d'adapter la vitesse de rotation à celle du générateur. De la boîte de vitesse sort un second arbre qui transfère le mouvement au générateur. Ce dernier a pour rôle de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique généralement alternative.

3.6.4 LES DIFFERENTS TYPES EOLIENNES

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

3.6.4.1 EOLIENNE A AXE HORIZONTALE

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, Nous trouvons dans cette famille d'aéro machines deux catégories, « onshore » et « offshore », ces termes américains permettent de distinguer si l'éolienne est implantée sur terre ou à la surface de la mer.

- o Les éoliennes terrestres dites « onshore » sont installées sur la terre.
- o Les éoliennes marines dites « offshore » sont installées en mer.

3.6. 4.1.1 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Les avantages :

Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.

- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Les inconvénients :
- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
- Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.
- Elles sont de faible puissance destinée à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

3.6.4.2 EOLIENNE A AXE VERTICAL

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie au pied de l'éolienne.

3.6.4.2.1 LES EOLIENNE DARRIEUS

Le rotor de Darrieus est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple machine entraînant la rotation du dispositif.



Figure. 3.11 Type Darrieus.

3.6.4.2.2 LES EOLIENNE SAVONIUS

Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.



Figure. I.13 Type Savonius.

3.6.4.2.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Les avantages :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien. Les inconvénients :
- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour [38].

3.7 CLASSIFICATION DES TURBINES EOLIENNES

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est fixe et celles dont la vitesse est variable.

3.7.1 LES EOLIENNE A VITESSE FIXE

Dans le premier cas, le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (seuls les générateurs asynchrones sont utilisés dans ce cas). Deux générateurs asynchrones sont souvent utilisés dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée.

3.7.2 LES EOLIENNE A VITESSE VARIABLE

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre...), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance).

Le tableau 3.1 illustre un comparatif simple entre les différents fonctionnements

A Vitesse Fixe	A Vitesse Variable
<ul style="list-style-type: none">○ Augmentation du rendement énergétique,○ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance,○ Réduction des efforts subis par le train de puissance,○ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.	<ul style="list-style-type: none">○ Simplicité du système électrique.○ Plus grande fiabilité.○ Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne.○ Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale).

Tableau 3.1 Comparaison entre l'éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable.

3.8 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ENERGIES EOLIENNE

Les avantages :

- Coût de production relativement faible (200.000 euros environ) par rapport à l'énergie produite.
- La surface occupée au sol est peu importante.
- L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules).
- Surface immense disponible en mer où le vent est pratiquement.
- Constant.

Les inconvénients :

- Affecte le paysage environnant et cause du bruit.
- Dépendant du vent.
- Des coûts d'investissement énormes.

3.9 APLICATIONS DES ENERGIES EOLIENNE

L'intérêt d'une éolienne est justifié par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. On caractérise :

- Eolienne de pompage mécanique.
- Eolienne de pompage électrique. Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :
 - . L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
 - . L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.
- Ferme éolienne.
- Aérogénérateur de grande puissance.

3.10 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté généralité sur l'énergie éolienne, ces différents types, sa structure et comment fonctionner. Le chapitre traite également un aperçu sur le vent, ses différents types et ses instruments de mesures. L'intégration de production à base d'énergie éolienne à un impact sur les réseaux électriques. Dans Le chapitre suivant en va étudier la Modélisation et commande d'une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne.

Chapitre 4 Modélisation et commande d'une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous étudions la modélisation et la commande d'une génératrice synchrone à aimants permanents associée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite taille en site isolé. Le système proposé débite à travers un redresseur MLI commandé en sortie continue par un algorithme MPPT afin d'obtenir un rendement énergétique maximal. Les résultats des différentes simulations de toute la chaîne de conversion, réalisées sous environnement MATLAB/Simulink, ont permis d'évaluer les performances du système proposé.

Le schéma bloc de l'éolienne étudiée ici est représenté en **figure 4.1**.

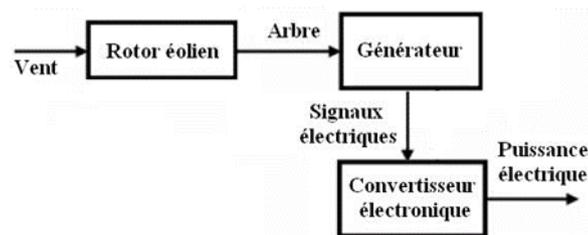


Figure. 4.1: Structure du système de conversion éolien

4.2 MODELISATION DU GENERATEUR EOLIEN

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à vitesse variable couplée directement à une génératrice synchrone à aimants permanents raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance MLI, est représenté en figure 4.2.

La modélisation et la commande de ces différents organes vont être examinées dans ce qui suit.

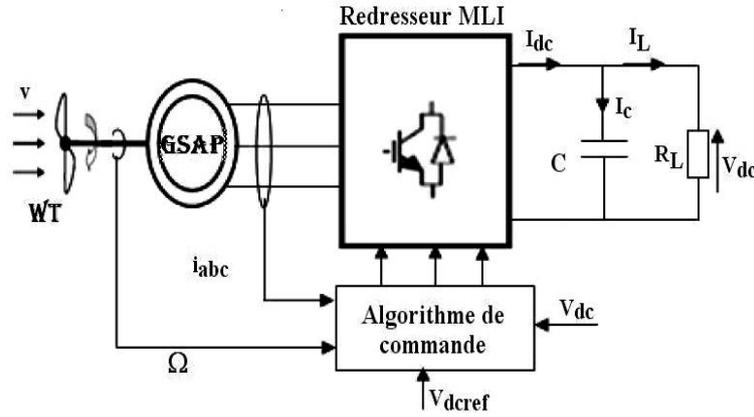


Figure. 4.2: Structure du générateur éolien étudié

4.2.1 Modèle de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par [2, 5]:

$$p_v = \frac{1}{2} \rho s v_v^3 \tag{4.1}$$

Où : ρ représente la masse volumique de l'air (kg/m^3), v_v la vitesse du vent (m/s), S la surface utile traversée par le vent a pour expression :

$$S = R \times H \tag{4.2}$$

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

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique) λ qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit:

$$\lambda = \frac{R \Omega}{v_v} \tag{4.3}$$

Avec : Ω la vitesse angulaire de rotation des pâles (rad/s).

En utilisant le coefficient de puissance $C_p(\lambda)$, la puissance éolienne est calculée ainsi:

$$p_{eol} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s v_v^3 \tag{4.4}$$

L'équation analytique de C_p en fonction de λ résultant de l'interpolation est :

$$C_p(\lambda) = -0.2121 \lambda^3 + 0.0856 \lambda^2 + 0.2539 \lambda \quad (4.5)$$

La figure 4.3 représente le tracé de la caractéristique $C_p(\lambda)$ où apparaît un maximum de 0.15 pour une vitesse réduite de 0,78. Afin d'optimiser la conversion de puissance, il faut donc essayer de conserver cette vitesse réduite, c'est-à-dire modifier la vitesse de rotation lorsque la vitesse du vent varie.

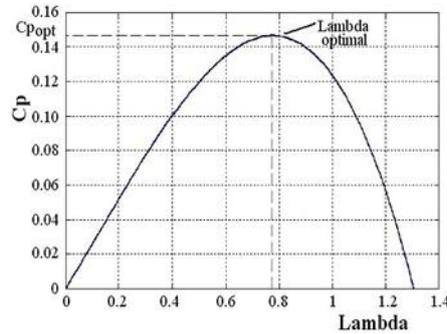


Figure. 4.3: Courbe $C_p(\lambda)$ de la voilure étudiée de type Savonius.

A partir de cette puissance, le couple éolien est donc donné par :

$$C_{eol} = P_{eol} / \Omega \quad (4.6)$$

En remplaçant la valeur de la puissance par le produit (couple x vitesse) et en utilisant :

$$C_{eol} = \frac{C_p \rho R^2 H V V^2}{\lambda} \quad (4.7)$$

Les figures 4.4 et 4.5 représentent un réseau de caractéristiques respectivement de la puissance et du couple éoliens en fonction de la vitesse de rotation, le paramètre étant la vitesse du vent.

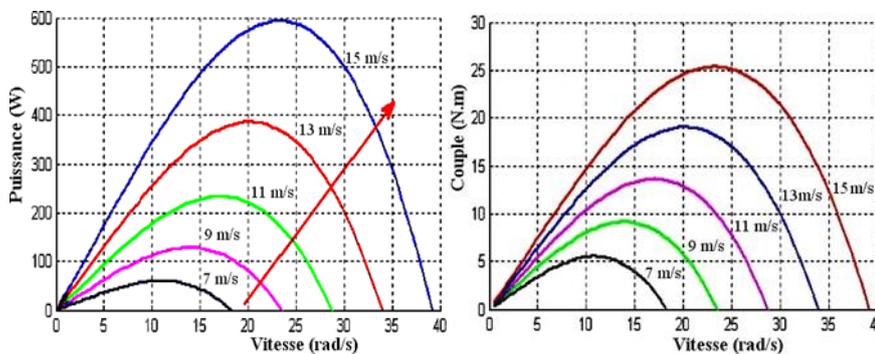


Figure. 4.4: Caractéristiques $P_{eol}(\Omega)$

Figure. 4.5: Caractéristiques $C_{eol}(\Omega)$

4.2.2 Modélisation de l'arbre de la machine

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et générateur est donnée par [39]:

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega}{dt} = C_{eol} - C_{em}(f_m - f_t)\Omega \quad (4.8)$$

Où : J_t et J_m sont les inerties de la turbine et de la machine respectivement, f_m le coefficient de frottement de la machine le coefficient de frottement des pâles et f_t le coefficient de frottement des pâles et C_{eol} le couple statique fournie par l'éolienne.

Dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure ne sera pas pris en compte). Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante :

$$C_{EOL} = J_t \frac{d\Omega}{dt} + C_{EM} + F_M \Omega \quad (4.9)$$

4.2.3 Modèle de la machine synchrone

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (performances, robustesse, ...), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour une application en générateur couplé à une turbine éolienne.

La modélisation de la machine synchrone à aimants permanents a déjà fait l'objet de nombreux travaux. Le modèle le plus adéquat pour étudier le comportement dynamique de la machine et pour l'implémentation des lois de commande est inspiré des travaux [40, 41].

Un modèle dans le repère de Park de cette machine sera utilisé. Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide de matrices de passage.

Les équations de la machine dans le repère de Park sont les suivantes :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - L_s \omega I_{sq} \quad (4.10) \quad C_{em} = p K_A I_{sq} \quad (4.12)$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} - L_s \omega I_{sd} + K_A \omega \quad (4.11) \quad \omega = p \Omega \quad (4.13)$$

Avec : I_{sq} I_{sd} les courants statoriques dans le repère de Park (A) , V_{sd} V_{sq} les tensions statoriques dans le repère de Park [V] , R_s et L_s sont respectivement les résistances statoriques (Ω) et l'induction cyclique statorique (H), p et ω sont respectivement le nombre de pair de pôles de la machine synchrone et la pulsation des tensions (rad/s).

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_{sd} - R_s i_{ds} + L_s p \Omega i_{sq}) \quad (4.14)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_{sq} - R_s i_{qs} - L_s p \Omega i_{sq} - K_A P \Omega) \quad (4.15)$$

$$C_{em} = p K_s i_{sq} \quad (4.16)$$

4.2.4 Modèle du redresseur MLI

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI - charge), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux : c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande.

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties. Le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu. Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [42, 43]:

$$s = \begin{cases} +1 & \bar{s} = -1 \\ -1 & \bar{s} = +1 \end{cases} \quad \text{Pour } s = a ; b ; c$$

Puis, les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de S_i , U_{dc} : et les courants d'entrée i_a, i_b, i_c .

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4.17)$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par:

$$\begin{aligned} U_{Sab} &= (S_a - S_b)U_{dc} \\ U_{Sbc} &= (S_b - S_c)U_{dc} \\ U_{Sca} &= (S_c - S_a)U_{dc} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Sa} \\ U_{Sb} \\ U_{Sc} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Avec :

$$\begin{aligned} U_{Sa} &= \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} U_{dc} \\ U_{Sb} &= \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} U_{dc} \\ U_{Sc} &= \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} U_{dc} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu par :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_L \quad (4.21)$$

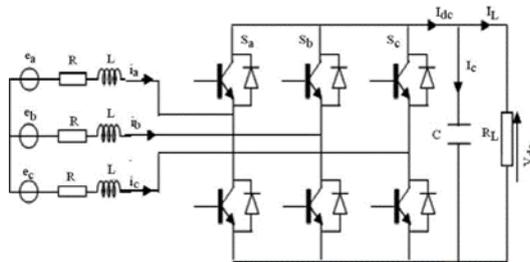


Figure. 4.6: Schéma de l'association MSAP – Redresseur MLI

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones dq sont :

$$e_D = R i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + U_{sd} \quad (4.22)$$

$$e_Q = R i_q + L \frac{di_q}{dt} - \omega L i_d + U_{sq} \quad (4.23)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_d i_d + S_q i_q - i_L \quad (4.24)$$

4.3 COMMANDE DU GENERATEUR EOLIEN

Le schéma bloc de la commande est représenté par la figure 4.7. Le couple électromagnétique C_{em} de référence peut être élaboré pour un fonctionnement à puissance fixée qui est de toute façon utilisé pour limiter la puissance de la génératrice à sa valeur nominale.

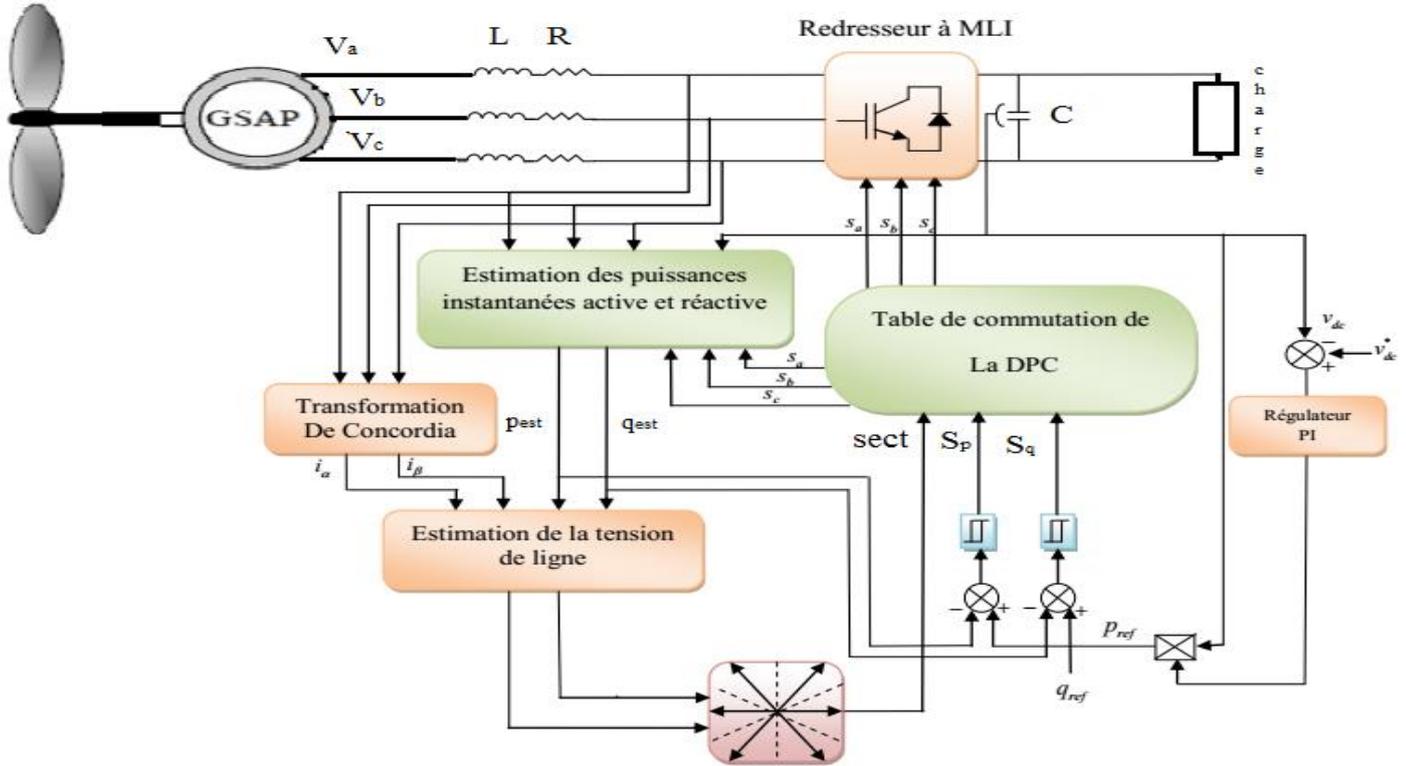


Figure. 4.7: Synoptique de la commande du redresseur et de la machine synchrone

4.3.1 Stratégie de maximisation de la puissance

Les équations de la puissance électrique et mécanique du système en régime permanent permettent à nouveau la formulation du nouvel objectif principal. Cependant, pour la fonction de la puissance mécanique, une forme plus simple est utilisée. Pour réduire les degrés de liberté du système, la vitesse du vent, seule variable non contrôlable du système, est sortie de la formulation mathématique par l'utilisation d'une forme optimale [44, 45].

L'équation (4) donne la puissance correspondant à une vitesse de vent V_V :

$$p_{eol} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s v_v^2 \quad (4.25)$$

Si le rapport de vitesse λ est maintenu à sa valeur optimale λ^{opt} , le coefficient de puissance est à sa valeur maximale l'éolienne : $C_{pm}(\lambda) = C_p(\lambda^{opt})$ ainsi que la puissance de l'éolienne

$$P_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s v_v^2 \quad (4.26)$$

D'autre part, si de l'équation du rapport de vitesses supposé maintenu à la valeur optimale, on isole la vitesse du vent (4.27) pour la remplacer dans l'équation de la puissance mécanique maximale (4.25), on obtient l'équation (4.28).

$$\lambda^{opt} = \frac{R}{v_v} \Omega \Rightarrow v_v = \frac{R}{\lambda^{opt}} \Omega \quad (4.27)$$

$$P_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s \left(\frac{R}{\lambda^{opt}} \Omega\right)^3 \quad (4.28)$$

On obtient donc une forme analytique de la puissance mécanique maximale de la turbine éolienne en fonction de sa vitesse de rotation uniquement. Ω En supposant que les conditions sont optimales (à puissance optimale), alors l'équation (4.28) permet le calcul de la valeur du couple optimal :

$$C_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s \left(\frac{R}{\lambda^{opt}}\right)^3 \Omega^2 \quad (4.29)$$

La figure 4.8 représente un réseau de caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse Ω où la courbe rouge représente le lieu des puissances optimales (4.28).

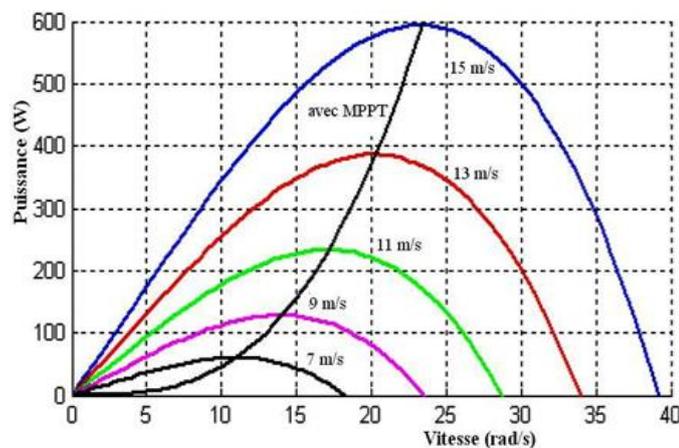


Figure. 4.8: Caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation

4.3.2 Commande de la machine synchrone à aimants permanents

La technique de la commande vectorielle est utilisée pour établir un modèle linéaire et transformer la machine synchrone à aimants en une structure équivalent à la machine à courant continu à excitation séparée du point de vue couple, pour permettre un découplage du couple et du flux. Si le courant i_d est forcé à zéro, comme le flux constant, le couple est directement proportionnel à i_q , d'où la représentation suivante :

$$C_e = K_t i_i \quad (4.30)$$

Avec $K_t = p K_a$

4.3.3 Commande par MLI

Cette stratégie est une alternative à la commande dans le repère (a, b, c). Elle exige pour la régulation des courant I_q et I_d d'imposer les tensions de référence V_{dref} et V_{qref} dont on déduit les tensions de référence sinusoïdales V_{aref} , V_{bref} et V_{cref} , pour la commande de redresseur

4.3.4 Régulation des courants

La fonction de transfert de la machine étant de la forme :

$$H_s(s) = \frac{i_{sd}(s)}{V_{sd,q}(s) + E_{d,q}(s)} \quad (4.31)$$

$$H_s(s) = \frac{1}{R_s + L_s s} = \frac{1}{R_s} + \frac{1}{1 + T_e s} \quad (4.32)$$

où : T_e est la constante de temps électrique donnée par: $T_e = \frac{L_s}{R_s}$

Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné par la figure 4.9. Le schéma est identique pour la boucle de courant dans l'axe q.

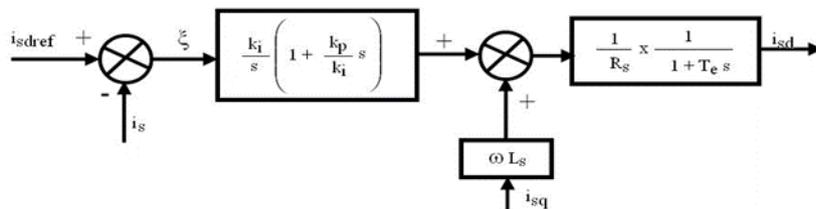


Figure. 4.9: Boucle de régulation de courant

4.3.5 Régulation de la tension V_{dc}

Pour dimensionner le régulateur de tension, considérons le schéma suivant qui met en œuvre les boucles de tension et courant en cascade. En considérant le rendement du redresseur MLI unitaire, il vient :

$$P_{dc} = 3P_g \quad \Rightarrow \quad V_{dc} I_{dc} = 3V_q I_q \quad (4.33)$$

La puissance du bus continu peut se déterminer comme suit :

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} \quad (4.34)$$

La figure 2 nous permet d'écrire

$$I_{dc} = I_c + I_L \quad (4.35)$$

Avec

$$I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt}$$

$$I_L = \frac{dV_{dc}}{R_L}$$

Les équations (4.33) et (4.35) permettent d'établir le modèle suivant:

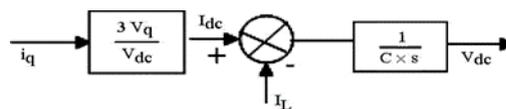


Figure.4.10: Modèle pour la boucle de tension

Ainsi, la structure du système en boucle fermée est représentée en figure 4.11 :

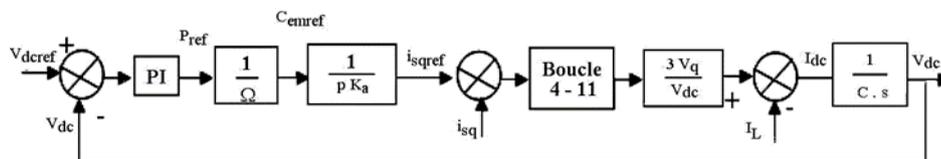


Figure. 4.11: Modèle complet en boucle fermée pour la régulation de tension

4.4 RESULTATS DE SIMULATION

Le fonctionnement du dispositif complet a été simulé sous environnement MATLAB®-Simulink®. En utilisant les paramètres électriques de la machine (voir annexe), la référence de la tension à la sortie du redresseur étant prise égale à 44 V, nous avons simulé le modèle de profil de vent en deux formes :

- La variation de vitesse du vent est donnée par la figure 4.12 et celle de la tension continue à la sortie du redresseur par la figure 4.13.

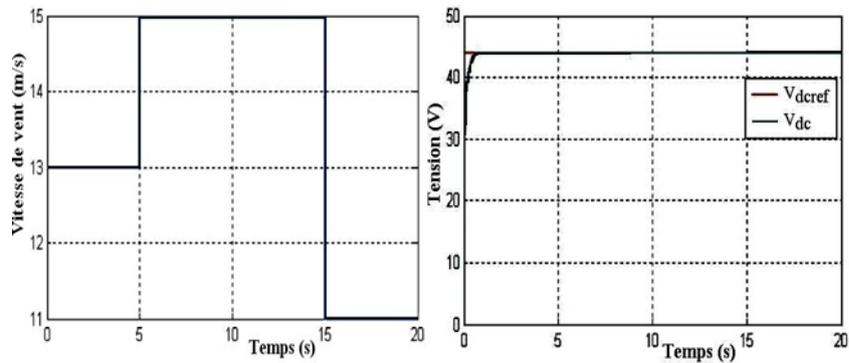


Figure. 4.12: Vitesse de vent = f (temps) **Figure. 4.13:** Tension redressée = f (temps)

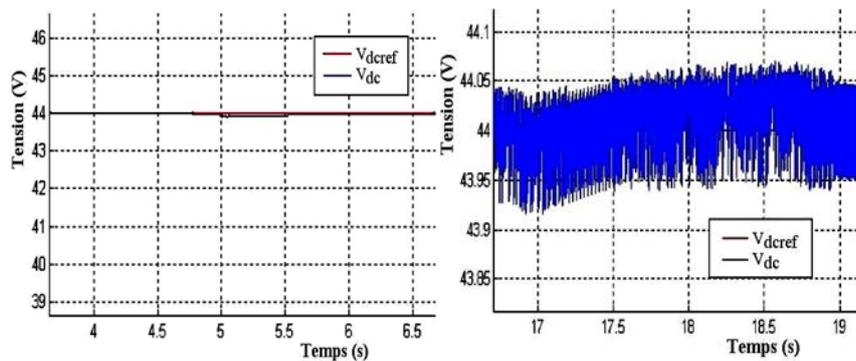


Figure. 4.14: Zoom de la tension redressée

- La vitesse du vent représentée en figure 15 sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [11]:

$$V_v (t) = 10 + 0.2 \sin (0.1047 t) + 2 \sin (0.2665 t) + \sin (1.2930 t) + 0.2 \sin (3.6645 t) \quad (4.36)$$

La figure 16 présente la tension à la sortie du redresseur, lorsqu'on applique une vitesse de vent, comme cela est représenté en figure 4.15.

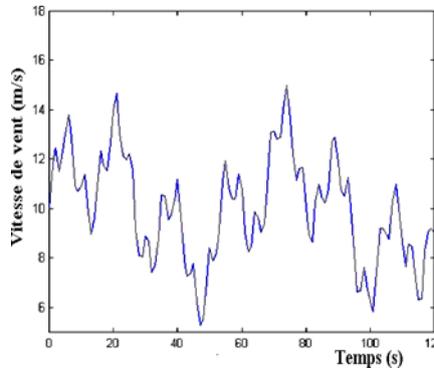


Figure. 4.15: Vitesse de vent = f (temps)

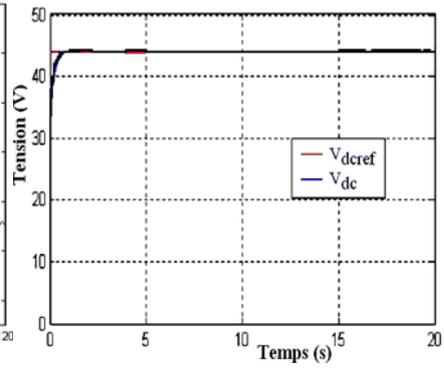


Figure. 4.16: Tension redressée = f (temps)

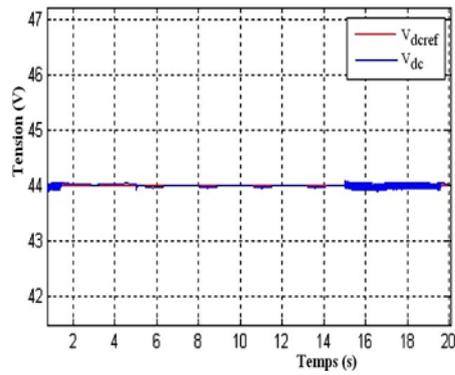


Figure. 4.17: Zoom de la tension redressée

A la lumière des résultats de simulation obtenus, nous concluons que la réponse de la tension à la sortie du redresseur (redressée) à une variation de vitesse est relativement rapide et ne dépasse pas 2 % de la valeur de référence, lors des perturbations.

4.5 CONCLUSION GENERALE

Dans cet mémoire, nous avons élaboré les modèles mathématiques des composantes du système de conversion d'énergie éolienne (modèles de la voilure, de la machine synchrone à aimants permanents et du redresseur MLI).

La loi commande du système a été détaillée. Les résultats des différentes simulations réalisées ont été commentés et ont permis de valider les modèles mathématiques du système éolien proposé.

L'objectif principal de ce mémoire était la modélisation et la commande directe de puissance d'une GSAP intégrer dans un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable.

Les résultats obtenus ont montré les performances dynamiques de cette commande (*DPC*) sous différents condition : facteur de puissance unitaire, échelon de tension, perturbation au niveau de l'alimentation.

Perspective pour du futur travail on des commandes :

- La command DPC avec à MLI vectorielle.
- Injection les raccordements du filtre active avec redresseur pour obtenir des courants sinusoïdaux purs.

REFERENCES

- [1] C. Alonso, '*Contribution à l'Optimisation, la Gestion et le Traitement de l'Energie*', Mémoire en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse III, Décembre 2003.
- [2] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud et H. Ben Ahmed, '*Aérogénérateurs Electriques*', Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3960, Novembre 2004.
- [3] F. Yassa, B. Batoun and R. Khaniche, '*Study of Wind Resources in Algeria Based upon Satellite Data*', International Conference on Ecological Vehicles & Renewable Energies, EVER'08, Monaco, March 27-30, 2008.
- [4] A. Mirecki, '*Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance*', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, 2005.
- [5] O. Gergaud, '*Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et Associé à un Accumulateur*', Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.
- [6] P. Mayé, '*Machines Electriques Industriels*', Dunod, Paris, pp179-344, 2005.
- [7] T. Wildi, S. Gilbert, '*Électrotechnique*', 4ème Édition, de Boeck, Canada, pp.643-646, 2005.
- [8] P. Mayé, « Aide-mémoire d'électrotechnique », Dunod, Paris, pp181-205, 2006.
- [9] D. Stoia, M. Cerant, K. Hameyer, D. Ban, '*Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors. Analysis and Design*', Dubrovnik, Croatia, October 2009.
- [10] T. Lubin, '*Modélisation et commande de la machine synchrone à réluctance variable, Prise en compte de la saturation magnétique*', Thèse de Doctorat de Nancy, Avril 2003.
- [11] R. Rajabi Moghaddam, '*Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design*', Master Thesis Of Royal Institute of Technology, Stockholm, 2007.
- [12] T. DING, '*Etude et Optimisation de Machines à Aimants Permanents à Démarrage Direct sur le Réseau (Study and Optimization of line-start Permanent Magnet Motors)*', Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I, Avril 2011.
- [13] Q. Lu, X. Huang, Y. Ye, Y. Fang, '*Three Phase Line Start Claw Poles Permanent Magnet Motor with Pole Changing Winding*', Zhejiang University, Revue. 88, no. 2, pp. 274-277, 2012.
- [14] C. Messier, '*Modélisation et Conception de Machines à Aimants Permanents Asynchrones Synchronisés à L'aide du Calcul des Champs*', Thèse doctorat de l'Université Laval, Août 1999.
- [15] T. MODEER, '*Modeling and Testing of Line Start Permanent Magnet Motors*', Licentiate Thesis Stockholm, Sweden, 2007.
- [16] L. Vido, '*Etude d'actionneurs électriques à double excitation destinés au transport. Dimensionnement de structures synchrones*', Thèse doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2005.

- [17] A. Nekoubin, *Design a Line Start synchronous Motor and Analysis Effect of the Rotor Structure on the Efficiency*, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 5, pp. 5-9, 2011.
- [18] T. Zawilak, J. Zawilak, *single-phase motor, synchronous motor, permanent magnet high efficiency motor*, Memoires scientifiques de l'Institut de machines électriques, lecteurs et mesures, Université de technologie de Wroclaw, 2012.
- [19] S.Chelling, « Impact des Fermes Eoliennes sur la Stabilité De Tension Dédicaces », Mémoire de Magister, Université de Ferhat abbas, Sétif, 2012.
- [20] Nadia, O.Labussiere, « Accebilité sociale et planifiction territoriale, éléments fe réflexion à partir de l'éolien et du stockage du CO2 », pp.45-60, 2010.
- [21] Perves, « Assessment of the LTECV and of the 2016/2018 PPE within the perspective Of the 2018/2023 PPE », 2018.
- [22] Y.Lautre, «Agir pour la transition énergétique en France: Faut-il multiplier les Panneaux solaires, ou les vélos ? », 2019.
- [23] S.Aissou, M.Zinet, « Identification et Caractérisation D'un Système Photovoltaïque», Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Béjaia, 2012.
- [24] H.Atmania, « Hanane. La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie : Cas de la photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Mohamed Ben Ahmed, Oran, 2015.
- [25] O.Feddaoui, « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération: Application aux Energies Renouvelables », Mémoire de Magister. Université Mohamed Chérif Messaadia, Souk-Ahras, 2014.
- [26] A.Omri, « Analyse de la transition vers les énergies renouvelables en Tunisie: Risques, enjeux et stratégies à adopter », Thèse de doctorat. Université de Sfax, Tunisie, 2016.
- [27] S.Boudia, « Optimisation de l'évaluation temporelle du gisement énergétique éolien par simulation numérique et contribution à la réactualisation de l'atlas des vents en Algérie », Thèse de Doctorat, Université de Abou-Bakr Belkaid ,Tlemcen, 2013.
- [28] H.Hassini, «Modelisation, Simulation et Optimisation d'un Systeme Hybride Eolien- Photovoltaïque», Mémoire de Magister, Université de Abou-Bakr Belkaid ,Tlemcen, 2010.
- [29] L.Hamadha, K.Slama, « Évaluation du gisement énergétique éolienne de la région des Hauts-plateaux », Mémoire de Master, Université Ahmed Draia, ADRAR, 2017.
- [30] M.Benmedjahed, « Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement »,Thèse de Doctorat, Université de Abou-Bakr Belkaid ,Tlemcen, 2013.
- [31] N. Touama, « Évaluation du gisement éolien en Algérie à l'aide du logiciel

- RETSscreen», Mémoire de Master, Université Mohamed BOUDIAF, M'Sila, 2018.
- [32] D.Zebiri, Z.Bardjlaghi, «Etude et simulation du gisement du vent sur le Site d'Adrar», Mémoire de Master, Université Ahmed Draia, ADRAR, 2014.
- [33] D.Weisser, « A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the 'Weibull' density function», pp. 1803-1812,2003.
- [34] M. Gökçek, « A. Bayülken, and Ş. Bekdemir, Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kirklareli», pp. 1739-1752, 2007
- [35] Troen, E.Petersen, « European wind atlas»,pp 657,1989
- [36] I.Griche, «Etude de la stabilité transitoire des systèmes électriques en présence des fermes éoliennes», Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS, SETIF,2008.
- [37] T.Tafticht, « Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien», Thèse Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières,2006.
- [38] M.Addour, L.Allouti, « Etude et maximisation d'un système éolien»,Mémoire de Master, Université abderrahmane mira, Béjaia,2013.
- [39] R. Cardenas-Dobson, '*Control of Wind Turbine Using a Switched Reluctance Generator*', PhD Thesis, University of Nottingham, 1996.
- [40] G. Sturtzer et E. Smichel, '*Modélisation et Commande des Machines Triphasés*', Edition Ellipses, 2000.
- [41] R. Abdessemed et M. Kadjoudj, '*Modélisation des Machines Electriques*', Presses de l'Université de Batna, 1997.
- [42] A.S. Toledo, '*Commande Directe et Observation des Convertisseur de Puissance : Application à l'Onduleur de Tension Triphasé*', Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Institut National Polytechnique, Grenoble, 2000.
- [43] Communication, '*Les Machines Synchrones et leurs Applications Industrielles*', Journées de l'Enseignement, de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle, SEE-MAFPEN, Gif-sur-Yvette, Mars 1995.
- [44] A. Mirecki, X. Roboam and F. Richardeau, '*Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines*', IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 54, N°1, 2007.
- [45] A.M. Knigh and G.E. Peters, '*Simple Wind Energy Controller for an Expanded Operating Range*', IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, N°2, pp. 459- 466, 2005.