



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :

BELHADJ EZZINE Soufiane

Thème :

Extraction de la puissance maximale d'un générateur éolien alimentant une charge isolée

Président :	Pr. R. Ibtouen	Ecole Nationale Polytechnique
Rapporteurs :	Pr. S. Mekhtoub	Ecole Nationale Polytechnique
	M. Imadouchene	U. M.M
Examineurs :	Pr. O. Touhami	Ecole Nationale Polytechnique
	Dr. R. Tahmi	Ecole Nationale Polytechnique

ENP 2014

ملخص

هذا العمل ينص على التعريف بالخصائص الكهربائية للمولد الكهربائي اللامتزامن ذو قفص السنجاب و تمثيل المولد في النظامين الخطي و المشبع ، نقوم بعدها بالتحقق من قيم التوتر و التيار الخاصين بالاشتعال الذاتي للمولد بالمحاكاة، في الأخير ننهي عملنا بمحاكاة وصل الشبكة بالمولد اللامتزامن و التي سنقارنها بعدها بالنتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية : المولد اللامتزامن ، قفص السنجاب ، المحاكاة ، التمثيل ، نظام خطي ، نظام مشبع، الاشتعال الذاتي ، الحمل المقاوم

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de la machine asynchrone à cage d'écureuil et l'élaboration d'un modèle en saturé. La validation du modèle passera par la comparaison des résultats expérimentaux et de simulations sur l'auto-amorçage. Puis, nous présenterons les simulations du fonctionnement en autonome du générateur asynchrone alimentant une charge résistive et inductive. On terminera par la modélisation et la commande de la turbine éolienne.

Mots clés : Turbine éolienne, génératrice asynchrone, cage d'écureuil, identification, modélisation, simulation, régime saturé, auto-amorçage, fonctionnement autonome, isolé, charge résistive, charge inductive.

Abstract

This thesis focuses on the study of squirrel cage induction generator. A model has been developed in magnetic saturation. Model validation will be by comparing experimental results and simulations on self-seed and connection to the local grid. Then, we present simulations of stand-alone operation of the asynchronous generator supplying a resistive and inductive load.

Key words: Wind turbine, Asynchronous generator, squirrel cage, identification, modeling, simulation, saturated, self-priming, stand-alone operation, grid connection, resistive load, inductive load.

Remerciements

On tient à exprimer vivement notre profonde gratitude à Monsieur S. MEKHTOUB, enseignant au département génie électrique de l'école nationale polytechnique, et M. IMADOUCHENE pour avoir encadré ce sujet de thèse.

Nous adressons nos vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Egalement nous tenant à présenter notre profonde reconnaissance à tous les enseignants de l'ENP qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

À toute ma famille,

À tous mes amis,

À ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études,

Je dédie ce travail.

BELHADJ EZZINE Soufiane

Table des matières

Liste des symboles et abréviations	
Introduction générale	2
Chapitre I :	Rappels sur l'énergie éolienne
1. Introduction	4
2. Le Vent, Principe et Limites de l'éolien	4
3. Fonctionnement général et chaîne de conversion éolienne	5
4. Types d'éoliennes	6
4.1 Eoliennes à axe vertical	6
4.2 Eoliennes à axe horizontal	7
5. Aérogénérateurs connectés au réseau	9
5.1 Machine Synchrone	9
5.1.1 Machine synchrone à aimants permanents connectée au réseau	10
5.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un redresseur	10
5.1.3 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un convertisseur 4 Quadrants	10
5.1.4 Machine synchrone multipolaire	11
5.2 Machine asynchrone	11
5.2.1 Machine asynchrone à cage à vitesse fixe	11
5.2.2 Machine asynchrone à cage avec convertisseur de fréquence	12
5.2.3 Machine asynchrone à rotor bobiné (dissipation de la puissance)	13
5.2.4 Machine asynchrone double alimentation (récupération de la puissance)	13
6. Aérogénérateurs isolés	13
6.1 Machine synchrone à aimants permanents en éolien isolée	14
6.1.1 MSAP en Association avec un redresseur	14
6.1.2 MSAP association redresseur et hacheur	14
6.2 MAS à cage en éolien isolé	15
6.2.1 MAS auto-excitée par une batterie de condensateur fixe	15
6.2.2 MAS avec capacités de compensation série	15
6.2.3 MAS avec batterie de condensateurs commandés	15
6.2.4 MAS et STATCOM	16
6.2.5 MAS et Convertisseurs unidirectionnels	16
6.2.6 Convertisseurs bidirectionnels (à MLI)	17
7. Vitesse fixe / vitesse variable :	17
8. Conclusion	19
Chapitre II :	Modélisation et Etude du fonctionnement de la génératrice à cage
1. Introduction	21
2. Modélisation de la MAS à cage	21
2.1 Equations électriques générales de la machine	21
2.2 Modèle diphasé équivalent de la machine asynchrone (modèle de R.H)	23

Park)	
2.3 Expression du couple électromagnétique de la machine	27
2.4 Modèle de la machine asynchrone à cage en saturé	27
3. Auto-amorçage de la MAS à cage	31
3.1 Principe de l'auto-amorçage	31
3.2 Modèle de l'auto-amorçage (machine et banc de capacités associé)	36
3.3 Essais expérimentaux et simulations d'auto-amorçage	36
4. Fonctionnement en charge de la MAS, en isolé sur charge purement résistive	38
4.1 Modèle du système et de la charge résistive	38
4.2 Résultats de simulation	38
5. Fonctionnement en charge, en isolé, sur charge réelle	40
5.1 Modèle du système et de la charge réelle	40
5.2 Résultats de Simulation	40
6. Conclusion	42
Chapitre III : Modélisation et stratégie de commande de la turbine éolienne	
1. Introduction	44
2. Modélisation du vent	44
3. Modélisation de la turbine éolienne	45
3.1. la puissance d'une eolienne	45
3.2. la conversion aerodynamique	45
3.3. coefficient de puissance	46
4. Multiplicateur de vitesse	47
5. Equation dynamique de la turbine	48
6. schéma bloque du modèle de la turbine	48
7. Commande de la turbine	49
8. Mode de fonctionnement de la turbine	50
9. Principe de la technique MPPT	51
9.1. Méthode de recherche du point maximum de puissance	52
9.1.1. maximisation de puissance sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure	52
9.1.2. MPPT avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.	52
10. résultats de la simulation.	53
11. Conclusion.	55
Conclusion générale	57
Bibliographie	

Liste des symboles et abréviations

MAS	Machine Asynchrone
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MS	Machine synchrone
MSAP	Machine synchrone
MCC	Machine à courant continu.
f. e. m	Force électromotrice.
f. m. m	Force magnétomotrice.
s, r	Indices respectifs du stator et du rotor de la machine asynchrone à cage.
a, b, c	Les trois phases du rotor.
d, q	l'axe direct et l'axe en quadrature dans le référentiel de R.H.Park
Φ_{sabc}, Φ_{rabc}	Flux total par phase statorique respectivement rotorique.
v_{sabc}, v_{rabc}	Tension par phase statorique respectivement rotorique.
i_{sabc}, i_{rabc}	Courant par phase statorique respectivement rotorique.
R_s, R_r	Résistance d'une phase statorique respectivement rotorique.
L_s, L_r	Inductance propre statorique, respectivement rotorique.
l_s, l_r	Inductance de fuite statorique respectivement rotorique.
M_s, M_r	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques respectivement rotorique.
R'_r	Résistance d'une phase rotorique ramené au stator.
l'_r	Inductance de fuite d'une phase rotorique ramené au stator.
m_{sr}	Inductance mutuelle maximum entre une phase statorique phase rotorique.
\mathcal{L}_s	Inductance cyclique d'une phase statorique.
\mathcal{L}_r	Inductance cyclique d'une phase rotorique.
\mathcal{M}	Inductance cyclique mutuelle.
θ_s	L'angle électrique entre l'axe direct et celui du stator.
θ_r	L'angle électrique entre l'axe direct et celui du rotor.
θ	Angle électrique entre l'axe du stator et celui du rotor.
ω_s, ω_r	La pulsation statorique respectivement rotorique.
ω	Pulsation électrique.
v_{sp}, v_{rp}	Tension statorique respectivement rotorique par Park.
i_{sp}, i_{rp}	Courant statorique respectivement rotorique par Park.
v_{sd}, v_{sq}	Composantes de la tension statorique suivant l'axe direct, et quadrature.
v_{rd}, v_{rq}	Composantes de la tension rotorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
i_{sd}, i_{sq}	Composantes du courant statorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
i_{rd}, i_{rq}	Composantes du courant rotorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
Φ_{sd}, Φ_{sq}	Composantes du flux statorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
Φ_{rd}, Φ_{rq}	Composantes du flux rotorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
i_{md}, i_{mq}	Composantes du courant magnétisant suivant l'axe direct, et quadrature.
Φ_{md}, Φ_{mq}	Composantes du flux magnétisant suivant l'axe direct respectivement quadrature.

i_m	Le courant magnétisant.
Φ_m	Le flux magnétisant.
M_{st}	L'inductance magnétisante statique.
M'_{st}	L'inductance magnétisante dynamique.
M_d	L'inductance magnétisante suivant l'axe direct.
M_q	L'inductance magnétisante suivant l'axe quadratique.
M_{dq}	Inductance d'effet croisé.
Z_s	Impédance d'une phase statorique.
Z_r	Impédance d'une phase rotorique.
Z_m	Impédance de la branche magnétisante.
Z_g	Impédance totale d'une phase de la génératrice.
Z_c	Impédance d'un condensateur.
Z_{tot}	Impédance totale.
C	Capacité par phase.
g	Le glissement.
$[p(\theta)]^{-1}$	La matrice de Park.
C_{em}	Couple électromagnétique
C_p	Coefficient de puissance

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont perçues comme étant celles sur lesquelles pourra se baser le développement socio-économique de nombreux pays dépourvus de ressources énergétiques conventionnelles. Leurs applications se multiplient et les évolutions techniques permettent d'atteindre des niveaux de puissance de plus en plus élevés.

La capacité mondiale de production d'énergie d'origine éolienne était de 318,137 GW à la fin de l'année 2013. En dix ans, la capacité de production a été multipliée par 10 (39,4 GW en 2003) [1].

Les machines électriques qui équipent les éoliennes sont souvent des machines asynchrone soit à cage d'écureuil, soit à rotor bobiné. Notre travail se propose d'étudier la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un fonctionnement raccordé au réseau et dans un fonctionnement en mode isolé. Notre étude se divise en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous ferons un rappel de l'éolien, nous aborderons les types d'éoliennes et les types de génératrices électriques qui leurs sont adjointes, ainsi que les différentes associations de convertisseurs d'électronique de puissance. On s'intéressera aux topologies électriques d'une part, pour les aérogénérateurs connectés au réseau, et d'autre part pour ceux prévus pour fonctionner en mode isolé.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéresserons à la machine asynchrone à cage. Après une brève description de sa constitution et de son principe de fonctionnement nous passerons à l'identification de la machine.

Dans le troisième chapitre, nous suivrons les étapes de la modélisation du générateur asynchrone qui conduiront au modèle qui prend en compte l'effet de la saturation magnétique. En utilisant les paramètres issus de l'identification on réalisera les simulations sur le logiciel MATLAB du fonctionnement de la machine pour l'auto-amorçage et le raccordement au réseau, et nous comparerons les résultats aux relevés expérimentaux pour valider le modèle. Enfin, on présentera les résultats des simulations pour un fonctionnement du générateur en isolé, sur une charge résistive, puis sur une charge réelle, on terminera par une conclusion.

CHAPITRE I

Rappels sur l'énergie éolienne

1. Introduction

Dans ce chapitre nous commencerons par une description des différentes éoliennes. Nous détaillerons ensuite les éoliennes à axe horizontal et les types de machines utilisées comme génératrice. On rappellera les différentes associations des convertisseurs statiques utilisés avec ces générateurs.

2. Le Vent, Principe et Limites de l'éolien

L'énergie du vent a été utilisée par l'homme depuis des millénaires pour faire avancer les bateaux puis des éoliennes ont été inventées pour moulin du grain, l'énergie cinétique du vent était alors transformée en énergie mécanique seulement. En 1891 le danois "Poul Lacour" a réalisé une turbine éolienne qui génère de l'électricité en l'associant à une dynamo [2], l'aérogénérateur. Depuis, les technologies ne cessent d'évoluer que ce soit pour le type de turbine, ou celui des machines électriques utilisées ou pour leurs commande.

Le vent résulte du mouvement des masses d'air dû aux différentiels de pression créés par les différences de températures (réchauffement inégal des masses d'air) engendrées par l'absorption des rayonnements solaires et le mouvement de rotation de la planète. Les vents diffèrent selon la localisation géographique et la période saisonnière, ses vitesses sont mesurées avec un anémomètre et sont classées en 12 catégories, selon l'échelle de Beaufort, d'un vent calme (moins de 1 m/s) à l'ouragan (plus de 32,5 m/s).

Une éolienne n'est efficace qu'à partir d'une moyenne annuelle de vitesse du vent supérieure à 5 m/s et est mise à l'arrêt pour des raisons de sécurité du matériel et de limites techniques à partir de 25 m/s.

L'énergie du vent a beau être gratuite, inépuisable et non polluante, son exploitation dans l'éolien présente des inconvénients communs à toutes les énergies dites renouvelables. L'Intermittence (dépend des rafales de vent), et les pics de consommation de l'énergie produite ne coïncident pas toujours avec les pics de production ce qui est un vrai casse-tête pour les producteurs d'énergie. De plus les éoliennes sont bruyantes et s'imposent dans le paysage. D'autres paramètres sont aussi à prendre en compte avant l'installation d'éoliennes : l'existence d'obstacles, les turbulences, la direction qui fournit le maximum d'énergie, les durées où le vent souffle dans cette direction. De ce fait, une étude à priori du site d'implantation est nécessaire.

3. Fonctionnement général et chaîne de conversion éolienne

Le fonctionnement général est illustré par la Figure I.1. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines divers et intègre des concepts aérodynamiques, mécaniques, électriques et électroniques. Les topologies dépendent des types de génératrices électriques et de turbines éoliennes mais le principe de conversion reste le même. L'énergie cinétique du vent est captée par les pales de l'aérogénérateur qui se mettent en mouvement et transmettent cette énergie mécaniquement à un arbre qui entraîne à son tour le rotor d'une génératrice électrique, voir figure ci-dessous.

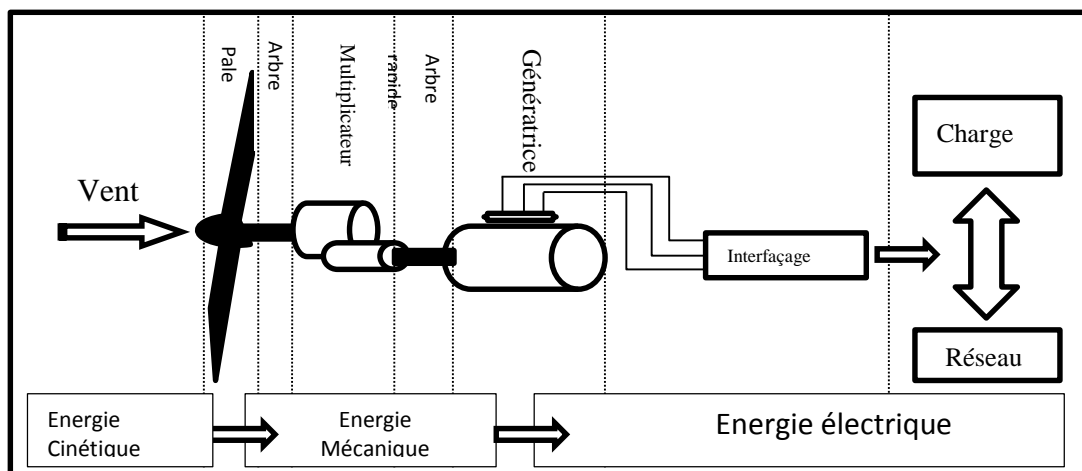


Fig.I.1. Chaîne de conversion éolienne

Plusieurs caractéristiques et concepts technologiques permettent de classer les différentes sortes d'aérogénérateurs [2-6]. La position de leur axe par rapport au sol, leur vitesse de rotation lente ou rapide, leur nombre de pales, la puissance qu'ils fournissent...

Les éoliennes selon leur puissance sont classées en trois catégories [7,8].

Puissance	Diamètre de la voilure	
Moins de 40kW	Moins de 12 m	Petite puissance
Entre 40kW et quelques centaines de kW	12 m à 45 m	Moyenne puissance
Supérieure à 1MW	46 m et plus	Grande puissance

D'autres classements considèrent que le petit éolien s'exprime dans des gammes de puissance de 1 kW à 100kW. Pour des puissances inférieures à 1 kW, on parle de micro et de mini éolien.

Dans ce qui suit nous nous contenterons de classer les aérogénérateurs selon leur axe, puis explorerons l'architecture des aérogénérateurs à axe horizontal tripales.

4. Types d'éoliennes

On peut classer les éoliennes selon la disposition géométrique de leur axe de rotation de l'arbre. La disposition de la turbine par rapport au sol permet de distinguer les aérogénérateurs à axe vertical et les aérogénérateurs à axe horizontal. Les éoliennes à axe vertical, dû à leur faible rendement aérodynamique ainsi qu'aux fluctuations élevées de la puissance électrique générée, ont été progressivement abandonnées [3]. De nos jours, les éoliennes commerciales sont toutes ou presque à axe horizontal.

4.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ne disposent pas d'un système d'orientation par rapport au vent. Elle possède l'énorme avantage de pouvoir capter des vents très faibles, ce qui en fait un excellent moteur pour le pompage de l'eau. En revanche, en ce qui concerne la production électrique, elles sont moins performantes que les modèles à axe horizontal. Les deux types d'éoliennes à axe vertical parvenus au stade de l'industrialisation sont le type "Savonius" et le type "Darrieus"[3]. Le rotor de Darrieus a donné naissance à différentes variantes illustrées au côté du rotor de Savonius sur la Figure.I.2.



Fig.I.02. Eoliennes à axe vertical:

En haut Savonius [4], en bas de gauche à droite Darrieus, Darrieus H [9], Darrieus Hélicoïdal [10]

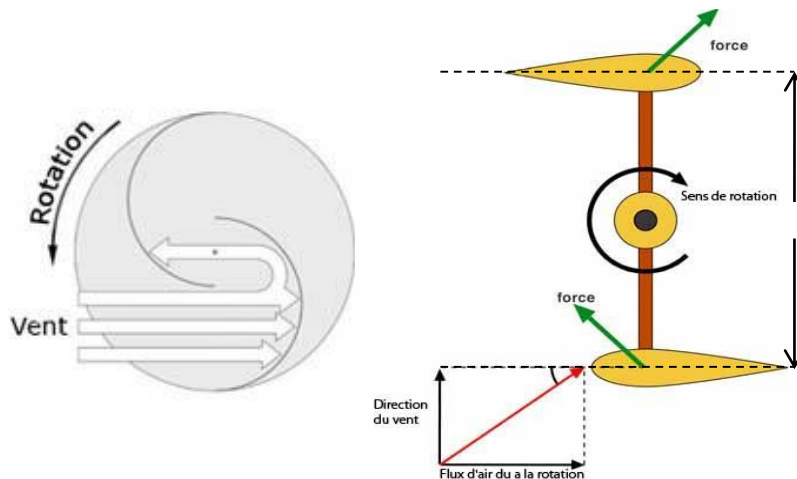


Fig.I.03. Principe de fonctionnement à gauche "Savonius" à droite "Darrieus"

Le rotor de Savonius repose sur le principe de la traînée différentielle ou les efforts d'intensités différentes sont exercés par le flux d'air sur les surfaces de plusieurs demi-cylindres creux et engendre un couple moteur d'entraînement. Celui de Darrieus exploite le principe aérodynamique de variation cyclique d'angle d'incidence qui suppose qu'un profil aérodynamique dans un flux d'air subit des forces d'intensité et de direction variables selon l'angle dans lequel il est placé ; ce qui engendre un couple moteur proportionnel au diamètre de l'éolienne.

Ces éoliennes présentent l'avantage d'avoir une turbine et un générateur proches du sol et donc faciles d'accès pour les opérations de maintenance. Cet état de fait les rend sensibles aux turbulences d'une part, et leur rendement est moins bon (les vents à proximité du sol sont faibles), d'autre part elles occupent des superficies assez importantes pour les grandes puissances. Les éoliennes munies d'un rotor de type Darrieus ne démarrent pas seules, elles comportent un dispositif d'entraînement pour le démarrage. Elles subissent des contraintes mécaniques très fortes et sont sujettes à des problèmes d'aéroélasticité. Elles ont été progressivement abandonnées par les constructeurs qui se sont dirigés vers les éoliennes à axe horizontal.

4.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (les plus courantes sont à hélices) permettent un rendement élevé. L'axe de rotation de ces éoliennes est placé horizontalement par rapport au sol. Elles sont montées sur pylônes et possèdent un système d'orientation dans le vent. Elles ont également deux types de rotation: Lente et Rapide. Les lentes comportent généralement un grand nombre de pales et fonctionnent à de faibles vitesses de vent et ne servent quasiment

qu'au pompage de l'eau. Les Rapides ont un petit nombre de pales (une à quatre pales) et sont utilisées pour la production d'électricité.

Les systèmes à trois pales sont les plus répandus. Ils possèdent un bon rendement théorique mais est moins résistant aux vents forts que les modèles à axe vertical.

La structure d'une éolienne tripale est constituée d'une tour (le Mât) au sommet de laquelle se trouve la nacelle. La fondation est l'ensemble qui fixe la structure de l'éolienne au sol, le mât permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour lui permettre d'être entraîné par un vent plus fort et régulier. Au niveau du sol, il abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques. La nacelle contient les composants mécaniques, la génératrice électrique et certains composants électroniques et certaines nacelles tournent pour orienter les pales dans la direction du vent.

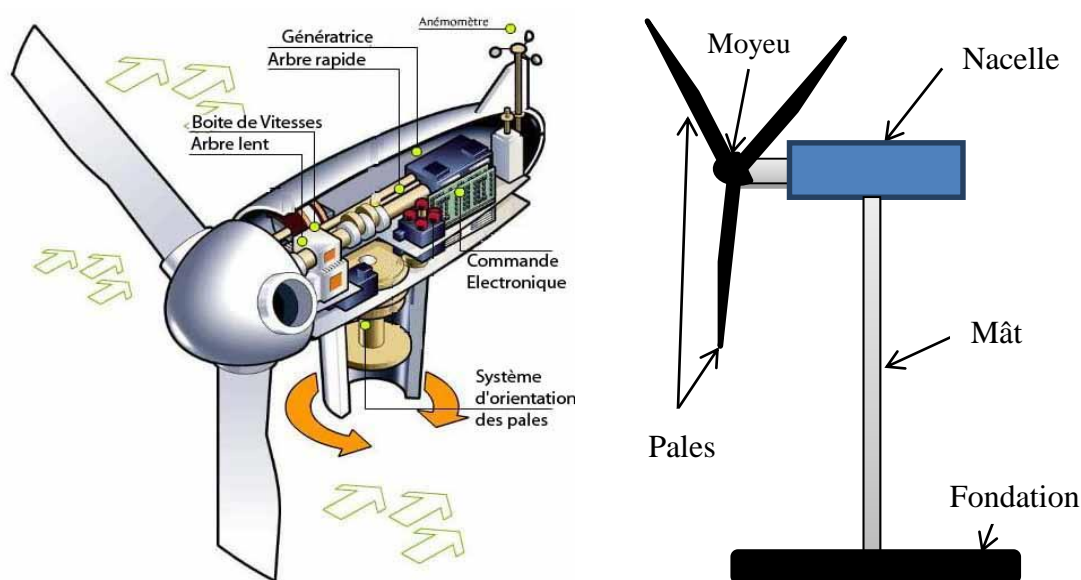


Fig.I.4 .Schéma d'une éolienne tripale

La turbine est munie des pâles fixes ou orientables dotées d'un profil aérodynamique qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

Le moyeu : reçoit les pales et se monte sur l'arbre lent d'entrée du multiplicateur. Il est pourvu d'un système d'orientation des pales pour réguler la vitesse de rotation.

L'arbre lent ou primaire : relie le moyeu au multiplicateur.

Le multiplicateur: boîte de vitesse qui adapte la vitesse mécanique de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

L'arbre rapide ou secondaire: relie le multiplicateur à la génératrice électrique.

La génératrice électrique : se charge de la conversion mécanique-électrique (le plus souvent une machine synchrone ou une machine asynchrone à cage ou à double alimentation).

Le système d'orientation des pâles : sert au réglage aérodynamique et à la régulation de la puissance.

En plus de ce qui a été cité l'éolienne comporte un système de refroidissement sous forme de radiateur d'eau ou d'huile qui refroidit le multiplicateur qui subit un échauffement dû à l'effort mécanique ou de ventilateurs pour refroidir la génératrice, un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent et une électronique prévue pour contrôler le fonctionnement (démarrage, freinage...) et les mécanismes d'orientation (orientation de la nacelle, orientation des pales).

5. Aérogénérateurs connectés au réseau

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones.

5.1 Machine Synchrone

Les machines synchrones classiques sont utilisées dans la production d'électricité par éoliennes dans une gamme de puissance allant de 500kW à 2MW [5]. Lorsqu'elles sont directement connectées au réseau, la vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau, un des principaux inconvénients est que les fluctuations du couple captées par les pales de l'éolienne en premier lieu se propagent sur l'arbre et se font ressentir sur la puissance électrique produite. Ceci est la raison pour laquelle les MS ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs connectés directement au réseau, mais elles sont raccordées au réseau via des convertisseurs d'électronique de puissance qui permettent le découplage de la vitesse de rotation de la machine et de la fréquence du réseau. La vitesse par conséquent peut varier de manière à optimiser le rendement aérodynamique et à amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes de la MS fonctionnent à des vitesses faibles et peuvent être directement couplées à la turbine sans passer par un multiplicateur.

Les figures suivantes représentent les différentes configurations les plus courantes pour les machines synchrones utilisées comme générateurs dans les systèmes éoliens [13] :

5.1.1 Machine synchrone à aimants permanents connectée au réseau

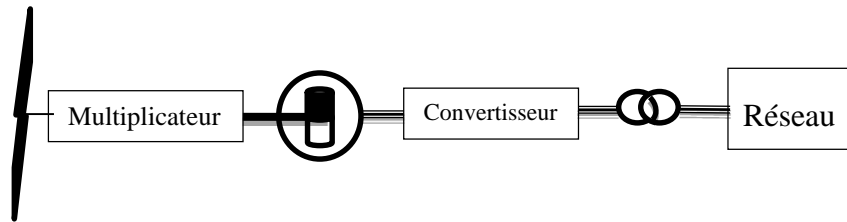


Fig.I.5. MSAP Connectée au réseau

Cette configuration utilise une machine synchrone à aimants permanents. La totalité de la puissance est commandée, cette machine est utilisée dans les éoliennes de moins de 20 kW [5].

5.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un redresseur

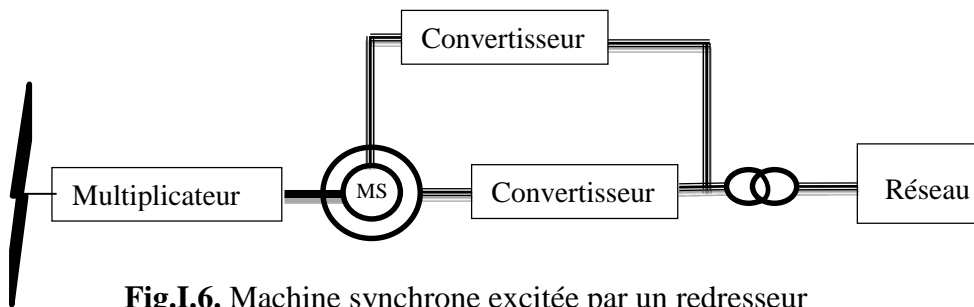


Fig.I.6. Machine synchrone excitée par un redresseur

La MS est excitée par un redresseur ce qui implique le besoin d'un circuit d'excitation, de bagues (système à entretenir) et d'une stratégie de commande plus complexe que pour la machine à aimants.

5.1.3 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un convertisseur 4 Quadrants

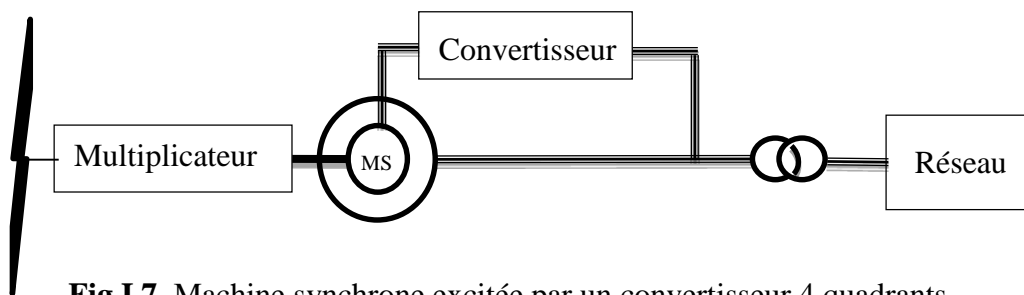


Fig.I.7. Machine synchrone excitée par un convertisseur 4 quadrants

Avec un convertisseur à 4 quadrants cette configuration permet un fonctionnement à vitesse variable.

5.1.4 Machine synchrone multipolaire

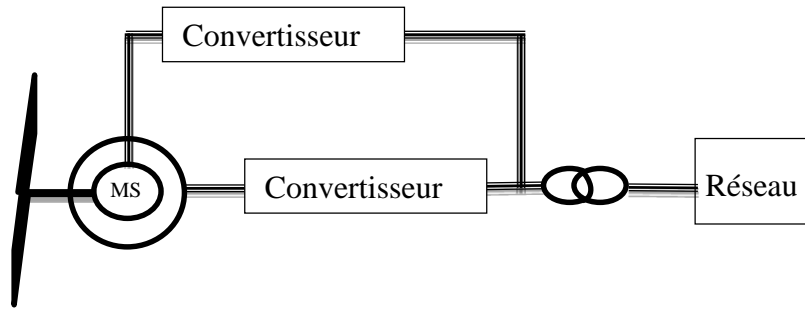


Fig.I.8. Machine synchrone Multipolaire

Avec une machine synchrone multipolaire on peut alors se passer de multiplicateur.

5.2 Machine Asynchrone

Grâce à la variation du glissement entre le flux du stator et la vitesse du rotor, la connexion directe de la machine asynchrone au réseau est plus douce. Les machines à induction équipent la plus part des éoliennes à vitesse fixe.

L'introduction des convertisseurs de l'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau permet au même titre que pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine et de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable. Cependant l'inconvénient de la machine asynchrone par rapport à la machine synchrone est la consommation de la puissance réactive et le courant de démarrage élevé, problèmes auxquels on peut répondre grâce à l'électronique de puissance. La machine asynchrone à cage, quant à elle, a un nombre de paires de pôles fixe et fonctionne donc sur une plage de vitesse très limitée : le glissement est de l'ordre de quelques %.

Les figures suivantes illustrent les topologies les plus utilisées dans les aérogénérateurs avec machine asynchrone :

5.2.1 Machine asynchrone à cage à vitesse fixe

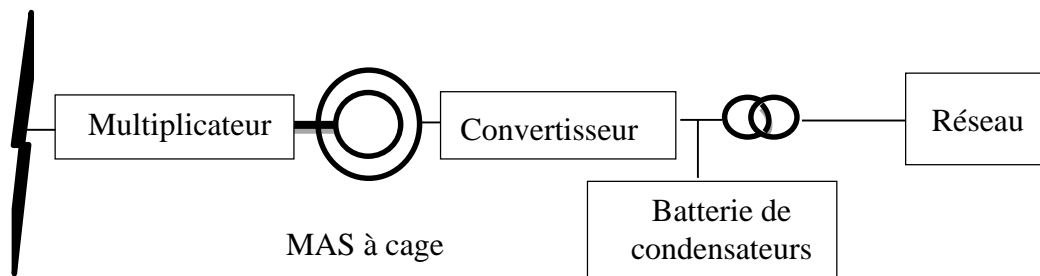


Fig.I.9. MAS à cage à vitesse fixe

Cette figure présente une configuration où l'éolienne fonctionne à vitesse fixe avec une machine asynchrone à cage d'écuréuil. La batterie de condensateurs sert à compenser la puissance réactive et le convertisseur d'électronique de puissance à adoucir le raccordement au réseau.

5.2.2 Machine asynchrone à cage avec convertisseur de fréquence

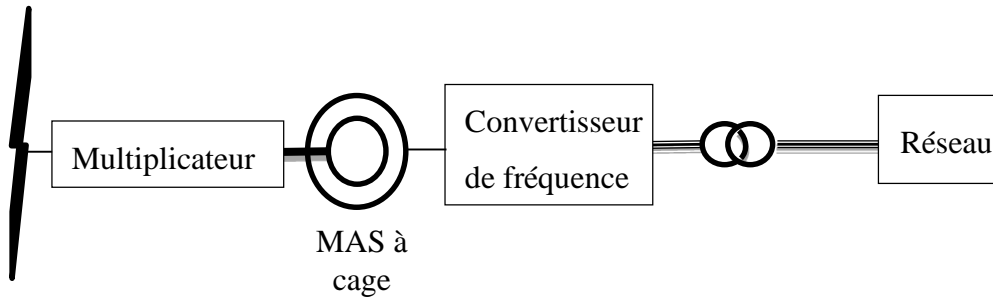


Fig.I.10. Machine Asynchrone à cage avec convertisseur de fréquence

Les convertisseurs de fréquence remplissent la fonction de la batterie de condensateurs et des convertisseurs du premier montage. L'avantage étant de faire varier la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent.

5.2.3 Machine asynchrone à rotor bobiné (dissipation de la puissance)

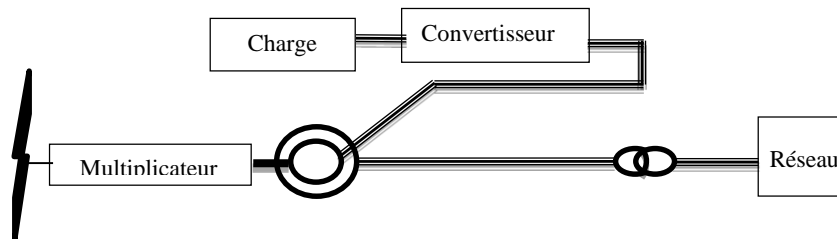


Fig.I.11. Machine Asynchrone à rotor bobiné
(Dissipation de la puissance rotorique)

La résistance rotorique est contrôlée au moyen de résistances insérées dans le circuit par l'intermédiaire d'un convertisseur d'électronique de puissance et permet ainsi d'intervenir sur le glissement de la machine.

5.2.4 Machine asynchrone double alimentation (récupération de la puissance)

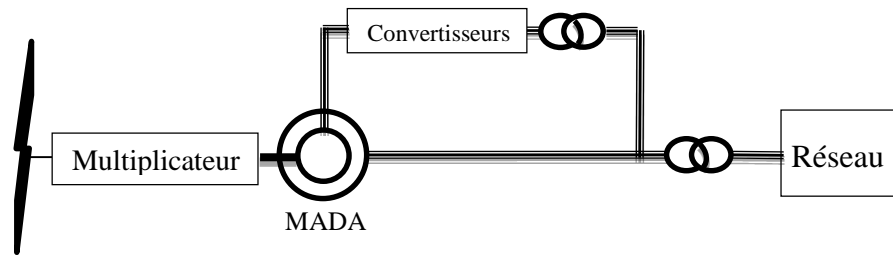


Fig.I.12. MADA récupération de la puissance

Un convertisseur de fréquences commande directement les courants dans les enroulements du rotor, ceci permet de contrôler la puissance de sortie de la machine. C'est une cascade qui permet la récupération de l'énergie rotorique. Le transformateur permet l'isolation galvanique et l'adaptation (contrôle de la vitesse).

6. Aérogénérateurs isolés

Les aérogénérateurs fonctionnant en mode autonome alimentent des zones d'habitation ou des systèmes de télécommunication isolés mais la plus grande partie des aérogénérateurs sont connectés à des réseaux électriques [5].

Les éoliennes non raccordées au réseau alimentent des charges isolées avec éventuellement un ou plusieurs groupes électrogènes en appui. Pour cette configuration, le recours à un système de stockage présente un intérêt en cas d'absence de groupes électrogènes, notamment en cas de vent faible. Le recours à des batteries est utile pour le stockage d'énergie à long terme. La génératrice utilisée pour un fonctionnement en isolé est souvent une machine synchrone à aimants permanents qui comporte l'énorme avantage de se passer d'un circuit d'excitation par rapport à la machine synchrone à rotor bobiné. Laquelle aura qui nécessairement aura besoin d'une batterie pour son circuit d'excitation mais dont le prix revient quand même moins élevé.

La machine asynchrone présente un bon compromis coût/performances avec ses qualités reconnues de robustesse et de tolérance aux surcharges, mais néanmoins ne peut se défaire d'un dispositif lui fournissant l'énergie réactive indispensable à sa magnétisation. Un certain nombre de travaux scientifiques a été consacré à l'étude des montages destinés à un

fonctionnement autonome de la machine asynchrone à cage en génératrice pour l'éolien [14,15,16], dans ce qui suit nous présenterons brièvement quelques-unes des configurations des éoliennes prévues pour un fonctionnement en isolé en détaillant davantage celles des machines asynchrones à cage.

6.1 Machine synchrone à aimants permanents en éolien isolée

6.1.1 MSAP en Association avec un redresseur

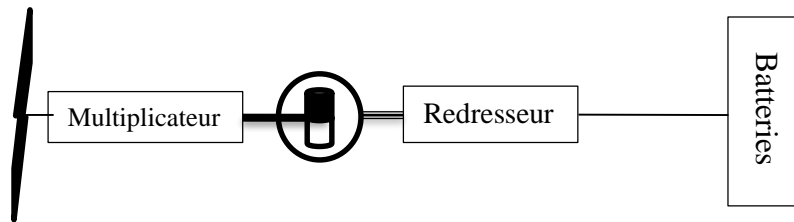


Fig.I.13. MSAP et Redresseur

La machine synchrone est associée à un redresseur. Il peut être simple à diodes dans le cas des petites puissances ou un redresseur commandé en MLI qui permettra un contrôle de la vitesse ou du couple mais cette commande nécessite un capteur de position.

6.1.2 MSAP association redresseur et hacheur

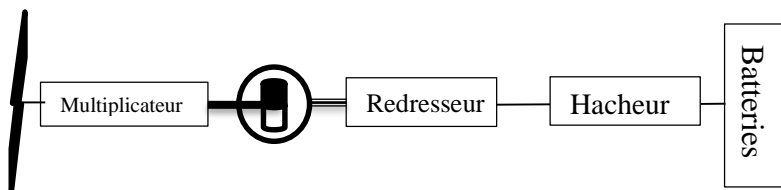


Fig.I.14. MSAP avec redresseur et hacheur

Pour pouvoir effectuer un contrôle de vitesse de la MSAP afin d'optimiser le rendement du système éolien en fonction de la vitesse du vent (MPPT), on adjoint au redresseur à diodes, un hacheur.

6.2 MAS à cage en éolien isolé

6.2.1 MAS auto-excitée par une batterie de condensateur fixe

Une batterie de condensateurs est connectée en parallèle à la charge. Les condensateurs sont connectés en étoile ou en triangle voir figure ci-dessous.

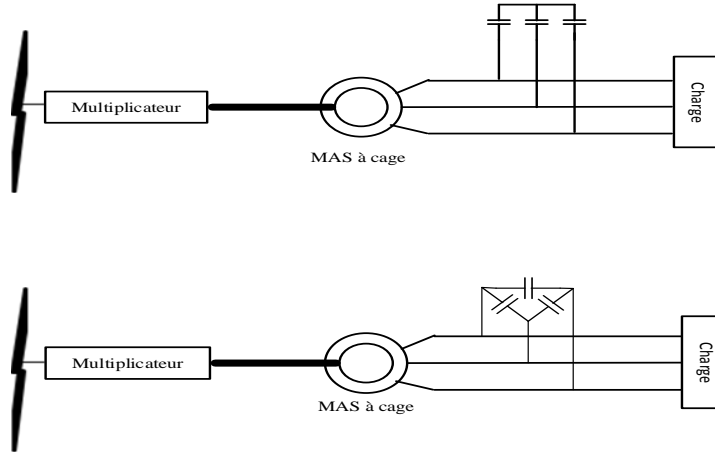


Fig.I.15. MAS avec Banc de condensateurs

6.2.2 MAS avec capacités de compensation série :

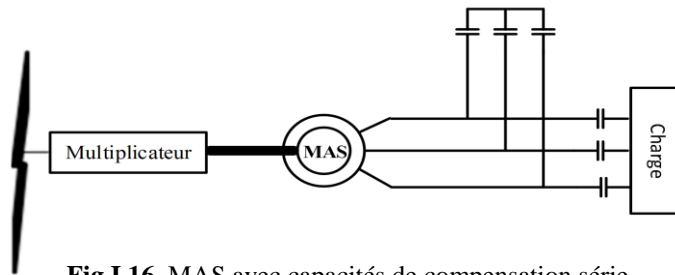


Fig.I.16. MAS avec capacités de compensation série

Dans cette configuration en plus du banc de capacités placé en parallèle. Ce qui permet de diminuer la chute de tension en charge mais limite les possibilités de régulation [15].

6.2.3 MAS avec batterie de condensateurs commandés

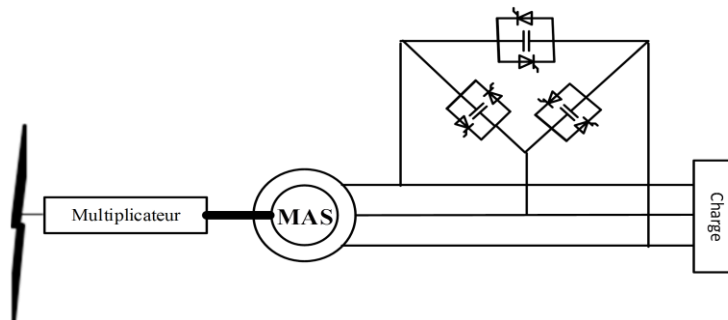


Fig.I.17. MAS avec batterie de condensateurs commandés

Une des propositions pour commander la puissance réactive est la mise en place de thyristors en tête bêche en parallèle avec les capacités. Les valeurs apparentes des capacités sont ajustées par action sur leur temps de connexion au circuit. Ce qui permet pour les perturbations de charge ou de vitesse du vent d'atténuer les variations de la tension [15].

6.2.4 MAS et STATCOM

La MAS est reliée à un dispositif " Static Compensator". Cette configuration prévoit, en plus des condensateurs d'excitation, un filtre, un transformateur abaisseur et un onduleur de tension à deux niveaux avec batterie de stockage (sur son bus continu) qui peut fournir ou absorber la puissance réactive par le contrôle de la tension. Ce système est néanmoins coûteux et compliqué à mettre en œuvre [18].

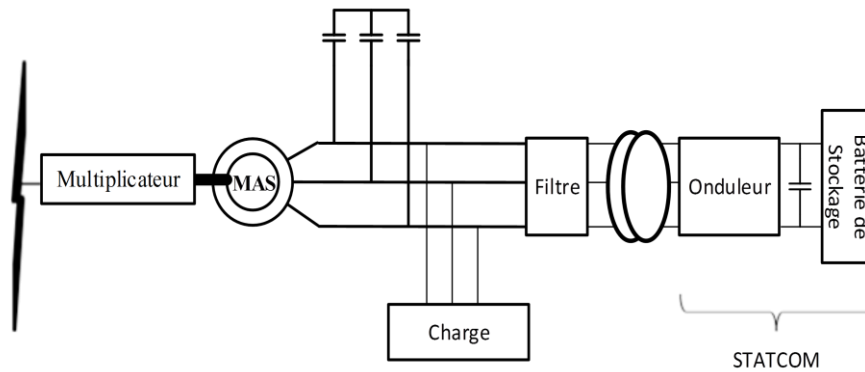


Fig.I.18. MAS avec STATCOM

6.2.5 MAS et Convertisseurs unidirectionnels

Un redresseur simple à diodes et un hacheur qui garde la tension à sa sortie constante par action sur le rapport cyclique de ce dernier. Ce système est simple mais ne permet pas le contrôle de la magnétisation de la machine.

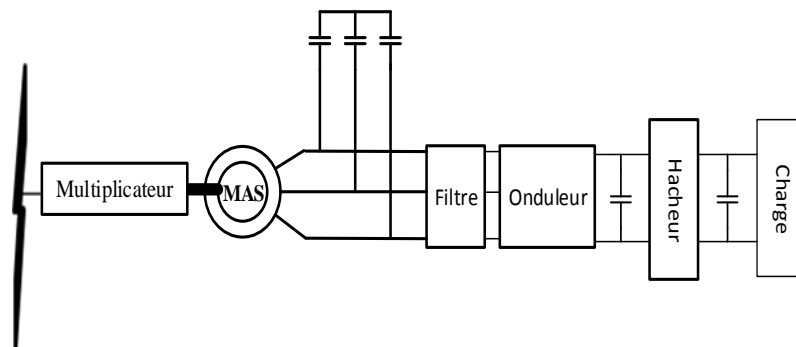


Fig.I.19. MAS et Convertisseurs unidirectionnels

6.2.6 Convertisseurs bidirectionnels (à MLI)

La machine est connectée à un redresseur et un onduleur de tension à MLI.

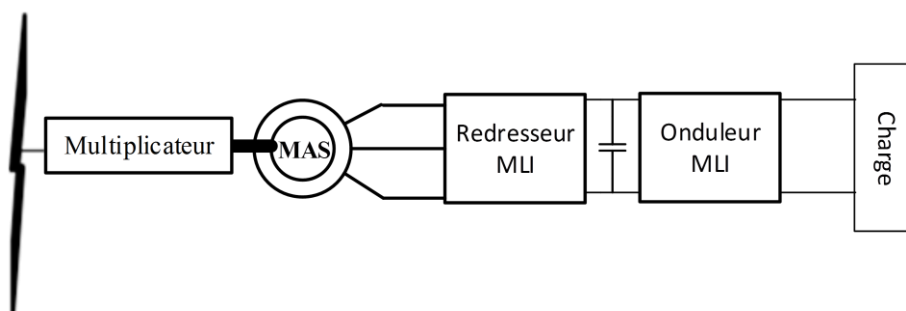


Fig.I.20. MAS avec Convertisseurs bidirectionnels (à MLI)

L'avantage de ce système est le fonctionnement sur une plus large gamme de vitesses, une optimisation du transfert d'énergie, une meilleure gestion des transitoires par rapport à la charge mais la commande reste complexe [15,18].

7. Vitesse fixe / vitesse variable

La configuration électrique d'un aérogénérateur est dans une certaine mesure déterminée par son mode de fonctionnement vis à vis de la vitesse de rotation de sa génératrice : fixe ou variable.

La génératrice asynchrone directement couplée au réseau (configuration 6.2.1) voit alors sa vitesse imposée par la fréquence du réseau et par son nombre de paires de pôles. Le couple mécanique de la turbine éolienne a tendance à accélérer la vitesse de la génératrice qui fonctionne alors en hyper-synchronisme et génère de la puissance électrique sur le réseau. La vitesse mécanique est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme [14]. La structure présentée précédemment au point 6.2.2 de la machine asynchrone à cage fonctionne à vitesse variable par pilotage au stator par des convertisseurs statiques.

La configuration des points 6.2.3 et 6.2.4 est basée sur une machine asynchrone à rotor bobiné et la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs placés sur le circuit rotorique. Cependant la première utilise le principe de la dissipation de la puissance rotorique sur une charge alimentée par le convertisseur et permet une variation de la vitesse de l'ordre de 10% au-delà de la vitesse du synchronisme et la deuxième utilise la cascade hyper-synchrone avec une MADA qui permet une variation plus large de vitesse atteignant les $\pm 30\%$ [3].

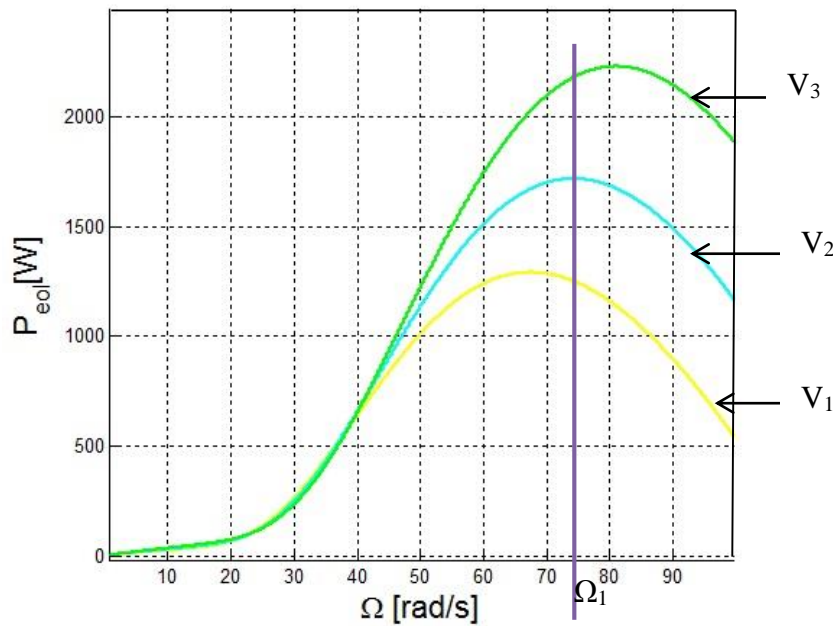


Fig.I.21. Puissance générée d'une éolienne en fonction de la vitesse de la génératrice pour plusieurs vitesses du vent

La figure I.24 représente la caractéristique générale de la puissance en fonction de la vitesse d'une aéroturbine pour différentes vitesses de vent. Si l'éolienne est à vitesse fixe et ne tourne qu'à la vitesse de Ω_1 , pour la vitesse de vent V_2 elle extrait le maximum de puissance du vent mais si la vitesse du vent change, le maximum de la puissance qu'elle pourrait en tirer n'est pas atteint. Si la vitesse de vent augmente (V_3), il faudrait augmenter la vitesse de rotation pour atteindre le point de puissance maximum ou si la vitesse du vent baisse (V_1) il faudrait fixer la vitesse de rotation à une vitesse inférieure à Ω_1 . C'est là tout l'intérêt de la vitesse variable, extraire le maximum de puissance à partir du vent.

Cependant, il reste certains avantages à l'éolienne à vitesse fixe : Système électrique plus simple, Plus grande fiabilité, Pas de systèmes électroniques de commande donc un coût moins élevé.

Les avantages de l'éolienne à vitesse variable : Augmentation du rendement énergétique, Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance, Réduction des efforts subis par le circuit de puissance.

8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé en premier lieu de l'énergie du vent et des concepts éoliens en général, des types d'éoliennes et de la constitution des éoliennes tripales. Puis, nous avons exploré différents montages possibles pour des éoliennes tripales à axe horizontal dans un fonctionnement raccordé au réseau et dans un fonctionnement en isolé. Nous avons présenté les plus importantes topologies concernant la machine asynchrone à cage qui a des avantages certains comparativement aux autres types de machines mais présente des limites concernant sa consommation de puissance réactive, et la faible marge de manœuvre dans sa commande. Cependant, l'adjonction de l'électronique de puissance permet de palier à ces problèmes.

CHAPITRE II

Modélisation et Etude du
fonctionnement de la génératrice à cage

1. Introduction

Nous aborderons dans ce chapitre la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, d'abord dans un régime linéaire dans le repère diphasé de Park. Puis nous développerons dans ce modèle par une méthode de prise en compte du phénomène de saturation, en utilisant les paramètres de la machine identifiée dans le chapitre précédent. On réalisera les simulations sur le logiciel MATLAB du fonctionnement de la machine, d'abord en auto-amorçage, puis dans un raccordement au réseau, et comparerons les relevés expérimentaux aux résultats de ces simulations.

2. Modélisation de la MAS à cage

On ramènera le système de bobinage triphasé qui existe dans la machine à un modèle diphasé équivalent ceci en s'assurant que la puissance instantanée est conservée et que la puissance complexe l'est aussi. Nous adopterons la transformation de R.H. Park qui remplit ces deux conditions et nous permet le passage du système triphasé au système biphasé dans la base de Park. Cependant, dans un premier temps on adoptera les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les forces magnétomotrices sont sinusoïdales, donc les harmoniques d'espaces sont négligés.
- L'entrefer est supposé constant (épaisseur constante).
- Les pertes ferromagnétiques sont supposées inexistantes.
- La cage d'écureuil est assimilée à un bobinage triphasé équilibré.
- L'effet de la température sur les paramètres de la machine est négligé.
- Le flux est une fonction linéaire du courant (pas de saturation).

2.1 Equations électriques générales de la machine

Sous forme matricielle les équations des tensions statoriques et rotoriques se présentent comme suit :

$$\text{Au stator :} \quad [v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Au rotor :} \quad [v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Les notations :

- s, r : désignent respectivement le stator et le rotor.
- abc : désignent les trois phases du stator ou les trois phases auxquelles le rotor à cage a été assimilé : a, b, et c.

En vertu des hypothèses que nous avons adoptées, on peut écrire les relations entre flux et les courants :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)][i_{rabc}] \quad (\text{II.3})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)][i_{sabc}] \quad (\text{II.4})$$

Avec les matrices inductances :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Les matrices des inductances mutuelles stator- rotor $[M_{sr}(\theta)]$ et rotor – stator $[M_{rs}(\theta)]$ sont :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

m_{sr} : Maximum d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor.

θ : Angle déterminant la position angulaire du rotor par rapport au stator.

En introduisant les équations de flux II.3 et II.4 dans celles des tensions II.1 et II.2 on peut écrire le système :

$$[v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][i_{sabc}]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}(\theta)][i_{rabc}]) \quad (\text{II.5})$$

$$[v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][i_{rabc}]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}(\theta)][i_{sabc}]) \quad (\text{II.6})$$

Le rotor étant en court-circuit nous pouvons écrire que:

$$[v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2.2 Modèle diphasé équivalent de la machine asynchrone (modèle de R.H Park)

Dans un souci de simplification l'analyse de circuits triphasés, la transformation de R.H Park réduit les grandeurs triphasés alternatives dépendantes du temps qui composent le système différentiel régissant le fonctionnement de la machine, en un système de grandeurs diphasé indépendantes du temps. Ce qui a pour effet, par un choix de variables adéquat, de faciliter les calculs avant d'effectuer la transformation inverse pour récupérer les résultats des tensions, courants et flux réels triphasés. Les axes d (direct) et q (quadrature) viennent alors se positionner par rapport aux axes triphasés comme le montre la figure II.1.

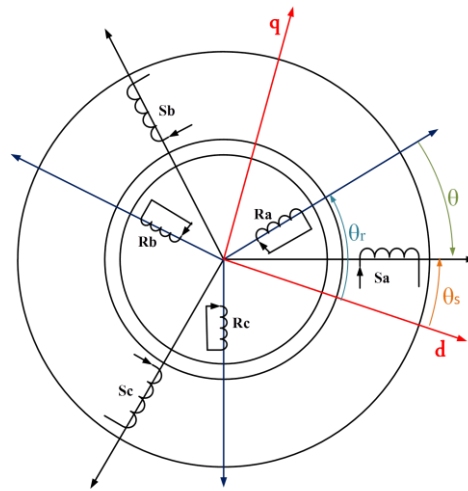


Fig.II.1. Systèmes d'axes abc et d q

Avec :

S_a, S_b, S_c Phases du stator
 R_a, R_b, R_c Phases du rotor

Et :

θ : Angle électrique entre l'axe du rotor et celui du stator.
 θ_s : Angle électrique entre l'axe d et celui du stator.
 θ_r : Angle électrique entre l'axe d et stator et celui du rotor.

Où à chaque instant: $\theta_s - \theta_r = \theta$

On ramènera le système de bobinage triphasé qui existe dans la machine à un modèle diphasé équivalent ceci s'assurant que la puissance instantanée est conservée et que la puissance complexe l'est aussi. Nous adopterons la matrice de passage dans la base de Park qui relie ces deux conditions.

$$\text{Nous aurons :} \quad [v_{abc}] = [p(\theta)][v_p]$$

$$[v_p] = [p(\theta)]^{-1}[v_{abc}]$$

Avec :

$[v_{abc}]$: Grandeurs dans la base triphasée a, b, c

$[v_p]$: Grandeurs dans la base de Park

Et :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Avec l'angle θ_s qui intervient pour les grandeurs au stator, l'équation II.1 devient :

$$[p(\theta_s)][v_{sp}] = [R_s][p(\theta_s)][i_{sp}] + \frac{d}{dt}[p(\theta_s)][\Phi_{sp}]$$

$$\begin{aligned} [v_{sp}] &= [R_s][i_{sp}] + [p(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt}[p(\theta_s)][\Phi_{sp}] \\ &= [R_s][i_{sp}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sp}] + [p(\theta_s)]^{-1} \left(\frac{d}{dt}[p(\theta_s)] \right) [\Phi_{sp}] \end{aligned}$$

En effectuant le calcul du dernier terme de cette équation on obtient :

$$\begin{aligned} [p(\theta_s)]^{-1} \left(\frac{d}{dt}[p(\theta_s)] \right) [\Phi_{sp}] &= \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{so} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \\ [v_{sp}] &= [R_s][i_{sp}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sp}] + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$[v_{sp}] = \begin{bmatrix} v_{so} \\ v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad [i_{sp}] = \begin{bmatrix} i_{so} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{sp}] = \begin{bmatrix} \Phi_{so} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix}$$

Les équations du stator exprimées dans la base de Park ou repère (dq0) sont donc :

$$\begin{aligned} v_{s0} &= R_s i_{s0} + \frac{d\Phi_{s0}}{dt} \\ v_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sq} \\ v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sd} \end{aligned}$$

Par la même démarche de calcul appliquée aux équations du rotor en faisant intervenir θ_r on aboutit aux équations du rotor exprimées dans le repère (dq0):

$$\begin{aligned} v_{r0} &= R_r i_{r0} + \frac{d\Phi_{r0}}{dt} \\ v_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rq} \\ v_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rd} \end{aligned}$$

Ou sous la forme matricielle :

$$[v_{rp}] = [R_r][i_{rp}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rp}] + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$[v_{rp}] = \begin{bmatrix} v_{r0} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} \quad [i_{rp}] = \begin{bmatrix} i_{r0} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rp}] = \begin{bmatrix} \Phi_{r0} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix}$$

Puisque nous considérons que le système est équilibré, les grandeurs homopolaires sont donc toutes nulles et nous pouvons écrire :

$$v_{s0} = 0 \quad i_{s0} = 0 \quad \Phi_{s0} = 0 \quad , \quad v_{r0} = 0 \quad i_{r0} = 0 \quad \Phi_{r0} = 0$$

Les expressions des flux en fonction des courants dans la base de R.H Park s'expriment de la façon suivante:

$$\Phi_{sd} = \mathcal{L}_s i_{sd} + \mathcal{M} i_{rd} \quad (\text{II.9})$$

$$\Phi_{sq} = \mathcal{L}_s i_{sq} + \mathcal{M} i_{rq} \quad (\text{II.10})$$

$$\Phi_{rd} = \mathcal{L}_r i_{rd} + \mathcal{M} i_{sd} \quad (\text{II.11})$$

$$\Phi_{rq} = \mathcal{L}_r i_{rq} + \mathcal{M} i_{sq} \quad (\text{II.12})$$

Ou sous forme matricielle en les regroupant suivant l'axe d et q :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_s & \mathcal{M} \\ \mathcal{M} & \mathcal{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_s & \mathcal{M} \\ \mathcal{M} & \mathcal{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_s &= L_s - M_s && \text{Inductance propre cyclique du stator} \\ \mathcal{L}_r &= L_r - M_r && \text{Inductance propre cyclique du rotor} \\ \mathcal{M} &= \frac{3}{2} m_{sr} && \text{Inductance mutuelle cyclique} \end{aligned}$$

En combinant les systèmes d'équations, on peut écrire les équations II.7 et II.8 sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \mathcal{L}_s & 0 & -\omega_s \mathcal{M} \\ \omega_s \mathcal{L}_s & R_s & \omega_s \mathcal{M} & 0 \\ 0 & -\omega_r \mathcal{M} & R_r & -\omega_r \mathcal{L}_r \\ \omega_r \mathcal{M} & 0 & \omega_r \mathcal{L}_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{L}_s & 0 & \mathcal{M} & 0 \\ 0 & \mathcal{L}_s & 0 & \mathcal{M} \\ \mathcal{M} & 0 & \mathcal{L}_r & 0 \\ 0 & \mathcal{M} & 0 & \mathcal{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Avec : $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ et ω_r

À des fins de simplification du modèle pour des commodités de calcul selon l'application souhaité, le repère (d q) peut être lié:

- Au stator
- Au rotor
- Au champ tournant

2.3 Expression du couple électromagnétique de la machine

La puissance électrique de la machine s'exprime de la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 P_e &= v_{sabc}^T i_{sabc} = v_{sp}^T i_{sp} = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} + v_{so} i_{so} \\
 &= \left(R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \right) i_{sd} + \left(R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \right) i_{sq} + \left(R_s i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \right) i_{so} \\
 &= \{ R_s i_{sd}^2 + R_s i_{sq}^2 + R_s i_{so}^2 \} + \left\{ i_{sd} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + i_{so} \frac{d\Phi_{so}}{dt} \right\} + \{ \omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \}
 \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 \{ R_s i_{sd}^2 + R_s i_{sq}^2 + R_s i_{so}^2 \} & \quad : \text{représente les pertes joules.} \\
 \left\{ i_{sd} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + i_{so} \frac{d\Phi_{so}}{dt} \right\} & \quad : \text{correspond à la puissance électromagnétique stockée.} \\
 \{ \omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \} & \quad : \text{représente la puissance transformée.}
 \end{aligned}$$

Donc,

$$C_{em} = \frac{\omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd})}{\Omega_s} = p (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{II.17})$$

2.4 Modèle de la machine asynchrone à cage en régime saturé

Le modèle linéaire de la machine asynchrone à cage fonctionne parfaitement en moteur, mais de nombreux travaux ont prouvé les limites de ce modèle dans un fonctionnement génératrice [21, 22, 23, 24], notamment pour les simulations de l'auto-amorçage ou il s'agit de retrouver les tensions aux points de fonctionnements. En effet, comme le modèle linéaire ne suppose pas de saturation, le flux reste donc toujours proportionnel au courant et donc plus le courant augmente, plus le flux augmente et la tension fait de même. Les tensions n'atteignent jamais de régime permanent, augmentent d'une manière exponentielle et divergente très vite. Cela ne reflète bien évidemment pas la réalité physique. La saturation est donc indispensable au fonctionnement de la machine asynchrone en générateur et sa prise en compte dans la modélisation l'est tout autant.

Et c'est pour cette raison que nous nous dirigerons dans la partie suivante vers le modèle de la machine asynchrone à cage en régime saturé.

Le matériau se sature lorsque sa perméabilité diminue avec le degré d'induction magnétique, c'est ce qui donne cette forme concave sur une caractéristique de magnétisation $B(H)$:

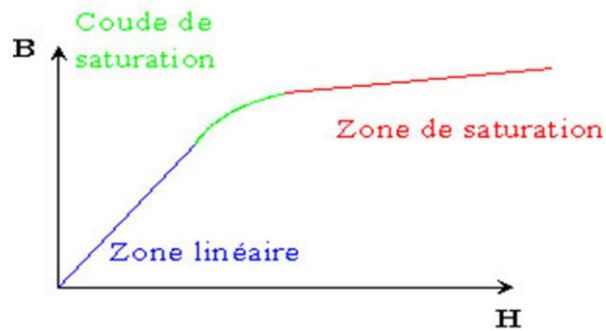


Fig.II.2. Courbe de principe d'une caractéristique de magnétisation $B(H)$

L'effet de saturation engendre un phénomène de couplage magnétique entre les enroulements d'axe d et d'axe q (dans un modèle diphasé) qui, placés à 90° l'un de l'autre, ne devraient avoir aucune réaction mutuelle dans un régime linéaire. Aucun couplage ne se produit entre 2 bobinages perpendiculaires dans un régime non saturé. Cette inductance mutuelle d'effet croisé ou de cross-saturation ou encore d'inter-saturation qui apparaît à la saturation joue un rôle non négligeable lors des régimes transitoires [16].

Plusieurs méthodes qui prennent en compte la saturation magnétique dans le modèle de Park ont été développées se basant sur une modélisation mathématique du comportement non linéaire de la machine. Certaines méthodes adoptent l'ajustement de l'inductance de magnétisation: modèle des flux, modèle des courants ; d'autres gardent l'hypothèse de non variation de l'inductance de magnétisation mais réajuste le flux magnétisant à l'aide de facteurs de saturation [22].

L'approche de modélisation que nous allons suivre se base sur la variation d'inductances de magnétisation en fonction du courant magnétisant. Nous déterminerons les expressions des inductances en séparant les flux suivant les axes d et q en flux de fuite et flux de magnétisant, tout en considérant les inductances de fuites constantes (le parcours du flux de fuite est dans l'air dont la perméabilité est constante).

Cette approche a l'avantage de faire apparaître les grandeurs d'état et facilite donc le traitement du problème par la mise du modèle sous forme d'équations d'état.

On décomposera les flux magnétiques en flux de fuite et flux utile tels que :

$$\Phi_{sd} = l_s i_{sd} + \Phi_{md} \quad (\text{II.18})$$

$$\Phi_{sq} = l_s i_{sq} + \Phi_{mq} \quad (\text{II.19})$$

$$\Phi_{rd} = l_r i_{rd} + \Phi_{md} \quad (\text{II.20})$$

$$\Phi_{rq} = l_r i_{rq} + \Phi_{mq} \quad (\text{II.21})$$

l_s, l_r : Inductance de fuite statorique et rotorique respectivement.

On considèrera les courants magnétisants circulant dans la branche magnétisante du modèle de la machine :

$$|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2}$$

Avec ses composantes suivant les deux axes d et q :

$$i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \quad (\text{II.22})$$

$$i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \quad (\text{II.23})$$

On pose les flux magnétisants :

$$\Phi_{md} = M_{st} i_{md} \quad (\text{II.24})$$

$$\Phi_{mq} = M_{st} i_{mq} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

M_{st} : Inductance magnétisante statique.

$$\Phi_{sd} = l_s i_{sd} + M_{st} i_{md} \quad (\text{II.26})$$

$$\Phi_{sq} = l_s i_{sq} + M_{st} i_{mq} \quad (\text{II.27})$$

$$\Phi_{rd} = -l_r i_{sd} + (l_r + M_{st}) i_{md} \quad (\text{II.28})$$

$$\Phi_{rq} = -l_r i_{sq} + (l_r + M_{st}) i_{mq} \quad (\text{II.29})$$

Les équations des tensions du modèle de Park de la machine font apparaitre (équation II.7) les dérivées des flux par rapport au temps, en les substituant par leurs décompositions en flux de fuite et flux magnétisant (équations II.18 à II.21) on peut écrire :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (l_s i_{sd} + M_{st} i_{md}) - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sq} \quad (\text{II.30})$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (l_s i_{sq} + M_{st} i_{mq}) + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sd} \quad (\text{II.31})$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} [-l_r i_{sd} + (l_r + M_{st}) i_{md}] - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rq} \quad (\text{II.32})$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} [-l_r i_{sq} + (l_r + M_{st}) i_{mq}] + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rd} \quad (\text{II.33})$$

En développant la dérivée du flux dans l'équation II.31 [15], [23]:

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + M_{st} \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \frac{dM_{st}}{d|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt}$$

On posera :

$$M'_{st} = \frac{dM_{st}}{d|i_m|}$$

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + \left[M_{st} + M'_{st} \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{md}}{dt} + M'_{st} \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt}$$

On posera :

$$M_d = M_{st} + M'_{st} \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \quad : \text{Inductance magnétisante statique suivant l'axe d.}$$

$$M_q = M_{st} + M'_{st} \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \quad : \text{Inductance magnétisante dynamique suivant l'axe q.}$$

$$M_{dq} = M'_{st} \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \quad : \text{Inductance magnétisante d'effet croisé.}$$

Et par la même démarche de calcul les dérivées des flux s'écrivent :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + M_d \frac{di_{md}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (\text{II.34})$$

$$\frac{d\Phi_{sq}}{dt} = l_s \frac{di_{sq}}{dt} + M_q \frac{di_{mq}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \quad (\text{II.35})$$

$$\frac{d\Phi_{rd}}{dt} = -l_r \frac{di_{sd}}{dt} + (l_r + M_q) \frac{di_{md}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (\text{II.36})$$

$$\frac{d\Phi_{rq}}{dt} = -l_r \frac{di_{sq}}{dt} + (l_r + M_q) \frac{di_{mq}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \quad (\text{II.37})$$

Dans le modèle linéaire et suivant l'hypothèse que la saturation n'existe pas dans le matériau, l'inductance magnétisante statique est constante et égale aux inductances magnétisantes d'axe d et d'axe q, et dans ce cas, l'inductance d'effet croisé M_{dq} est nulle. Cette inductance fait donc apparaître l'effet croisé (cross-saturation).

En introduisant dans le modèle de Park établi précédemment (équation II.15), les équations II.34 à II.37 on aboutit au système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s l_s & 0 & -\omega_s M_{st} \\ \omega_s l_s & R_s & \omega_s M_{st} & 0 \\ -R_r & \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (M_{st} + l_r) \\ -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r (M_{st} + l_r) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & M_d & M_{dq} \\ 0 & l_s & M_{dq} & M_q \\ -l_r & 0 & l_r + M_d & M_{dq} \\ 0 & -l_r & M_{dq} & l_r + M_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

En introduisant les expressions des flux (équations II.26 et II.27) dans l'expression du couple électromagnétique (éq.II.17):

$$\begin{aligned} C_{em} &= p(\Phi_{sd}i_{sq} - \Phi_{sq}i_{sd}) \\ &= p((l_s i_{sd} + M_{st} i_{md})i_{sq} - (l_s i_{sq} + M_{st} i_{mq})i_{sd}) \end{aligned}$$

Le couple électromagnétique s'exprime donc par :

$$C_{em} = p M_{st}(i_{md}i_{sq} - i_{mq}i_{sd}) \quad (\text{II.40})$$

3. Auto-amorçage de la MAS à cage

3.1 Principe de l'auto-amorçage

Pour que la machine asynchrone s'amorce il est nécessaire de réunir deux conditions :

- L'existence d'une induction rémanente dans le circuit magnétique du rotor il suffit pour cela que le circuit ai était magnétisé au moins une fois, donc que la machine ai était mise sous tension au moins une fois.
- Une source d'énergie réactive : lorsqu'elle est raccordée au réseau, il lui fournit cette puissance réactive, mais en mode isolé un dispositif telle une batterie de condensateur est utilisée pour que la machine soit « auto-amorcée ».

L'auto-amorçage de la MAS à cage se fait à l'aide de condensateurs qui avec le circuit de la génératrice forment un circuit RLC oscillant.

On peut réduire le schéma équivalent de l'auto-amorçage à un schéma contenant deux impédances, Z_g débitant sur une impédance de condensateur Z_c comme le montre la figure II.3 ci-dessous :

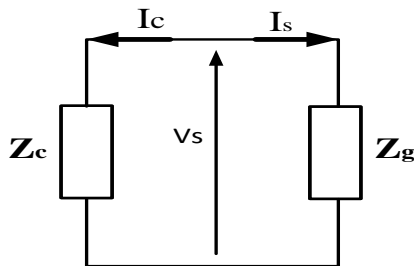


Fig.II.3.Schéma réduit de l'auto-amorçage

On posera :

$$Z_s = R_s + j\omega_s l_s \quad \text{Impédance d'une phase statorique}$$

$$Z_r = \frac{R'_r}{g} + j\omega_s l'_r \quad \text{Impédance d'une phase rotorique}$$

$$Z_m = j\omega_s M_{max} \quad \text{Impédance d'une phase statorique}$$

$$Z_g = Z_s + (Z_r \parallel Z_m) \quad \text{Impédance totale}$$

$$Z_c = -\frac{j}{C\omega_s} \quad \text{Impédance d'un condensateur}$$

D'après ce circuit : $I_s = -I_c \Rightarrow \frac{V_s}{Z_g} = -\frac{V_s}{Z_c} \Rightarrow Z_g + Z_c = 0$

Et :

$$\begin{cases} Z_g = R_s + j\omega_s l_s + \frac{j\omega_s M_{max} \left(\frac{R'_r}{g} + j\omega_s l'_r \right)}{\frac{R'_r}{g} + j\omega_s l'_r + j\omega_s M_{max}} \\ Z_c = -\frac{j}{C\omega_s} \end{cases}$$

On pose :

$$Z_{tot} = Z_g + Z_c = R_s + j\omega_s l_s + \frac{j\omega_s M_{max} \left(\frac{R'_r}{g} + j\omega_s l'_r \right)}{\frac{R'_r}{g} + j\omega_s (l'_r + M_{max})} - \frac{j}{C\omega_s}$$

Le phénomène d'amorçage de l'auto-excitation correspond au passage d'un état d'équilibre instable à un état d'équilibre stable [25], et la condition d'amorçage peut se résumer à $Re(Z_{tot}) < 0$

Le fonctionnement stable du générateur asynchrone auto-excité se traduit par l'équation suivante:

$$Z_{tot} = 0 \quad Z_{tot} = Z_g + Z_c = 0 \quad \implies \begin{cases} Re(Z_{tot}) = 0 \\ Im(Z_{tot}) = 0 \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Re(Z_{tot}) = R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 \frac{R'_r}{g}}{\omega_s^2 (l'_r + M_{max})^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} = 0 \\ Im(Z_{tot}) = \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \frac{\omega_s M_{max} \left[\omega_s^2 l'_r (M_{max} + l'_r) + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 \right]}{\omega_s^2 (l'_r + M_{max})^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} = 0 \end{array} \right.$$

En étudiant l'évolution de $Re(Z_{tot})$ en fonction du glissement g , on s'aperçoit qu'il existe deux valeur de g pour lesquelles $Re(Z_{tot})$ est nulle :

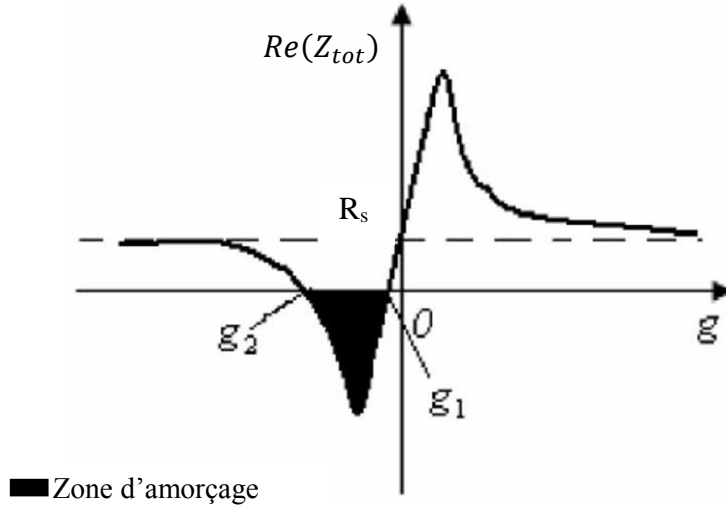


Fig.II.4. Domaine d'auto-amorçage

Nous avons :

$$Re(Z_{tot}) = R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 \frac{R'_r}{g}}{\omega_s^2 l_r'^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} \text{ En multipliant par } \frac{g^2}{g^2} : Re(Z_{tot}) = R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 R'_r g}{\omega_s^2 l_r'^2 g^2 + R_r'^2}$$

- Si $g = g_1$ (très faible) et le terme $\omega_s^2 l_r'^2 g^2$ est négligeable on a donc : $\omega_s^2 l_r'^2 g^2 \approx 0$

Donc on peut écrire : $Re(Z_{tot}) \cong R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 g}{R_r'}$

$$\lim_{g \rightarrow g_1} [Re(Z_{tot})] = 0 \Rightarrow R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 g_1}{R_r'} = 0 \Rightarrow g_1 \cong -\frac{R_s R_r'}{\omega_s^2 M_{max}^2}$$

- Pour $g = g_2$ (grande valeur de glissement), le terme $\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2$ devient négligeable et on a :

$$Re(Z_{tot}) \cong R_s + \frac{M_{max}^2 R_r'}{(l'_r + M_{max})^2 g} \cong R_s + \frac{R_r'}{g}$$

Donc :
$$\lim_{g \rightarrow g_2} [Re(Z_{tot})] = 0 \Rightarrow R_s + \frac{R'_r}{g_2} = 0 \Rightarrow g_2 = -\frac{R'_r}{R_s} \cong -1$$

Ces deux valeurs limites de glissement nous permettent donc de déduire les capacités limites pour l'auto-excitation de la machine :

A partir de :
$$Im(Z_{tot}) = \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \frac{\omega_s M_{max} \left[\omega_s^2 l'_r (M_{max} + l'_r) + \left(\frac{R'_r}{g} \right)^2 \right]}{\omega_s^2 (l'_r + M_{max})^2 + \left(\frac{R'_r}{g} \right)^2} = 0$$

On obtient l'expression de la capacité :

$$C = \frac{R_r'^2 + (l'_r + M_{max}) (\omega_s - \omega_r)^2}{\omega_s^2 R_r'^2 (l_s + M_{max}) + \omega_s^2 (\omega_s - \omega_r)^2 [l_s (l'_r + M_{max})^2 + M_{max} l'_r (l'_r + M_{max})]}$$

- Pour des très faibles valeurs de glissement $g = g_1 \cong 0$ et $\omega_s \cong \omega_r$:

En multipliant par $\frac{g^2}{g^2}$ on a :
$$Im(Z_{tot}) = \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \frac{\omega_s M_{max} \left[g^2 \omega_s^2 l'_r (M_{max} + l'_r) + R_r'^2 \right]}{g^2 \omega_s^2 (l'_r + M_{max})^2 + R_r'^2}$$

$$\lim_{g \rightarrow g_1} [Im(Z_{tot})] = \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \omega_s M_{max} = 0$$

Et comme la vitesse $\omega_r \cong \omega_s$ nous avons donc :

$$C_1 \cong \frac{1}{(l_s + M_{max}) \omega_s^2}$$

- Pour $g = g_2 \cong -1$ (fort glissement) et $\omega_s \cong \frac{\omega_r}{2}$:

$$\omega_r \cong (1 - g_2) \omega_s \cong \frac{R_s + R'_r}{R'_r} \cong 2 \omega_s$$

En négligeant le terme $\left(\frac{R'_r}{g} \right)^2$:

$$Im(Z_{tot}) \cong \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \omega_s M_{max} \frac{l'_r}{(M_{max} + l'_r)}$$

Et en admettant que $l'_r \ll M_{max}$ le troisième terme $\omega_s M_{max} \frac{l'_r}{(M_{max} + l'_r)}$ devient $\omega_s l'_r$ et :

$$Im(Z_{tot}) \cong \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \omega_s M_{max} \frac{l'_r}{(M_{max} + l'_r)}$$

De là on peut calculer :

$$C_2 \cong \frac{1}{(l_s + l'_r) \omega_s^2}$$

La valeur de capacité C_1 correspond a la resonance dans le circuit avec l'inductance statorique propre.

La valeur de capacité C_2 correspond à la résonance dans le circuit avec l'inductance de fuite totale de la machine. En pratique ce n'est pas réalisable car la machine devra supporter une vitesse qui est égale au double de la vitesse synchrone.

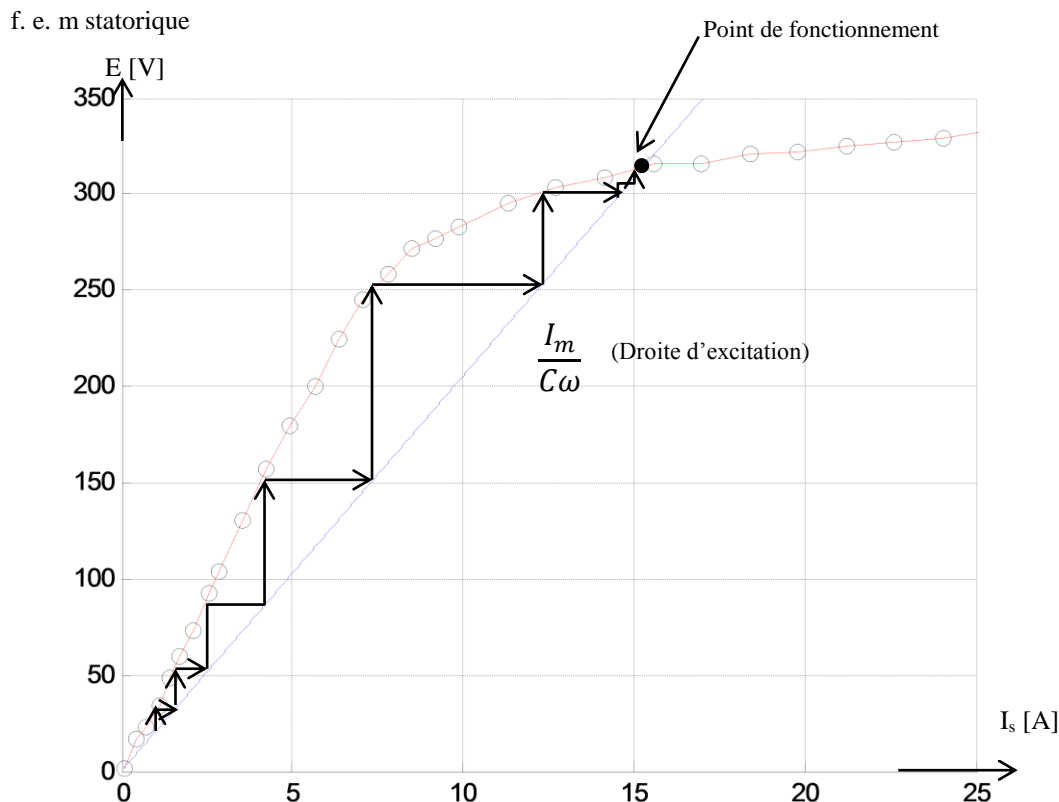


Fig.II.5. Phénomène d'Auto-excitation

La figure II.5 représente l'évolution de la f. e. m statorique de la machine (en rouge), et la caractéristique externe de la capacité (droite d'excitation en bleu avec $C=160\mu\text{F}$). Le champ rémanent dans le circuit magnétique de la machine crée une f. e. m "rémanente" aux bornes du stator lorsque le rotor est entraîné, lorsque les capacités sont connectées elles créent alors un courant réactif qui tend à augmenter le champ magnétique ce qui induit une f. e. m supérieure et puis un courant plus élevé ; le phénomène se poursuit jusqu'à l'arrivée au point de fonctionnement (état d'équilibre stable).

Le point de fonctionnement est ainsi déterminé par la droite d'excitation (caractéristique de la capacité) et la caractéristique de magnétisation. Dans le modèle linéaire, l'inductance de magnétisation est supposée constante et la caractéristiques de magnétisation est linéaire et ne croise jamais la caractéristique de magnétisation de la machine [22,23].

3.2 Modèle de l'auto-amorçage (machine et banc de capacités associé)

On a: $[i_c] = \frac{dQ_c}{dt}$

Dans le repère de R. H. Park : $[p(\theta_s)][i_{cp}] = \frac{d[p(\theta_s)][Q_{cp}]}{dt}$

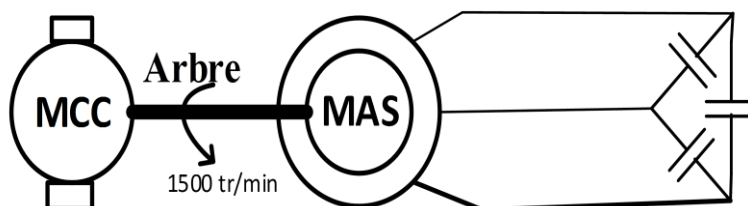
$$[i_{cp}] = [p(\theta_s)]^{-1} \frac{d[p(\theta_s)][Q_{cp}]}{dt} = [p(\theta_s)]^{-1} \left(\frac{d[p(\theta_s)]}{dt} \right) [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt}$$

Sachant que : $[Q_{cp}] = C [v_{cp}] \Rightarrow [i_{cp}] = C \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ -Q_{cq} \\ Q_{cd} \end{bmatrix} + C \frac{d[v_{cp}]}{dt} \Rightarrow \frac{d[v_{cp}]}{dt} = \frac{[i_{cp}]}{C} - \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ -Q_{cq} \\ Q_{cd} \end{bmatrix}$

Pour $\omega_s = 0$ (repère de Park lié au stator), on peut écrire l'équation sous la forme : $\begin{cases} \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C} \\ \frac{dv_{qc}}{dt} = \frac{i_{qc}}{C} \end{cases}$

3.3 Essais expérimentaux et simulations d'auto-amorçage

Le schéma de montage de l'essai est représenté sur la figure II.6



FigII.6. Schéma de montage pour l'auto-amorçage

La valeur de la capacité utilisée lors de l'essai d'auto-amorçage est de 198 μF . La mesure des courants sur l'oscilloscope s'est fait à travers un shunt de (5 ampères pour 100 millivolts). La machine étant entraînée à vitesse synchrone (1500tr/min). Sur les figures qui suivent, on peut voir le relevé expérimental de la tension figure II.7 ainsi que celui du courant figure II.9 d'une phase du stator en fonction du temps de l'essai réalisé sur la machine asynchrone à cage identifiée précédemment. Les résultats donnés par la simulation sont représentés sur les figures II.8 et II.10 (respectivement tensions et courants).

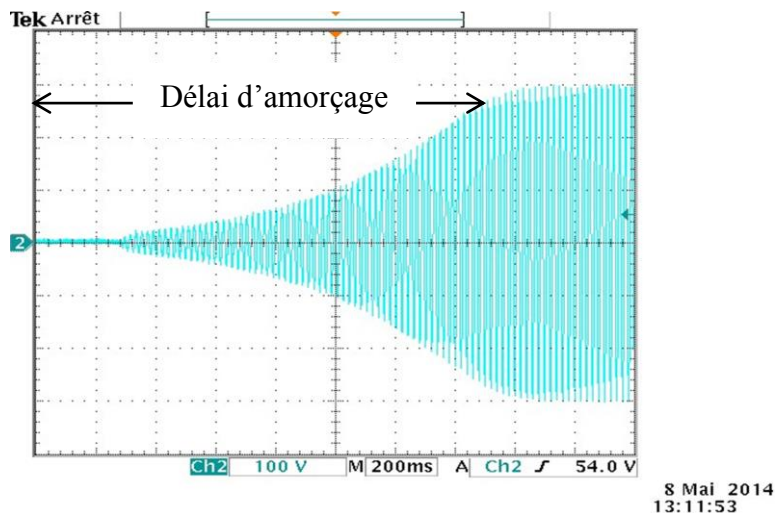


Fig.II.7. Evolution de la tension d'auto-amorçage(Expérimentation)

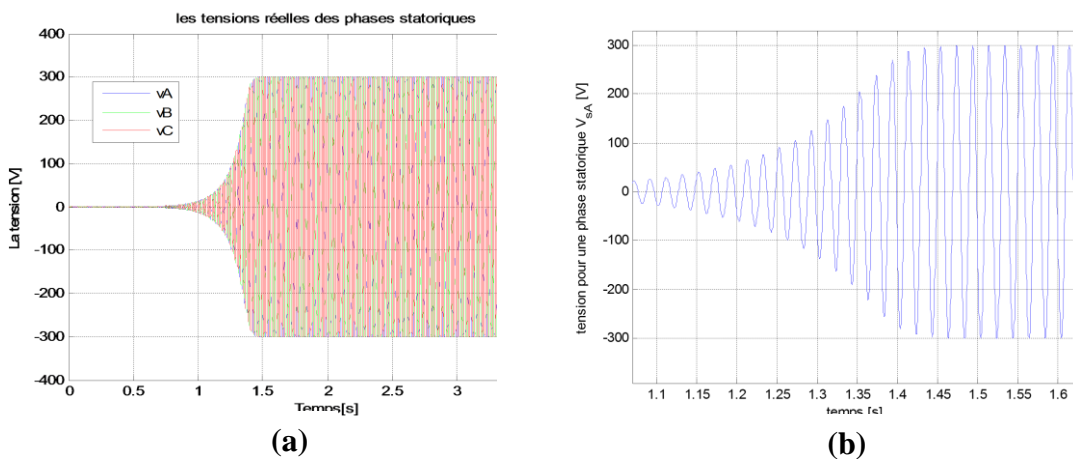


Fig.II.8. (a) Evolution de la tension d'auto-amorçage (b) zoom sur une phase

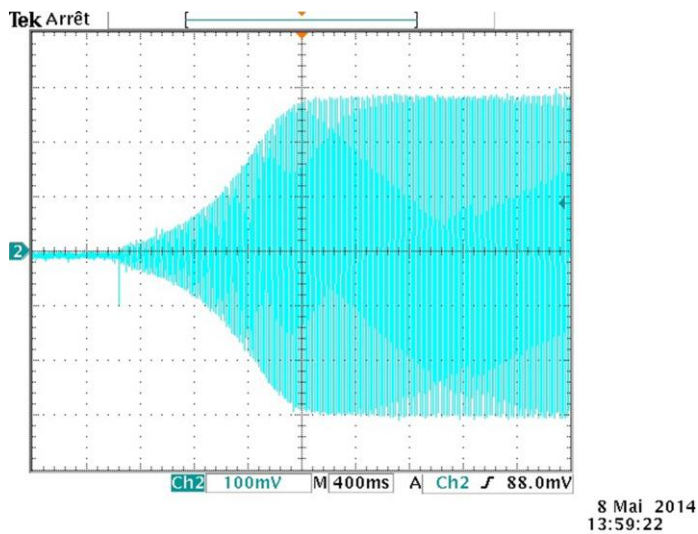


Fig.II.9. Evolution du courant d'auto-amorçage (Expérimentation)

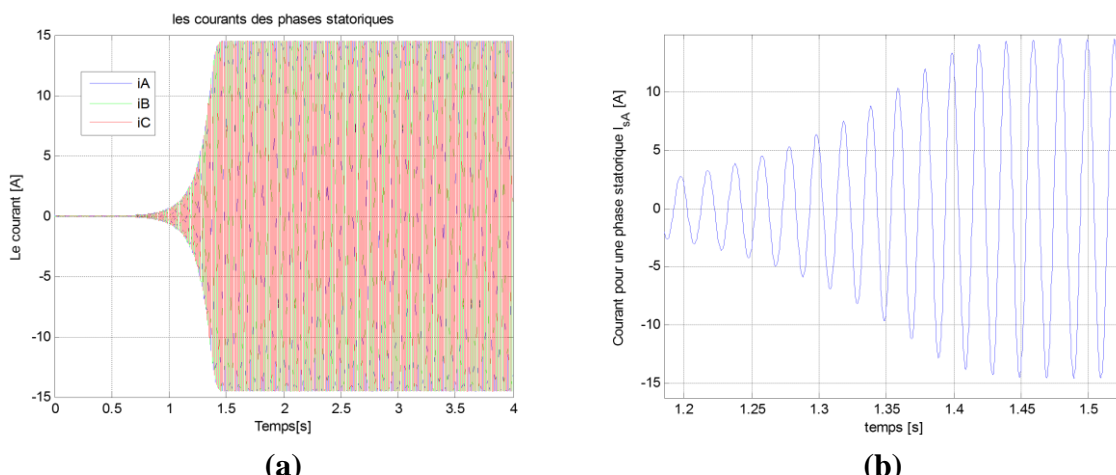


Fig.II.10. (a) Evolution du courant d'auto-amorçage et (b) zoom sur une phase (Simulation)

4. Fonctionnement en charge de la MAS, en isolé sur charge purement résistive

4.1 Modèle du système machine-charge résistive

La charge est représentée par 3 résistances identiques montées en étoile et branchées en parallèle avec les capacités. Les schémas équivalents selon les axes d et q sont présentés sur la figure suivante :

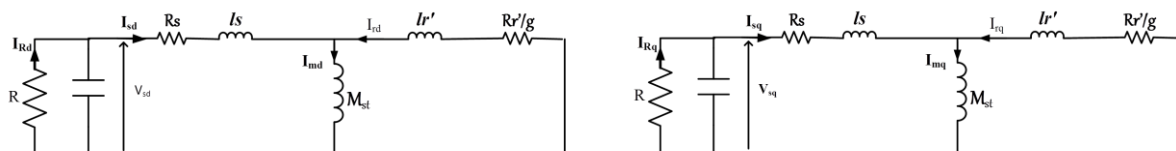


Fig.II.11. Modèle de Park de la MAS alimentant une charge R

Le système d'équations qui régit le fonctionnement la machine asynchrone à cage en isolé alimentant la charge résistive est le suivant :

$$\text{On applique la transformation de Park : } [v_{Rodq}] = [P(\theta)]^{-1}[R_{abc}][p(\theta)][i_{Rodq}]$$

$$\text{Donc, on obtient : } \begin{cases} v_{sd} = Ri_{Rd} \\ v_{sq} = Ri_{Rq} \\ v_{so} = Ri_{Ro} \end{cases}$$

4.2 Résultats de simulation

Les simulations ont été effectuées avec une valeur de résistance de charge $R=40 \Omega$, la machine a d'abord été amorcée puis à l'instant $t = 2$ secondes (le temps que la machine arrive à son régime établi), on connecte la charge.

La figure II.12 montre l'évolution de la tension en fonction du temps ainsi qu'un zoom sur le régime transitoire lors de la connexion avec la charge :

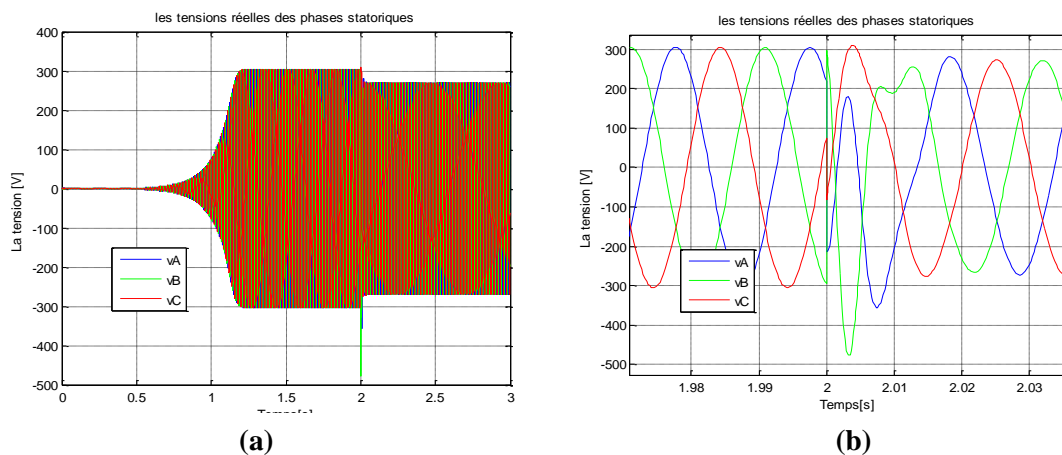


Fig.II.12. (a) Evolution des tensions statoriques (charge resistive)
(b) Zoom sur le transitoire a l'instant de connexion de la charge resistive

Les figures II.13 décrivent l'évolution des courants statoriques en fonction du temps et un zoom sur la période transitoire.

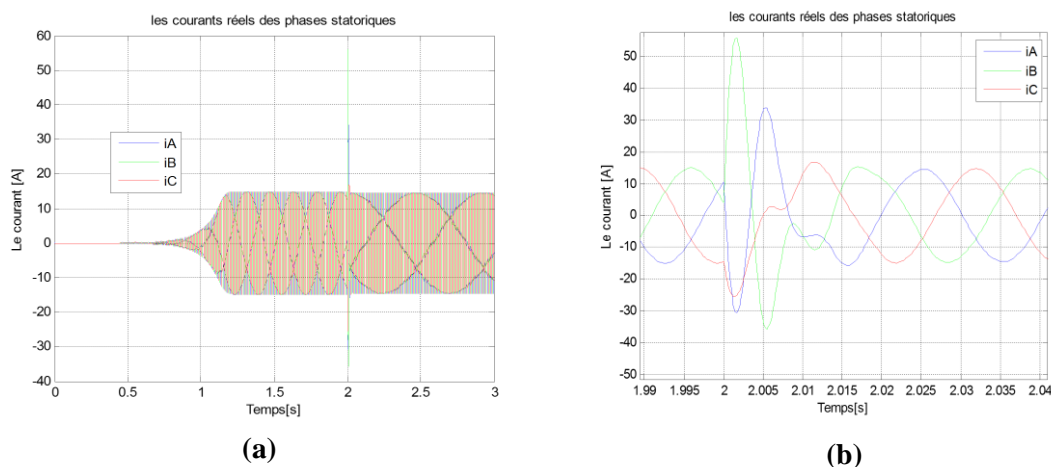


Fig.II.13. (a) Evolution des courants statoriques et **(b)** zoom sur le régime transitoire à la connexion (Charge R)

La connexion de la charge induit une chute de tension, la tension statorique. Et les courants statoriques observent un pic durant un court instant autour de 50 Ampères pour revenir à une valeur proche du courant nominal.

5. Fonctionnement en charge, en isolé, sur charge réelle

5.1 Modèle du système machine-charge réelle

La charge est représentée par trois circuits RL série identiques connectés en étoile et branchés en parallèle avec les condensateurs.

Les Schémas selon les axes d et q sont présentés sur la figure II.14 :

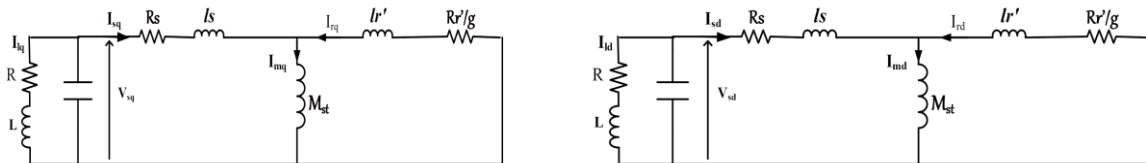


Fig.II.14. Schéma du modèle de Park de la MAS alimentant une charge RL

Le système d'équations qui régit le fonctionnement de la machine asynchrone à cage avec condensateurs d'auto-excitation en fonctionnement isolé alimentant la charge réelle.

On applique la transformée de Park :

$$[v_{odq}] = [R][i_{l,odq}] + \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ -(L_c - M_c)i_q \\ (L_c - M_c)i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_c + 2M_c) & 0 & 0 \\ 0 & (L_c - M_c) & 0 \\ 0 & 0 & (L_c - M_c) \end{bmatrix} \frac{d[i_{odq}]}{dt}$$

En supposant que la machine est équilibrée et que les mutuelles entre ces inductances de charge sont négligées, et en se plaçant dans un repère lié au stator on peut écrire :

$$\begin{cases} \frac{di_o}{dt} = \frac{v_o - Ri_o}{(L_c)} = 0 \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{v_d - Ri_d}{(L_c)} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{v_q - Ri_q}{(L_c)} \end{cases}$$

5.2 Résultats de la Simulation de la machine connectée à la charge

La génératrice est entraînée à 1500 tr/mn à vide. Puis, elle est amorcée par les condensateurs. Une fois qu'elle atteint un régime établi, la charge réelle est connectée. Cette dernière est constituée d'une résistance de 25 Ω en série avec une inductance de 20 mH par phase. Les résultats des simulations sont présentés dans les figures suivantes :

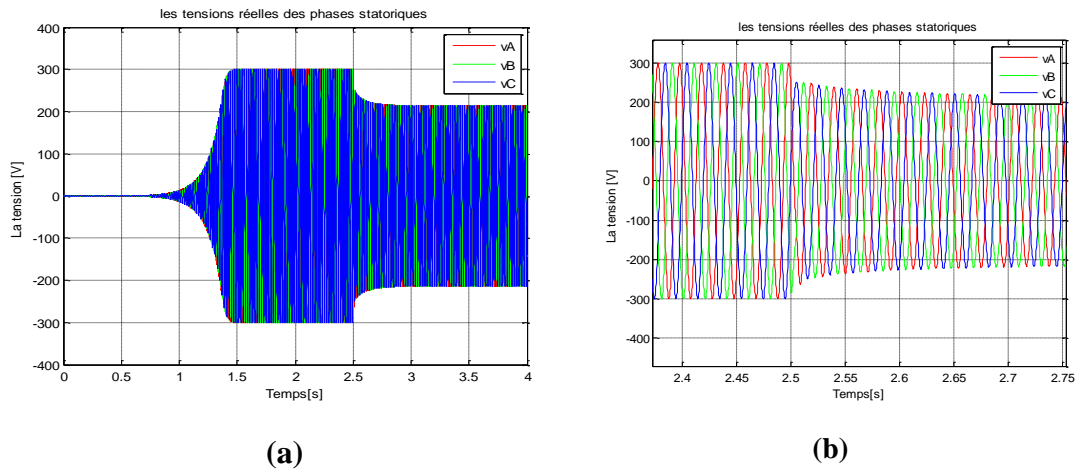


Fig.II.15. (a) Evolution des tensions statoriques et **(b)** zoom sur le régime transitoire à la connexion (Charge RL)

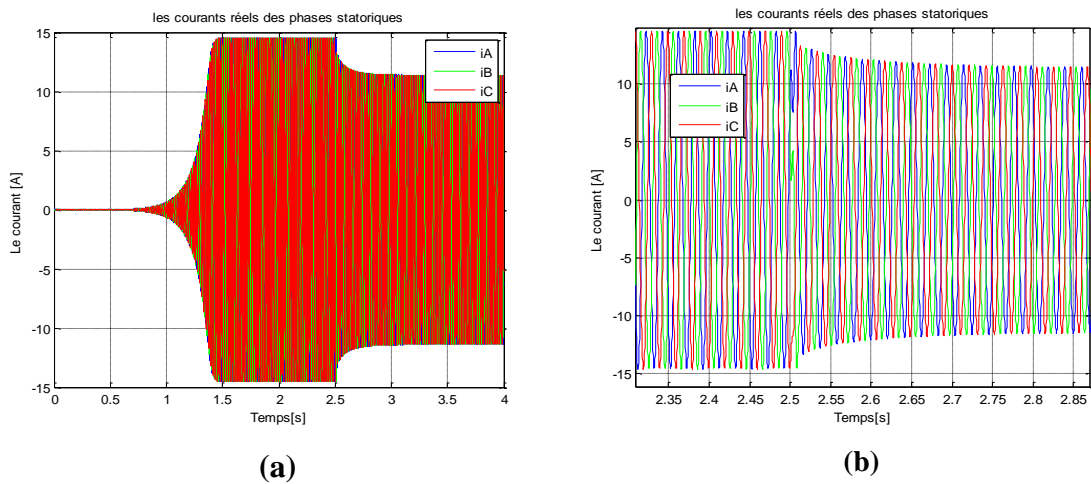


Fig.II.16. (a) Evolution des courants statoriques et **(b)** zoom sur le régime transitoire à la connexion (Charge RL)

Comme dans le cas de la charge résistive, au moment de la connexion il existe un court régime transitoire pour toutes les grandeurs étudiées.

La tension statorique subit une chute de tension après la connexion de la charge RL d'autant plus prononcée que pour la charge R.

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué une modélisation tenant compte de l'effet de la saturation dans les équations du modèle de Park de la machine. Puis, nous avons implémenté ce modèle à des fins de simulation dans le logiciel MATLAB. Nous avons effectué un auto-amorçage de la MAS expérimentalement sur la machine identifiée dans le chapitre précédent. Nous avons comparé les résultats simulés et expérimentaux. Après la validation du modèle, nous avons ensuite simulé le fonctionnement en charge de la machine pour deux types de charges : résistive et réelle.

CHAPITRE III

Modélisation et stratégie de commande de la turbine éolienne

1. Introduction

La nécessité de contrôle des turbines éoliennes augmente avec l'augmentation de leurs utilisations. Le but principal était la limitation de la puissance et de la vitesse de rotation pour protéger les turbines des vents forts, et aussi l'amélioration de l'efficacité et la qualité de conversion d'énergie ce qui demande une modélisation plus précise et plus exigeante et des techniques de commande différentes pour chaque gamme de vitesse de vent, faible, moyenne ou forte.

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la turbine éolienne ainsi qu'à son contrôle pour les différents modes de fonctionnement.

2. Modélisation du vent

La vitesse du vent représentée en figure III.1 sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [25, 26, 27] :

$$v_{vent}(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \sin(b_n \omega_v t))$$

On prend la somme suivante :

$$v_{vent}(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047 t) + 2 \sin(0.2665 t) + \sin(1.2930 t) + 0.2 \sin(3.6645 t)$$

La figure III.1 représente l'évolution de la vitesse du vent en fonction de temps.

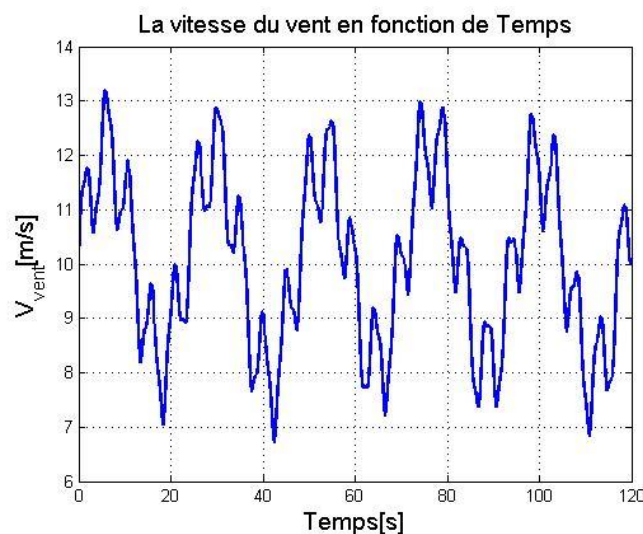


Fig.III.1. la vitesse du vent en fonction de temps

3. Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. À 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.

3.1 La puissance d'une éolienne

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_{vent}^3$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air.

v_{vent} : La vitesse du vent.

R : Le rayon du cercle déterminé par la longueur de la pale.

3.2 La conversion aérodynamique

D'après la théorie de Betz, l'éolienne ne peut pas capter toutes l'énergie du vent. On introduit alors un coefficient C_p appelé coefficient de puissance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_{vent}^3 C_p(\lambda, \beta)$$

On déduit l'expression du couple de la turbine à partir de la formule précédente:

$$\Gamma_t = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^3 v_{vent}^2}{\lambda} C_p(\lambda, \beta)$$

3.3 Le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Ce coefficient présente un maximum de 0.59 d'après le théorème de Betz. En réalité, cette limite n'est jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance. Plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature, ou par des constructeurs de turbines éoliennes.

L'expression de coefficient de puissance utilisée est donnée par [28] :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda_{opt}$$

Tel que :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_{opt} + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

β : L'angle d'orientation des pales.

λ : La vitesse spécifique définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \Omega}{v}$$

Les valeurs des constantes c_1 à c_6 dépendent du type de la turbine et du constructeur. Dans notre cas, nous choisissons une turbine de 5 kW et ses constantes spécifiques sont représentées dans le tableau suivant [28] :

coefficients	Valeurs
C_1	0.5176
C_2	116
C_3	0.4
C_4	5
C_5	21
C_6	0.0068

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure suivante.

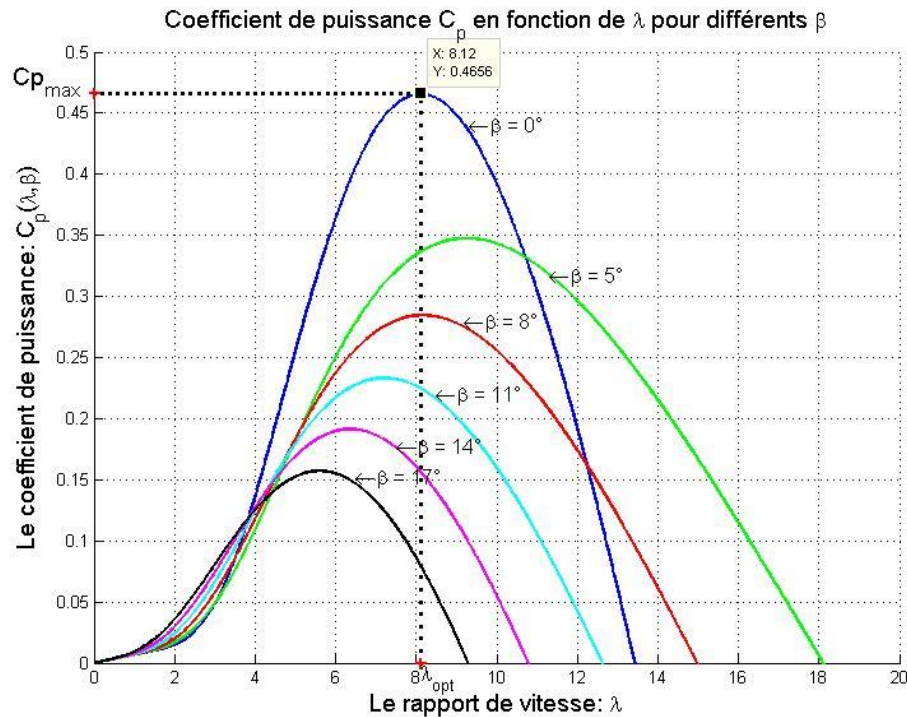


Fig.III.2.Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β .

4. Multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice. On le modélise sous la forme mathématique suivante :

$$\begin{cases} \Gamma_t = G \Gamma_{mec} \\ \Omega_{mec} = G \Omega_t \end{cases}$$

Tel que :

Γ_t : Couple aérodynamique sur l'arbre de la turbine.

Γ_{mec} : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine.

Ω_{mec} : vitesse de rotation de la génératrice.

5. Equation dynamique de la turbine

Le multiplicateur de vitesse est inséré dans la transmission afin d'effectuer l'adaptation de vitesse. Le système mécanique complet comprend donc les éléments suivants :

- Un moyeu sur lequel sont reliées les pales.
- L'axe lent.
- Le multiplicateur de vitesse.
- L'axe rapide (rotor de la génératrice).

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

$$\begin{cases} J_T \frac{d \Omega_{mec}}{dt} = \Gamma_{mec} - \Gamma_{em} - f \Omega_{mec} \\ \Omega_{mec} = G \Omega_t \end{cases}$$

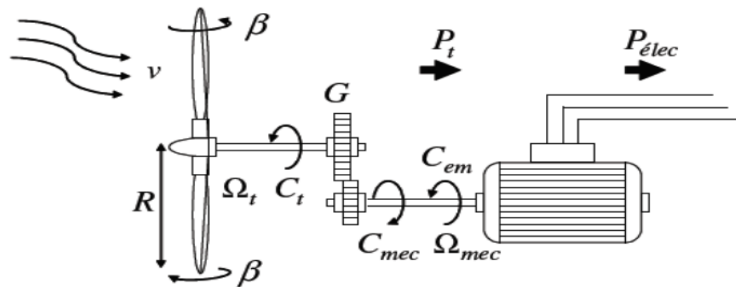


Fig.III.3. Configuration d'une éolienne [3]

6. Schéma bloc du modèle de la turbine

On établit le modèle de la turbine dont le schéma bloqué est donné sur la figure sous-dessous :

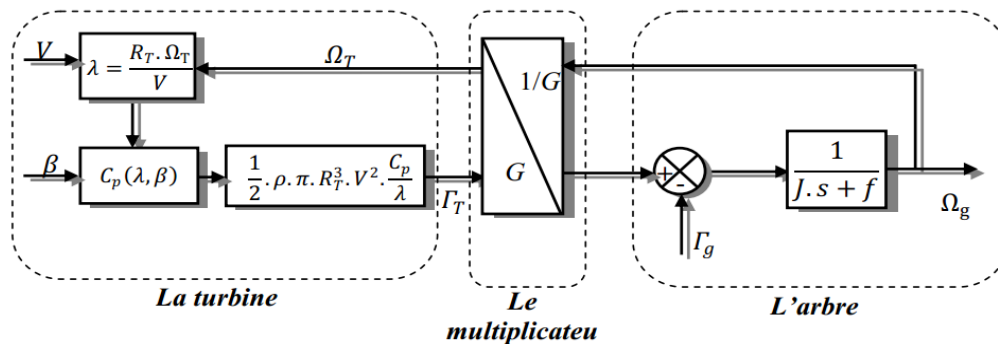


Fig.III.4. Schéma bloc du modèle de la turbine [3]

7. Commande de la turbine

La figure III.5 représente la caractéristique que la turbine doit suivre pour répondre aux exigences de la commande.

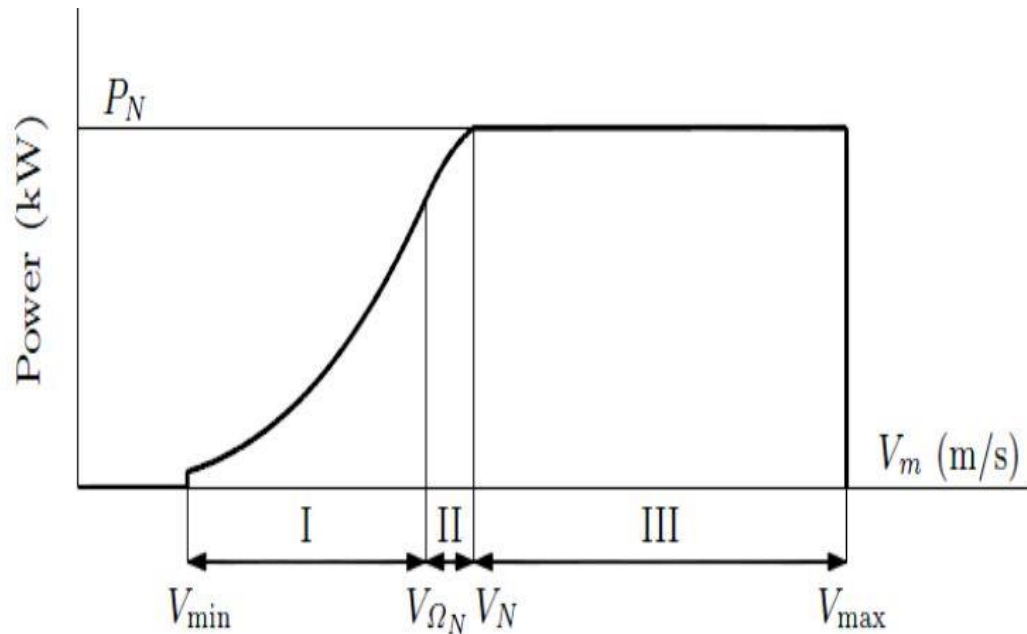


FIG.III.5 caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne à vitesse variable [3].

Cette caractéristique montre trois zones différentes avec des objectifs de commande distinctifs :

Zone I : L'objectif dans cette zone est d'extraire le maximum de puissance du vent en appliquant la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking). Donc, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal.

Zone II : c'est la zone de transition. L'éolienne fonctionne à vitesse constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et acoustiques (bruits générés), et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale.

Zone III : l'objectif dans cette zone est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne à l'aide d'un système d'orientation des pales pour éviter les surcharges.

Si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

En effet, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique en zone I et, en zone III c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

8. Mode de fonctionnement de la turbine :

La turbine peut fonctionner dans trois modes différents, selon la vitesse du vent disponible.

Mode I : maximisation de la puissance excrète

La vitesse de rotation de la turbine éolienne correspondante à la vitesse du vent ne permet pas de faire fonctionner la turbine au point de puissance maximale d'extraire la puissance maximale disponible. Pour cela, on utilise la technique MPPT qui nous permet de suivre le point de fonctionnement maximum de puissance.

Mode II : fonctionnement à puissance maximale

Pour éviter que la vitesse rotorique du générateur devienne très élevée, la puissance extraite du vent doit être limitée par la réduction du coefficient de puissance (variation de l'angle de calage).

Donc, la vitesse du vent est variable et la vitesse de rotation de la turbine est maintenue constante à sa valeur nominale. Et λ et C_p correspondants à la vitesse nominale sont calculés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \lambda_{calage} = \frac{\Omega_{t_nominale} R}{v_{vent}} \\ C_{p_calage} = \frac{P_{t_nominale}}{0.5 \rho \pi R^2 v_{vent}^3} \end{cases}$$

L'angle de calage β est obtenu par la résolution de l'équation non linéaire :

$$C_p(\lambda_{calage}, \beta) = C_{p_calage}$$

Mode III : limitation de puissance

Si la vitesse du vent est supérieure à la valeur nominale, la vitesse de la turbine est maintenue à sa valeur nominale quelle que soit la valeur de la vitesse du vent supérieur à la valeur nominale. L'angle β est déterminé par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \lambda_{lim} = \frac{\Omega_{t_nominale} R}{v_{vent}} \\ C_{p_lim} = \frac{P}{0.5 \rho \pi R^2 v_{vent}^3} \end{cases}$$

9. Principe de la technique MPPT

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La figure III.6 montre l'influence de la vitesse de rotation de la turbine sur l'énergie extraite pour différents vitesses du vent.

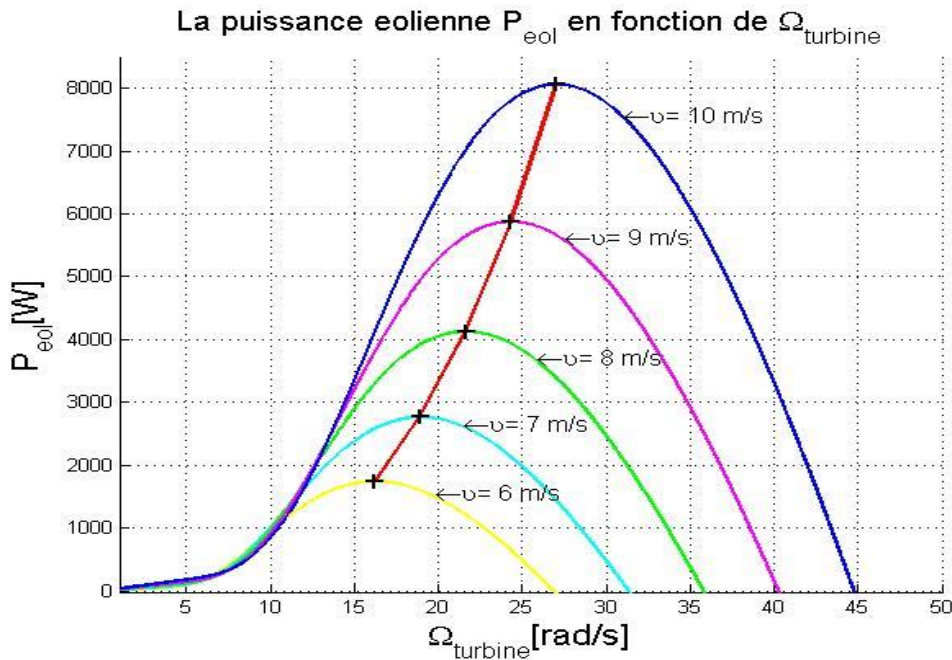


Fig.III.6. la variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation

Pour agir sur la vitesse de rotation de la turbine Ω_{mec} . On s'intéresse au sens de variation de la grandeur $\frac{dP}{d\Omega_t}$ qui est égale à zéro lorsqu'il atteint le maximum de la puissance.

La technique MPPT est résumé dans le tableau suivant :

	$\frac{dP}{dt}$	
$\frac{d\Omega_t}{dt}$	$\frac{dP}{dt} < 0$	$\frac{dP}{dt} > 0$
$\frac{d\Omega_t}{dt} < 0$	$\Omega \nearrow$	$\Omega \searrow$
$\frac{d\Omega_t}{dt} > 0$	$\Omega \searrow$	$\Omega \nearrow$

9.1. Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire figure III.6 Pour chaque vitesse de vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Chaque courbe correspond à une vitesse du vent donnée. Cette famille des courbes est obtenue directement à partir de la caractéristique $C_p(\lambda, \beta)$. Les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale cette courbe doit être suivie à tout moment de fonctionnement de système éolien. Pour s'approcher de ce but une commande spécifique doit être utilisée. Pour cela, il y a deux approches possibles :

9.1.1. Maximisation de puissance sans connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

Si la caractéristique $C_p(\lambda, \beta)$ n'est pas connue. Un algorithme de recherche extrême, tel que celui basé sur la logique floue est développé. En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des règles de comportement à tenir afin de converger vers le point optimal sont relativement simples à établir. Ces règles dépendent des variations de puissance ΔP et de vitesse $\Delta \Omega$.

9.1.2 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure

a- Commande en vitesse

Une régulation en vitesse permettant de contrôler la puissance éolienne peut donc être utilisée. On définit la consigne de vitesse selon la technique MPPT pour compléter l'algorithme de pilotage.

b- Commande en couple

La commande vectorielle de la génératrice permettant le pilotage en couple. Cette nouvelle façon de contrôler le système demande une adaptation du dispositif de recherche du point de puissance maximal MPPT. En utilisant la formule du calcul de la puissance, il est facile de déterminer le couple éolien correspondant. La mesure de la vitesse de rotation engendre le calcul du couple. Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromécanique de la génératrice. Par l'action de ce couple la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique.

10. RESULTATS DE SIMULATION

Les paramètres de la turbine éolienne [28] :

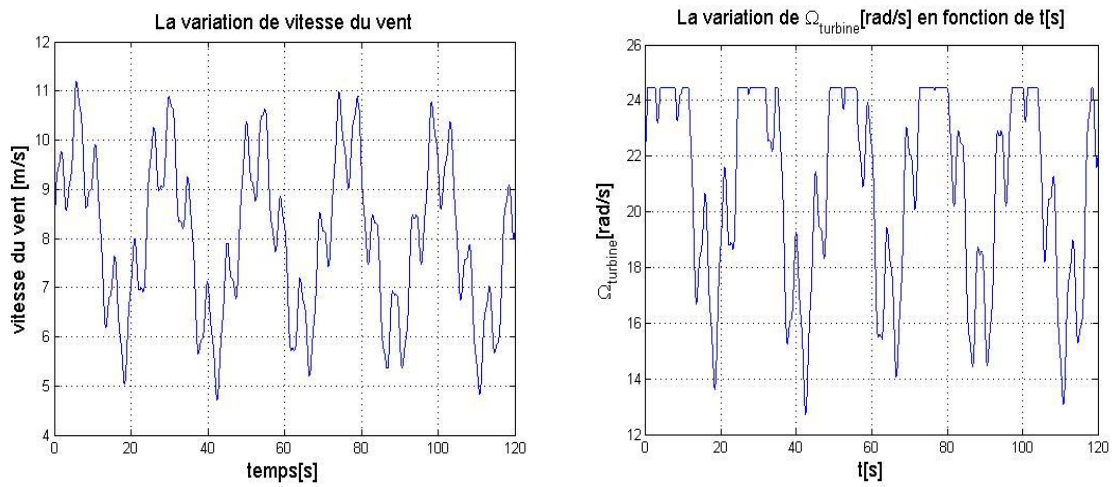
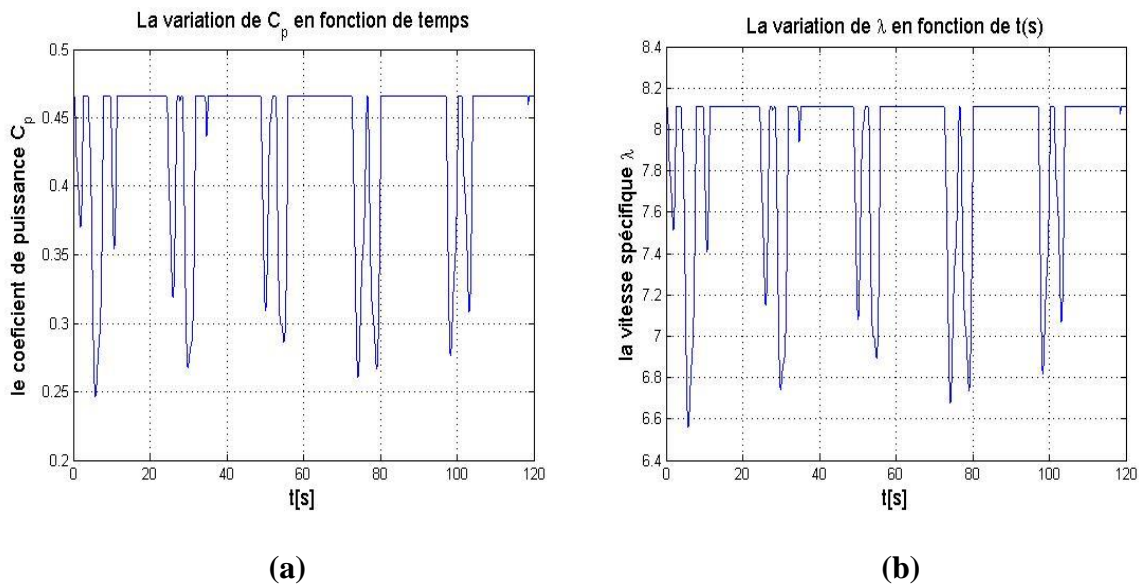
$$\begin{cases} P_n = 5 \text{ kW} \\ G = 11.25 \\ R = 3 \text{ m} \end{cases}$$


FIG.III.7. (a) variation de la vitesse du vent et (b) variation de la vitesse de rotation de la turbine



(a)

(b)

FIG.III.8. (a) variation de C_p en fonction de temps, (b) Variation de λ en fonction de temps.

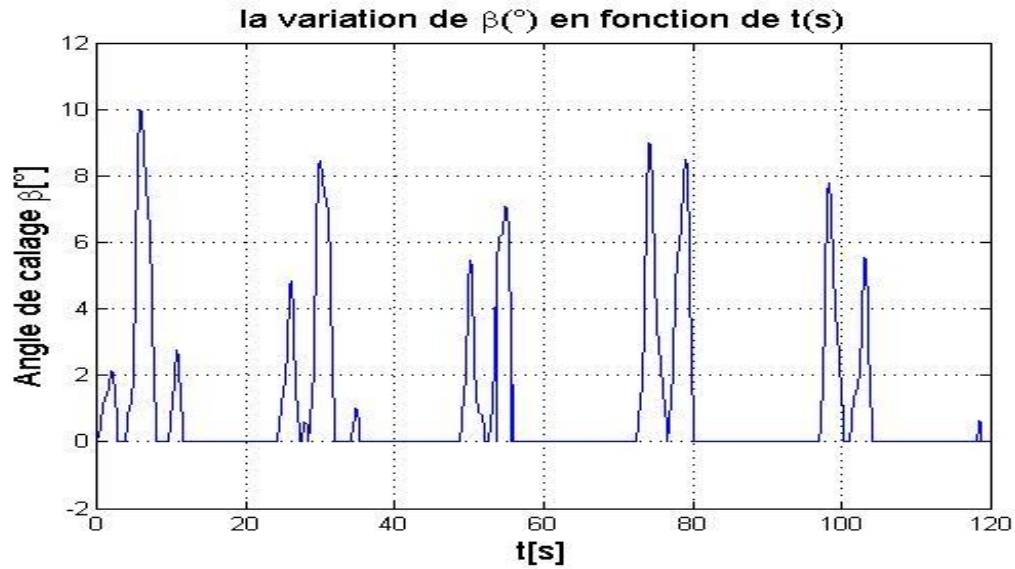


FIG.III.9. variation de l'angle de calage (pitch angle)

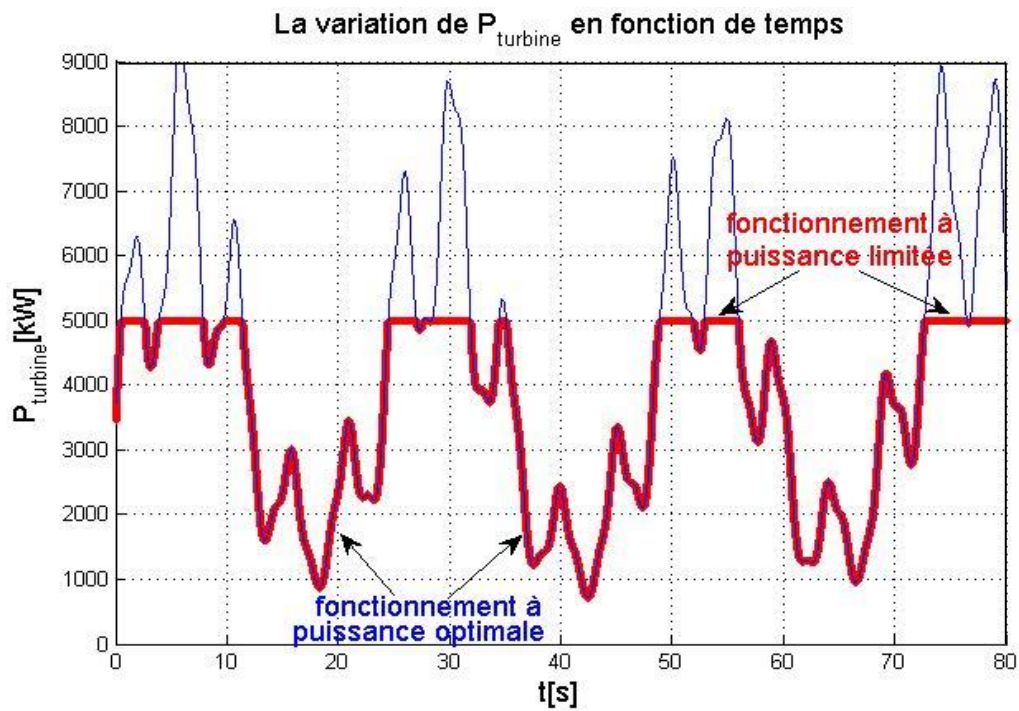


FIG.III.10. puissance aérodynamique disponible et la puissance extraite

11. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié le fonctionnement de la partie mécanique de la chaîne éolienne. Un algorithme d'optimisation du fonctionnement de la turbine est réalisé. Les résultats de simulation ont montré un bon suivi du point de fonctionnement optimal de l'éolienne pour les faibles vents, et aussi une bonne régulation de la puissance autour de la puissance nominale de l'éolienne pour assurer sa protection dans le cas des vents forts.

Conclusion générale

Cette étude a porté sur le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en tant que génératrice électrique pour une turbine éolienne. Elle peut fonctionner en étant raccordé au réseau électrique, et dans un fonctionnement en isolé alimentant une charge résistive ou une charge réelle.

Dans un premier temps, nous avons présenté les principes de l'éolienne et mis en évidence les topologies électriques des éoliennes ayant une MAS comme génératrice.

Dans la deuxième partie, après avoir rappelé les caractéristiques de la machine asynchrone à cage, nous avons abordé l'identification de la machine qui a servi à l'étude expérimentale pour l'auto-amorçage et le raccordement au réseau.

Dans la troisième partie nous avons traité la modélisation mathématique de la machine, puis nous avons inséré dans cette modélisation la prise en compte du phénomène de saturation, par une méthode de variation de l'inductance de magnétisation en accord avec le courant magnétisant. Nous avons ensuite traité le cas du fonctionnement de la machine dans un cadre d'auto-amorçage, puis dans le cadre du raccordement au réseau électrique, dans l'expérience et dans la simulation et validé le modèle. La simulation a donné des résultats très proches de la réalité. Bien que lors du raccordement, il est difficile d'obtenir des résultats identiques dû au caractère aléatoire du phénomène de pic de courant, dont les intensités dépendent de l'instant de connexion et du déphasage entre les courants statoriques et les tensions du réseau. Dans une dernière partie nous avons réalisé les simulations pour le fonctionnement de la machine en isolé. L'adjonction de la charge à la machine (dans les deux cas charge résistive et charge inductive) induit une chute de la tension statorique.

La poursuite de cette étude serait intéressante pour un contexte de défauts apparaissant sur le réseau, de moyen de réduction des pics au moment du raccordement ou de la prise en compte des pertes dans le modèle de la machine.

Bibliographie

- [1] Global Wind Statistics 2013, parue le 05/02/2014, Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net/>, pp-4
- [2] Coralie Muschiatti, Sébastien Friess "L'énergie éolienne", CdERN (Centre Didactique des Energie Renouvelables du Gymnase de Nyon), Suisse, 2009, pp-1-25
- [3] S.Metatla, "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA", Mémoire de magistère en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009, pp-5-60
- [4] E.Rogier, "Cahier d'Éole", Agence Méditerranéenne de l'Environnement, Montpellier No.2, 2000, pp-1-15
- [5] T.A.Tamegh "Modélisation et Simulation D'un Système De Jumelage Eolien-Diesel", Maitrise En Ingénierie, Université Du Quebec, Canada, 2012, pp-20-67
- [6] T.Ackermann, L.Söder, "An overview of wind energy status", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.6, No.67–128, 2002, pp-70-87
- [7] Frédéric POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne, Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003, pp-11-36
- [8] Rafika DRARENI, Zahra OUAHRANI, "Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC", Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009, pp-6-21
- [9] <http://www.w-hs.de/erkunden/fachbereiche/elektrotechnik-naturwissenschaften/>
- [10] <http://winddose.com/wind-turbine-technologies.html>
- [11] <http://www.thermoradiances.ch/eolien-rendement.htm>
- [12] Duc-Hoan TRAN Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale Institut National Polytechnique de Toulouse thèse de doctorat, 2010, pp-6-10
- [13] Haritza Camblong, Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. ENSAM N° ordre 2003-22, pp-9-15
- [14] Salma EL AIMANI, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de doctorat délivré conjointement par l'école centrale de Lille et l'université des sciences et technologies de Lille, 2004, pp-46-97
- [15] M. Kassa IDJDARENE, " Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes", Thèse de doctorat en sciences de l'Université Abderrahmane MIRA–Bejaia et doctorat de de l'Université Lille 1, 2010, pp-20-100

- [16] Ali NESBA, "Génératrice Asynchrone en Régime Dynamique : Extension du Modèle Linéaire à la Saturation", Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger
- [17] Li WANG, Ching-Huei LEE, "A novel analysis on the performance of an isolated self-excited induction generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 2, 1997, pp-109-114
- [18] Yasmine BENDJEDDOU, " Contribution à l'étude des performances d'un générateur asynchrone", Thèse de magistère, L'Université Hadj Lakhdar Batna, 2013, pp-14-44
- [19] <http://wanclik.tade.free.fr/InductionACmotor.htm>
- [20] Saïd MEKHTOUB, "Machine asynchrone en régime saturé", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2001, pp-6-24
- [21] Ali NESBA, "Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone", Thèse de doctorat en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007, pp-10-17, pp-45-65
- [22] MOHAMMEDI Imène Zoulikha, BOURAY Islam, "Modélisation d'un générateur asynchrone à vitesse fixe", Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, 2013, pp-34-51
- [23] M. KAIROUS Djilali, "Calcul analytique du couple et des courants dans une machine asynchrone auto excitée reliée au réseau ", Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004, pp-11-39
- [24] A. MOUSSA SIDDO et I. SOUMANA NOUHOU, "Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne", Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007, pp-41-50
- [25] A. Mirecki, X. Robo am and F. Richardeau, "Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 54, N°1, 2007.
- [26] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla "Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne ", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13 N°1 (2010) 149 - 161
- [27] Adam MIRECKI, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", THÈSE de doctorat à l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005, p 43.
- [28] A. BOUHARCHOUCHE, " Etude et commande d'un système de production hybride éolien photovoltaïque", Thèse de magister, Ecole Militaire Polytechnique, 2013.