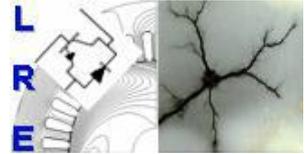




Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :

ASFIRANE Salim

Intitulé

Intégration du Générateur Asynchrone au Réseau via un Gradateur

Promoteurs :

- Pr. S. Mekhtoub
- M. Imadouchene

**Ecole Nationale Polytechnique
Université UMM Tizi-Ouzou**

ENP 2014

ملخص

هذا العمل ينص على التعريف بالخصائص الكهربائية للمولد الكهربائي اللامتزامن ذو قفص السنجاب و تمثيل المولد في النظامين الخطي و المشبع ، 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 خطي ، نظام مشبع ، وصل الشبكة ، 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. Les résultats de simulation de l'accrochage direct, et via gradateur de la génératrice asynchrone à cage au réseau électrique sont présentés

Mots clés : Eolienne, génératrice asynchrone, cage d'écureuil, modélisation, simulation, régime saturé, accrochage réseau, gradateur, démarrage doux.

Abstract

This thesis focuses on the study of squirrel cage induction generator. A model has been developed in magnetic saturation. Then, we present simulations of stand-alone operation of the asynchronous generator in a grid connection situation.

Key words: Wind turbine, Asynchronous generator, squirrel cage, modeling, simulation, saturated, self-priming, grid connection, AC chopper, soft-start.

Remerciements

Je remercie Dieu, de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études.

Je remercie mes promoteurs, le professeur Saïd MEKHTOUB et Malika IMADOUCHENE pour m'avoir suivi et soutenu pour réaliser ce travail.

Je remercie monsieur le président, et les membres du jury qui ont accepté d'évaluer et de corriger ce travail.

Je tiens aussi à remercier les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à ma formation.

Je remercie enfin, tous ceux qui ont, d'une quelconque façon, contribué à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

A ma défunte grand-mère,

A ma mère,

A mes sœurs,

A mes camarades de l'école nationale polytechnique,

A mes amis,

Je dédie ce travail.

Salim

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. Puissance captée par l'éolienne	9
6. Aérogénérateurs connectés au réseau	12
6.1 Machine Synchrone	12
6.1.1 Machine synchrone à aimants permanents connectée au réseau	13
6.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un redresseur	13
6.1.3 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un convertisseur 4 Quadrants	14
6.1.4 Machine synchrone multipolaire	14
6.2 Machine asynchrone	14
6.2.1 Machine asynchrone à cage à vitesse fixe	15
6.2.2 Machine asynchrone à cage avec convertisseur de fréquence	15
6.2.3 Machine asynchrone à rotor bobiné (dissipation de la puissance)	15
6.2.4 Machine asynchrone double alimentation (récupération de la puissance)	16
7. Aérogénérateurs isolés	16
7.1 Machine synchrone à aimants permanents en éolien isolée	17
7.1.1 MSAP en Association avec un redresseur	17
7.1.2 MSAP association redresseur et hacheur	17
7.2 MAS à cage en éolien isolé	18
7.2.1 MAS auto-excitée par une batterie de condensateur fixe	18
7.2.2 MAS avec capacités de compensation série	18
7.2.3 MAS avec batterie de condensateurs commandés	18
7.2.4 MAS et STATCOM	19
7.2.5 MAS et Convertisseurs unidirectionnels	19
7.2.6 Convertisseurs bidirectionnels (à MLI)	19
8. Vitesse fixe / vitesse variable	20
9. Conclusion	22
Chapitre II : Modélisation du générateur à cage	
1. Introduction	24
2. Modélisation de la MAS à cage	24
2.1 Equations électriques générales de la machine	24

2.2 Modèle diphasé équivalent de la machine asynchrone (modèle de R.H Park)	26
2.3 Modèle de la machine asynchrone à cage en saturé	30
3. Conclusion	34
Chapitre III : Utilisation du gradateur pour l'intégration au réseau	
1. Introduction	36
2. Gradateur de tension	36
3 Principe de au réseau	38
4. Modélisation de la machine	40
5. Modélisation du gradateur	41
6. Résultats de simulation	42
7. Conclusion	47
Conclusion générale	49
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 respectivement 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 respectivement 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 passage dans la base de Park.
C_{em}	Couple électromagnétique
C_p	Coefficient de puissance

Introduction générale

La pénétration croissante des aérogénérateurs dans la production électrique peut affecter de nombreux aspects opérationnels dans les réseaux ; tels que la stabilité et la qualité de l'énergie. Une représentation et une modélisation précises de ces générateurs et de leurs composants pour l'étude de certains types de fonctionnement, tels que les coupures, les défauts de court-circuit, ou l'accrochage doux, restent un défi.

L'un des événements majeur de l'interaction transitoire entre un aérogénérateur et un réseau local est le raccordement au réseau lui-même. En effet, lors du raccordement au réseau électrique, des pics de courant apparaissent sur les phases statoriques et sont un risque pour la machine ou toute électronique de puissance qui lui serait associée.

L'intérêt de ce travail est de présenter une modélisation de la machine asynchrone à cage qui prend en compte la saturation du circuit magnétique, puis de réaliser une modélisation d'un gradateur dans le but d'opérer un accrochage doux et d'éviter l'apparition de pics sur les courants lors de cet accrochage.

Dans le premier chapitre on fera un rappel sur l'énergie éolienne. Nous aborderons la modélisation de la machine asynchrone à cage dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre sera consacré au raccordement au réseau, nous présenterons les modèles de la machine et du générateur utilisés pour la simulation dans le logiciel MATLAB/SIMULINK. Nous présenterons les résultats obtenus pour le raccordement sans et via gradateur, et nous terminerons 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.

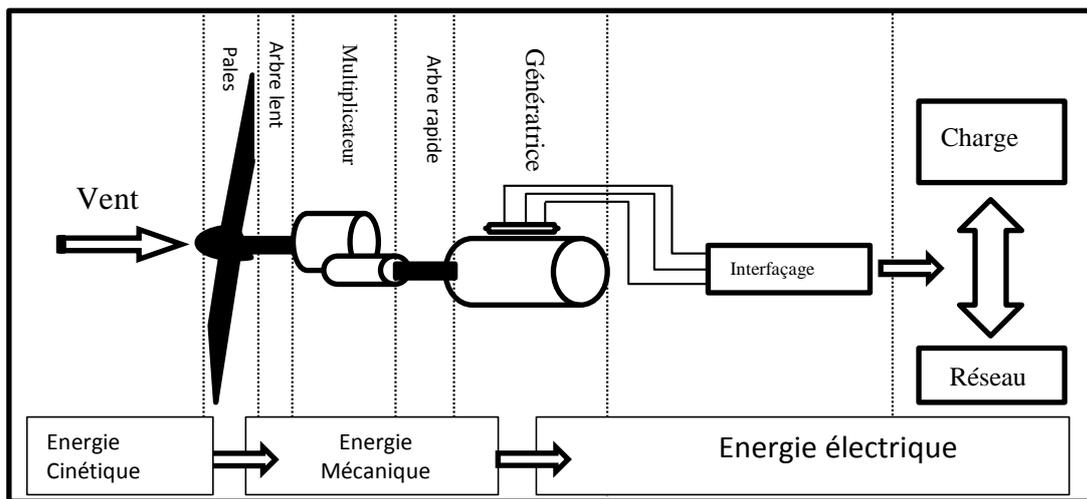


Fig.I.1 . Chaîne de conversion éolienne

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]

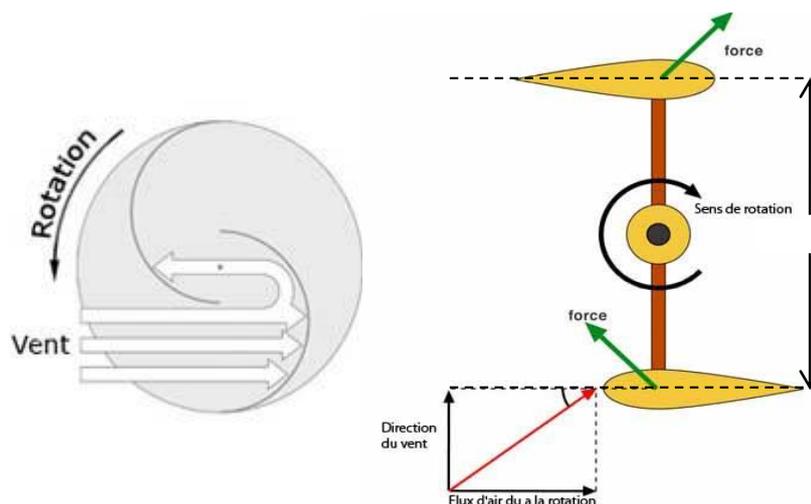


Fig.I.03 .Principe de fonctionnement à gauche "Savonius" à droite "Darrieus"

Le rotor de Savonius repose sur le principe de la trainée 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.

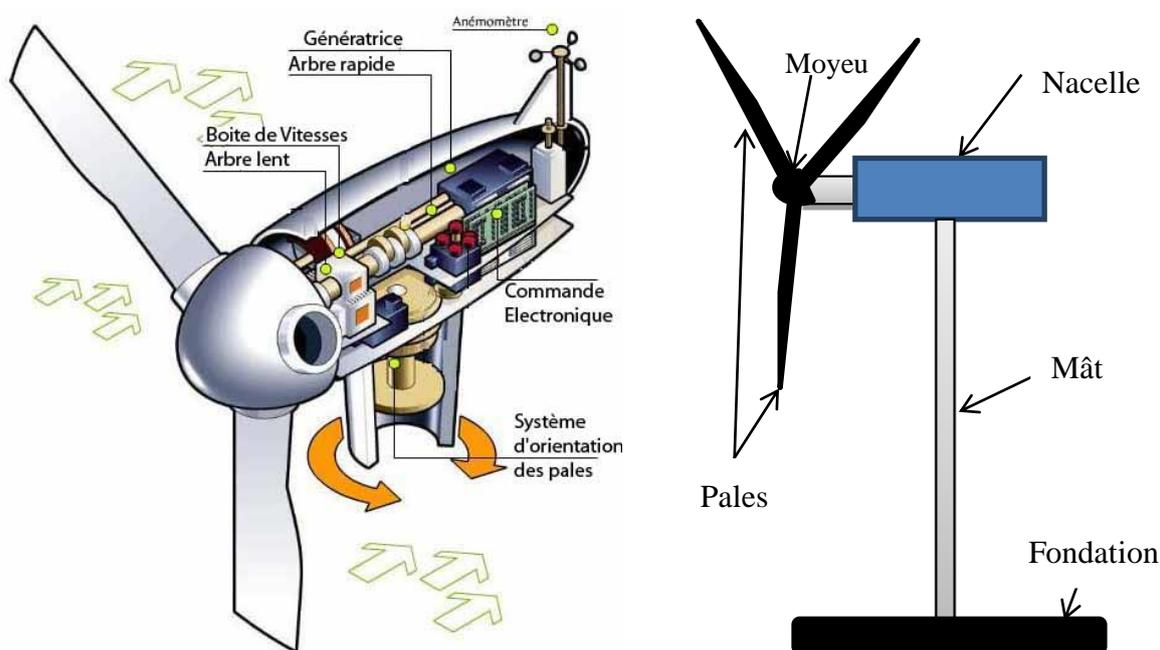


Fig.I.4 .Schéma d'une éolienne tripale

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. Puissance captée par l'éolienne

La puissance captée par l'aéroturbine est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Les variations du vent ont donc une influence considérable sur le potentiel de la puissance récupérée. Cependant, les pales font dévier le flux d'air avant qu'il n'atteigne la surface balayée par le rotor, le vent est freiné et la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortante, la surface s'élargit à l'arrière du rotor. La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent : loi de Betz.

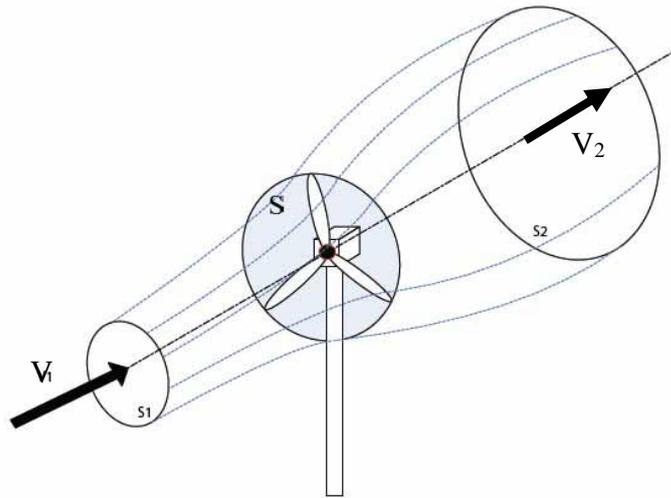


Fig.I.5 .Schéma de principe loi de Betz [12]

Cette loi, énoncée par Albert Betz, définit le pourcentage qui peut être extrait de l'énergie cinétique du vent à vitesse donnée et donc la limite de la puissance extractible à partir du vent :

V_1 : Vitesse du vent avant d'atteindre les pales de l'éolienne.

V_2 : Vitesse du vent après le passage à travers le plan de rotor.

V : Vitesse du vent au niveau des pales (vitesse moyenne du vent traversant la surface balayée par le rotor). $V = \frac{V_1+V_2}{2}$

S : Surface balayée par le rotor.

m : La masse d'air traversant l'éolienne : $m = \rho S V = \rho S \frac{V_1+V_2}{2}$ avec ρ : densité de l'air.

La puissance extraite lors du passage du flux d'air à travers les pales est par la seconde loi de Newton: $P_{extractible} = \frac{1}{2} m V_1^2 - \frac{1}{2} m V_2^2 = m \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2}$

En substituant la masse par son expression en fonction de la densité, de la surface balayée et de la vitesse du vent au niveau des pales : $P_{extractible} = \rho S \frac{(V_1+V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4}$

La puissance théorique étant calculée à partir de la vitesse V_1 du vent non perturbé par la présence de l'éolienne et son passage à travers le rotor elle équivaut à :

$$P_{théorique} = \frac{\rho S V_1^3}{2}$$

On définit le coefficient de puissance C_p rapport des puissances extractible et

$$\text{théorique : } C_p = \frac{P_{\text{extractible}}}{P_{\text{théorique}}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_1}{V_2} \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right)$$

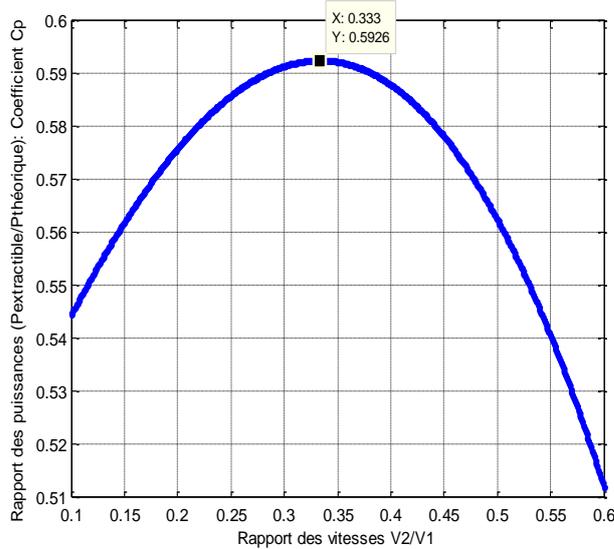


Fig.I.6 . Evolution de Coefficient de Puissance en fonction de $\frac{V_2}{V_1}$

En étudiant l'évolution de ce coefficient en fonction du rapport des vitesses V_2/V_1 représenté par la Figure.I.6, C_p atteint son maximum théorique à 0,59 pour un rapport égale à 1/3.

$C_p = 0,59$ est la limite théorique (limite de Betz) de la fraction maximale de puissance du vent qu'une éolienne puisse extraire à vitesse de vent donnée. Cependant, en pratique, chaque turbine éolienne, indépendamment de ses paramètres de construction dispose de sa propre courbe caractéristique de coefficient de puissance C_p dont le maximum est en dessous de cette limite théorique qui n'est jamais atteinte dues aux différentes pertes. On définit ici un rapport qui influe sur ces pertes : le tip-speed ratio (TSR) ou le rapport de la vitesse en bout de pale et de la vitesse du vent :

$$\lambda = R\omega_T/V_1$$

Avec : R : rayon de la pale, ω_T : vitesse angulaire de la turbine, V_1 : vitesse du vent.

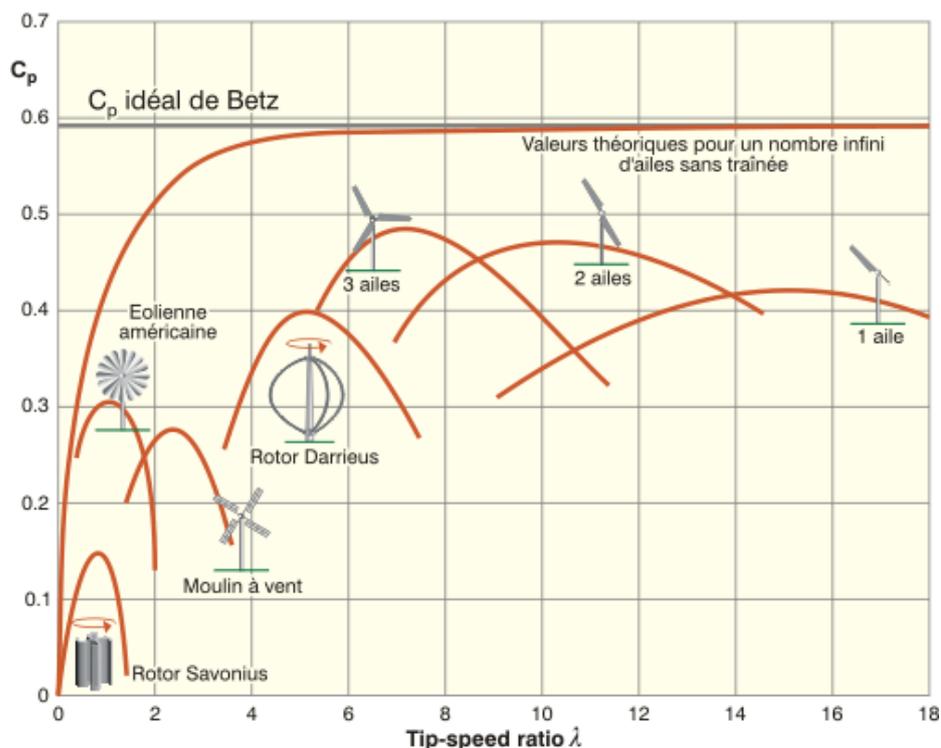


Fig.I.7 .Evolution de Coefficient de Puissance en fonction de λ de différentes éoliennes [11]

Le coefficient de puissance C_p diminue rapidement pour des vitesses de vent qui entraîne les éoliennes lentes à des vitesses supérieures à leur vitesse nominale. Par opposition aux éoliennes rapides elles atteignent très rapidement leurs maximums de puissance. Les éoliennes à marche rapide ont un nombre de pales plus restreint et comportent l'avantage d'avoir un coefficient de puissance qui ne baisse que lentement lorsque la vitesse nominale est dépassée. On peut remarquer ici que les éoliennes tripales arrivent rapidement à leur maximum de puissance mais après avoir dépassé leur vitesse nominale le C_p ne diminue que lentement. C'est une des raisons pour lesquelles, elles restent aujourd'hui les plus répandues.

6. 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.

6.1 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] :

6.1.1 Machine synchrone à aimants permanents connectée au réseau

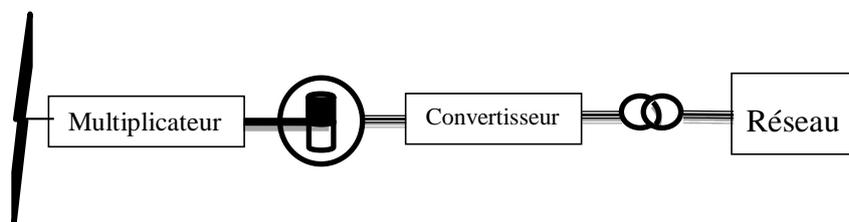


Fig.I.8. MSAP Connectée au réseau

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].

6.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un redresseur

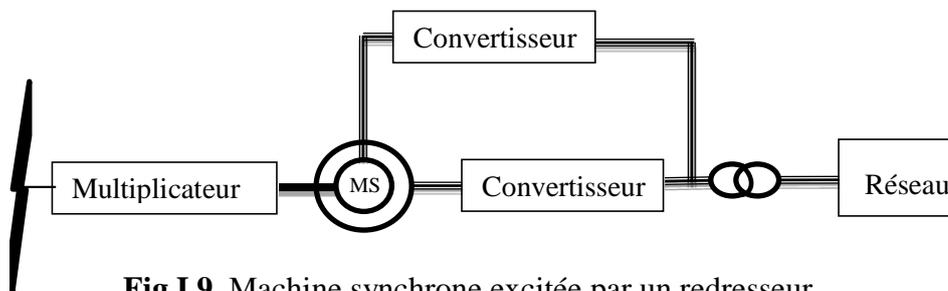


Fig.I.9. Machine synchrone excitée par un redresseur

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.

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

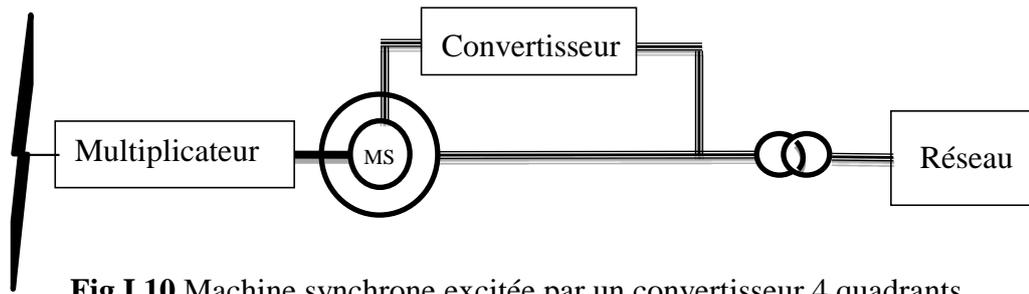


Fig.I.10.Machine synchrone excitée par un convertisseur 4 quadrants

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

6.1.4 Machine synchrone multipolaire

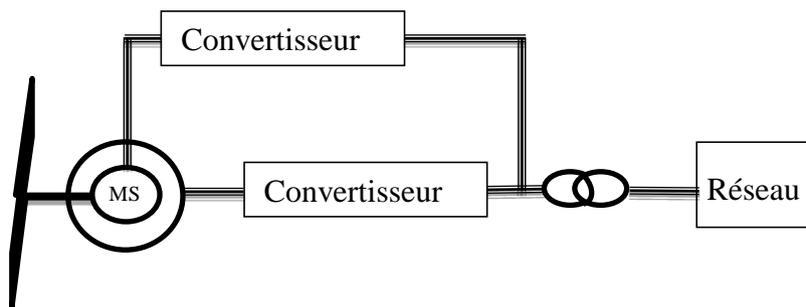


Fig.I.11 .Machine synchrone Multipolaire

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

6.2 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 :

6.2.1 Machine asynchrone à cage à vitesse fixe

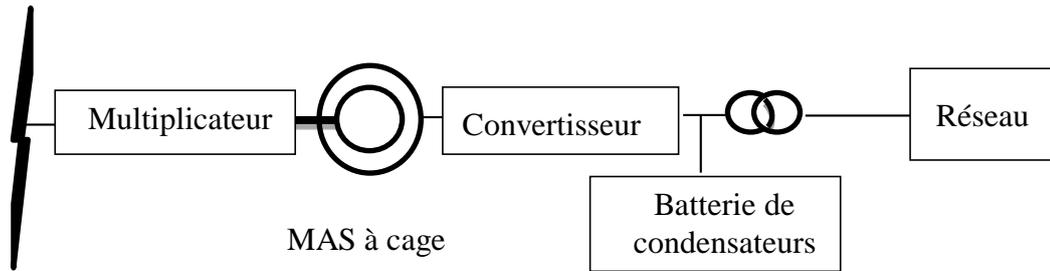


Fig.I.12 .MAS à cage à vitesse fixe

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

6.2.2 Machine asynchrone à cage avec convertisseur de fréquence

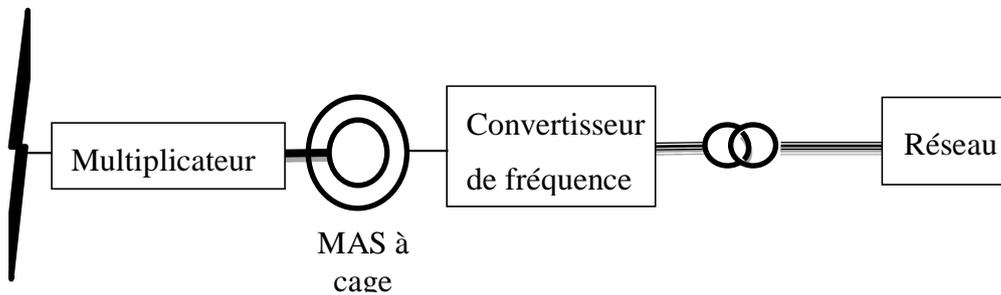


Fig.I.13 .Machine Asynchrone à cage avec convertisseur de fréquence

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.

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

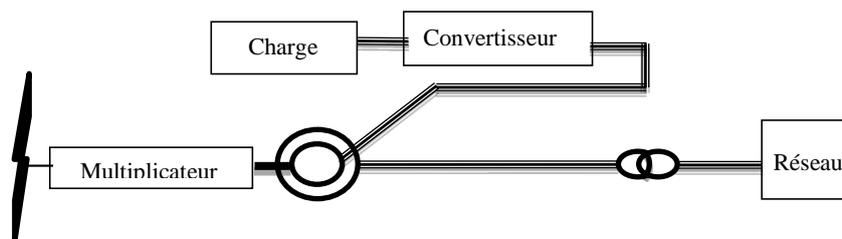


Fig.I.14 .Machine Asynchrone à rotor bobiné
(Dissipation de la puissance rotorique)

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.

6.2.4 Machine asynchrone double alimentation (récupération de la puissance)

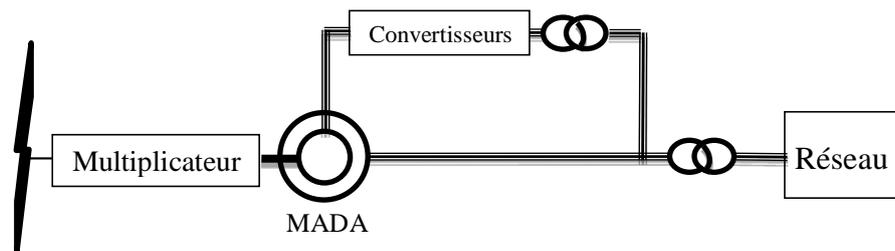


Fig.I.15. MADA récupération de la puissance

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).

7. 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.

7.1 Machine synchrone à aimants permanents en éolien isolée

7.1.1 MSAP en Association avec un redresseur

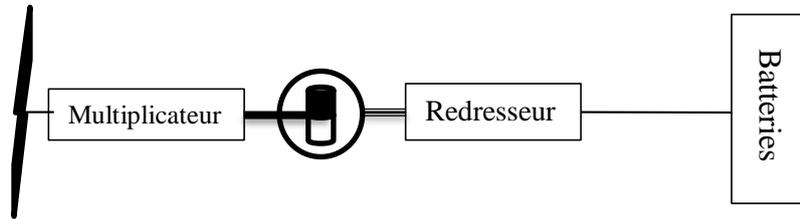


Fig.I.16. MSAP et Redresseur

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.

7.1.2 MSAP association redresseur et hacheur

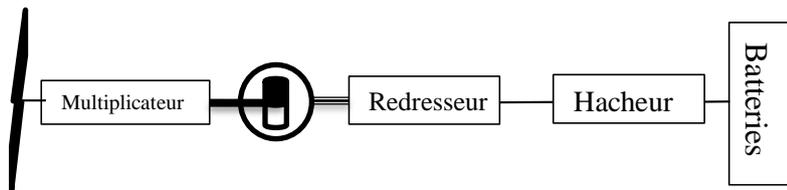


Fig.I.17. MSAP avec redresseur et hacheur

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.

7.2 MAS à cage en éolien isolé

7.2.1 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.

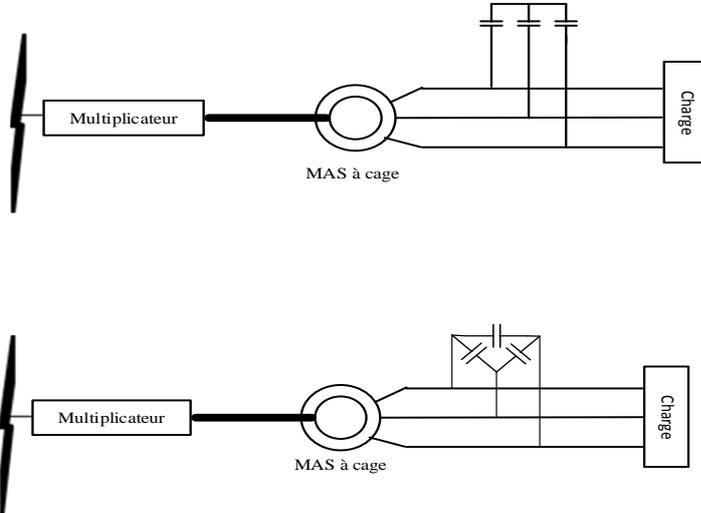


Fig.I.18 . MAS avec Banc de condensateurs

7.2.2 MAS avec capacités de compensation série :

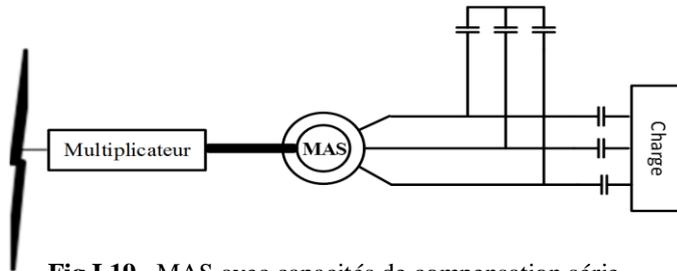


Fig.I.19 . MAS avec capacités de compensation série

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].

7.2.3 MAS avec batterie de condensateurs commandés

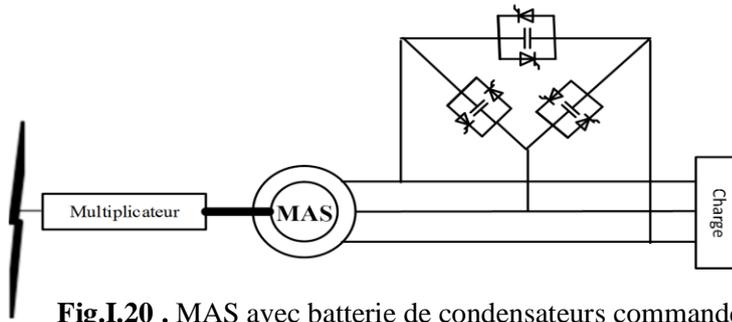


Fig.I.20 . MAS avec batterie de condensateurs commandés

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].

7.2.4 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].

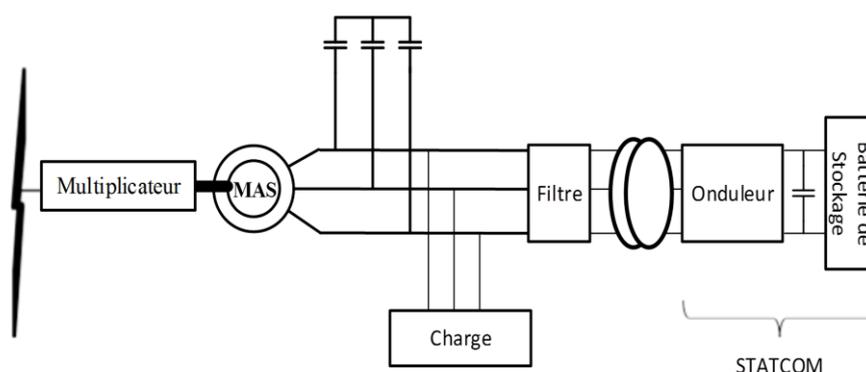


Fig.I.21. MAS avec STATCOM

7.2.5 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.

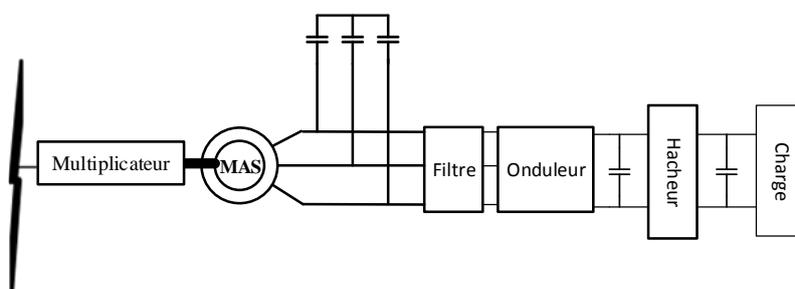


Fig.I.22 . MAS et Convertisseurs unidirectionnels

7.2.6 Convertisseurs bidirectionnels (à MLI)

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

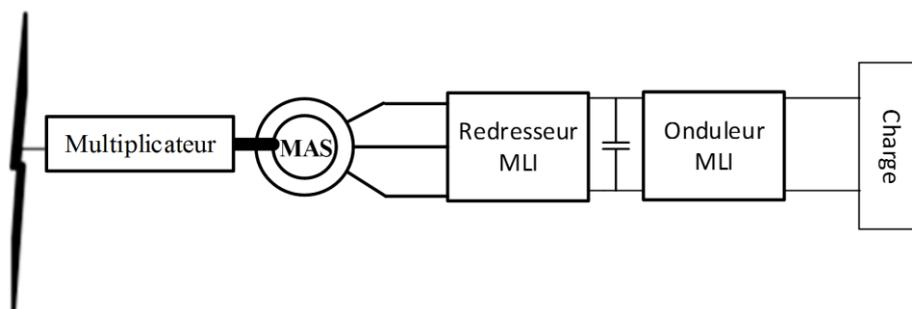


Fig.I.23 .MAS avec Convertisseurs bidirectionnels (à MLI)

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].

8. 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].

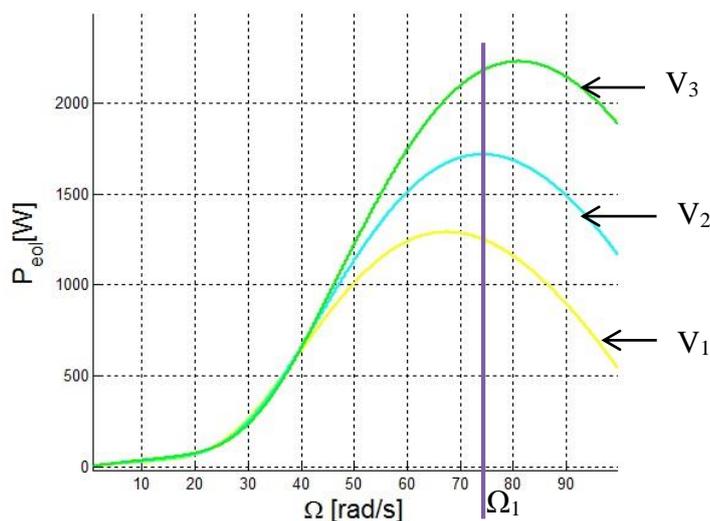


Fig.I.24. Puissance générée d'une éolienne en fonction de la vitesse de la génératrice pour plusieurs vitesses du vent

La figure I.24 représente la caractéristique générale de la puissance en fonction de la vitesse d'une aéro turbine 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.

9. 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 du générateur 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 ce modèle, pour tenir compte du phénomène de saturation.

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 c'est deux conditions et nous permet le passage du système triphasé au système biphasé dans la base de Park. Cependant, dans un premier temps voici les hypothèses simplificatrices que l'on adoptera :

- Les harmoniques d'espaces sont négligés.
- L'entrefer est supposé constant (épaisseur constante).
- Les pertes ferromagnétiques sont supposées inexistantes (Courants de Foucault et pertes par hystérésis nuls).
- 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 (le circuit magnétique de la machine ne sature pas).

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 vecteur des tensions statoriques et rotoriques:

$$[v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad [v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}$$

Les courants statoriques et rotoriques:

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

Les flux totaux statoriques et rotoriques :

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Les matrices des résistances :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

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.

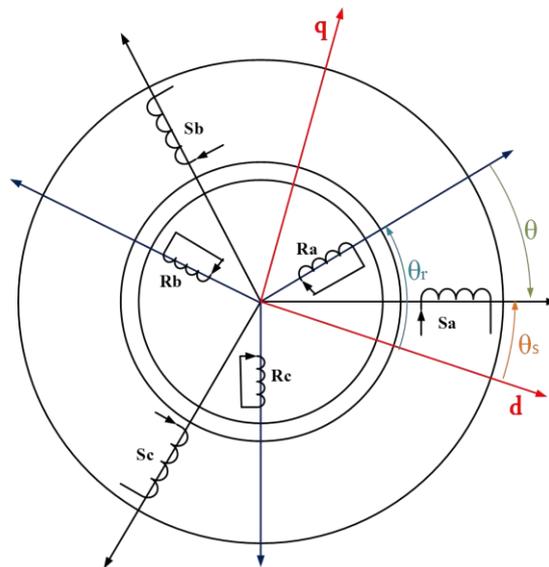


Fig.II.1. Systèmes d'axes abc et dq

- 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.

Nous aurons :

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

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

Avec :

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

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

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

Avec l'angle θ_s qui intervient pour les grandeurs du 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 :

$$\frac{d}{dt}[p(\theta_s)] = -\frac{d\theta_s}{dt} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta_s & \cos \theta_s \\ 0 & \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$[p(\theta_s)]^{-1} \left(\frac{d}{dt} [p(\theta_s)] \right) = -\frac{2}{3} \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta_s & \cos \theta_s \\ 0 & \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$[p(\theta_s)]^{-1} \left(\frac{d}{dt} [p(\theta_s)] \right) [\Phi_{sp}] = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{so} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix}$$

$$[v_{sp}] = [R_s][i_{sp}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sp}] + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

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

$$v_{so} = R_s i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt}$$

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sq}$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sd}$$

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):

$$v_{ro} = R_r i_{ro} + \frac{d\Phi_{ro}}{dt}$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rq}$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rd}$$

Ou sous la forme matricielle :

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

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 :

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

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

$$\mathcal{L}_s = L_s - M_s$$

Inductance propre cyclique du stator

$$\mathcal{L}_r = L_r - M_r$$

Inductance propre cyclique du rotor

$$\mathcal{M} = \frac{3}{2} m_{sr}$$

Inductance mutuelle cyclique

En combinant les systèmes d'équations, on peut écrire les équations II.7 et II.8 et pour simplifier notre modèle davantage on considèrera le repère (dq) lié au stator et on écrit que : $\theta_s = \theta - \theta_r$, $\dot{\theta}_s = 0$, $\dot{\theta}_r = -\omega$ donc $\omega_s = 0$ $\omega_r = -\omega$ on obtient la forme matricielle suivante :

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

2.3 Modèle de la machine asynchrone à cage en 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 [19, 20, 21, 22], 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 divergent 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 dirigeront dans la partie suivante vers le modèle de la machine asynchrone à cage en 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 $B(H)$.

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 en 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 se basent sur le réajustement du flux magnétisant à l'aide de facteurs de saturation [20].

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).

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

$$\Phi_{sd} = l_s i_{sd} + \Phi_{md} \quad (\text{II.16})$$

$$\Phi_{sq} = l_s i_{sq} + \Phi_{mq} \quad (\text{II.17})$$

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

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

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 :

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

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

On pose les flux magnétisants :

$$\Phi_{md} = M_{st} i_{md} \quad (\text{II.22})$$

$$\Phi_{mq} = M_{st} i_{mq} \quad (\text{II.23})$$

Avec : M_{st} : Inductance magnétisante statique.

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

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

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

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

Les équations des tensions du modèle de Park de la machine font apparaître (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.16 à II.19) on peut écrire :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt}(l_s i_{sd} + M_{st} i_{md}) - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sq} \quad (\text{II.28})$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt}(l_s i_{sq} + M_{st} i_{mq}) + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sd} \quad (\text{II.29})$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt}[-l_r i_{sd} + (l_r + M_{st}) i_{md}] - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rq} \quad (\text{II.30})$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt}[-l_r i_{sq} + (l_r + M_{st}) i_{mq}] + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rd} \quad (\text{II.31})$$

En développant la dérivée du flux on obtient [15], [21]:

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

Puisque les inductances de fuite ont été supposées constantes :

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

Comme M_{st} est fonction de $|i_m|$ nous pouvons écrire :

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

On posera :

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

La dérivée du courant magnétisant est [14,20]:

$$\frac{d|i_m|}{dt} = \frac{d}{dt} \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} = \frac{i_{md}}{|i_m|} \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt}$$

On aboutira à l'expression de la dérivée du flux :

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

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

$l_s \frac{di_{sd}}{dt}$: Flux de fuite.

$\left[M_{st} + M'_{st} \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{md}}{dt}$: Effet dû à la saturation suivant l'axe direct.

$M'_{st} \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt}$: Effet du courant de l'axe q sur le flux d'axe d. Effet de saturation croisée.

On posera :

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

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

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

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

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + M_d \frac{di_{md}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (\text{II.32})$$

$$\frac{d\Phi_{sq}}{dt} = l_s \frac{di_{sq}}{dt} + M_q \frac{di_{mq}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \quad (\text{II.33})$$

$$\frac{d\Phi_{rd}}{dt} = -l_r \frac{di_{sd}}{dt} + (l_r + M_q) \frac{di_{md}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (\text{II.34})$$

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

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.31 à II.34 on aboutit au système matricielle suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ -R_r & \omega_r l_r & R_r & -\omega_r(M_{st} + l_r) \\ -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r(M_{st} + l_r) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & M_d & M_{dq} \\ 0 & l_s & M_{dq} & M_q \\ -l_r & 0 & l_r + M_d & M_{dq} \\ 0 & -l_r & M_{dq} & l_r + M_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{III.39})$$

3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons suivi une modélisation d'abord en linéaire dans la base de R.H Park. Puis, après avoir simplifier le modèle en adoptant un choix de repère, nous avons développé celui-ci afin de prendre en compte l'effet de la saturation dans les équations de la machine. Et ce, en suivant une méthode se basant sur la variation des inductances de magnétisation en fonction du courant magnétisant.

CHAPITRE III

Utilisation du gradateur pour
l'intégration au réseau

1. Introduction

L'effet majeur produisant une interaction transitoire entre un aérogénérateur et le réseau est la connexion elle-même à celui-ci. Ceci est particulièrement important dans le cas des aérogénérateurs à vitesse fixe équipés de générateurs à cage, qu'ils soient directement raccordés au réseau ou via un convertisseur statique.

Dans ce chapitre, un modèle de simulation de l'utilisation d'un démarreur progressif lors de la connexion au réseau d'un générateur à cage d'écureuil est établi en utilisant le logiciel MATLAB/SIMULINK, les résultats de simulation de l'accrochage au réseau via un gradateur seront comparés aux résultats de l'accrochage direct.

L'analyse porte sur la vérification des transitoires produits au cours de la courte durée après la connexion au réseau local.

La littérature ne présente pas suffisamment de détails sur ce processus particulier, ainsi que la performance pratique de la connexion.

Cependant, il est important de modéliser le comportement dynamique et transitoire détaillés des aérogénérateurs et leur interaction avec le réseau local. En outre, les modèles complètement détaillés sont nécessaires pour étudier les impacts des aérogénérateurs sur les systèmes électriques.

2. Gradateur de tension

Pour faire varier l'amplitude de la tension, on place sur le stator un gradateur à thyristors. La grandeur de commande est l'angle d'amorçage ψ des thyristors.

Le gradateur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet de transformer une source de tension sinusoïdale alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative de valeur efficace variable de même fréquence.

Le gradateur se comporte comme un interrupteur. Il permet d'établir ou d'interrompre la liaison entre la source de tension et le récepteur. La tension aux bornes du récepteur évolue en fonction de la commande de l'interrupteur.

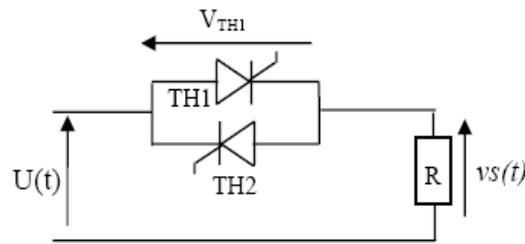


Fig III.1.Principe du gradateur de tension

L'interrupteur qui constitue le gradateur est composé de 2 thyristors montés tête-bêche ou d'un triac. Cet étage de puissance est associé à une électronique de commande permettant de faire varier l'angle d'amorçage ψ des thyristors.

Le moteur asynchrone triphasé est alimenté par l'intermédiaire d'un gradateur qui provoque la montée progressive de la tension.

On peut réduire l'intensité de démarrage à une valeur précise en agissant sur l'angle de commande des thyristors.

Pour limiter l'appel de courant au démarrage, on réduit la tension efficace, ce qui va limiter le couple moteur au démarrage.

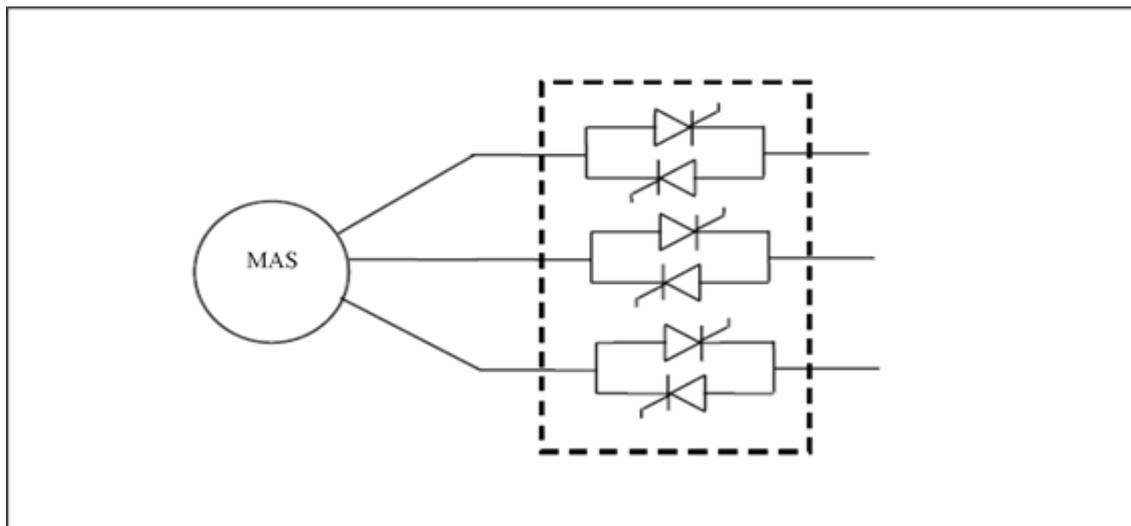


Fig III.2.Démarrage par gradateur de tension

Sur la figure **III.3** sont représentées les formes idéalisées des signaux de tension et de courant statoriques en fonctionnement moteur et générateur. Une synchronisation des commandes permet l'obtention d'un système équilibré de tensions triphasées au stator de la machine. Nous constatons que ces tensions possèdent un taux d'harmoniques élevé [23].

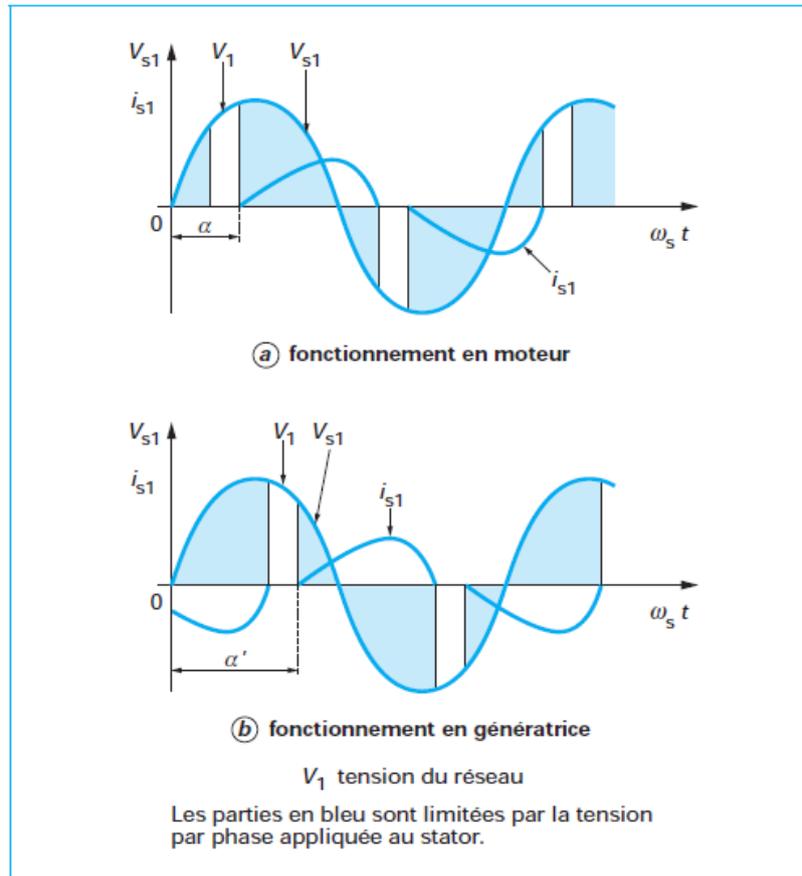


Fig.III.3.Forme des signaux courant et tensions à la sortie du gradateur [23]

3. Principe de l'accrochage au réseau

Un module de démarrage en douceur est normalement utilisé pour minimiser le courant d'appel nécessaire pour magnétiser la MAS. La figure III.4 illustre la représentation d'une MAS et de son démarreur progressif à base de thyristors.

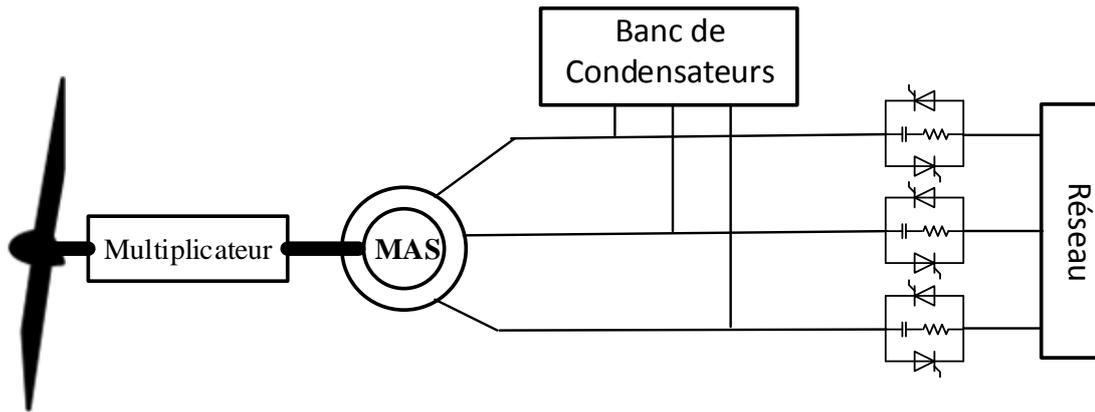


Fig.III.4.Schéma d'accrochage au réseau de la MAS via Gradateur

Le module de démarrage progressif dispose d'une paire de thyristors connectée en antiparallèle (tête-bêche) sur chaque phase. Chaque thyristor est maintenu dans l'état 'off', tel que le courant est bloqué, et il n'est déclenché que par une impulsion sur sa gâchette. Pour fonctionner dans un dispositif de limitation de courant, des impulsions de déclenchement retardées sont générées, avec une tendance à l'augmentation de l'angle de conduction de chaque thyristor.

Dans ce mode, le courant de phase est augmenté de zéro jusqu'au courant nominal. Chaque thyristor conduit sur la demi-période appropriée de la tension fournie. Nous avons la relation entre l'angle de conduction et l'angle d'amorçage des thyristors telle que : $\alpha = \pi - \psi$

Avec :

ψ : angle d'amorçage

α : angle de conduction

Le démarrage progressif fonctionne sur un court intervalle de temps, et par la suite il est court-circuité. Les démarreurs progressifs intègrent aussi des circuits de protection RC, illustrés sur la figure III.4, qui assurent que les thyristors ne soient pas exposés à des taux excessifs de variation de la tension au cours des transitoires, qui peuvent entraîner des défaillances ou endommager les thyristors [24].

Généralement, plusieurs types de configurations sont applicables pour les machines asynchrones, ayant essentiellement la même disposition pour le circuit des thyristors mais la

5. Modélisation du gradateur

Le modèle du gradateur établi sur le logiciel MATLAB/SIMULINK est donné sur la figure III.6.

Les semi-conducteurs (thyristors) sont considérés parfaits.

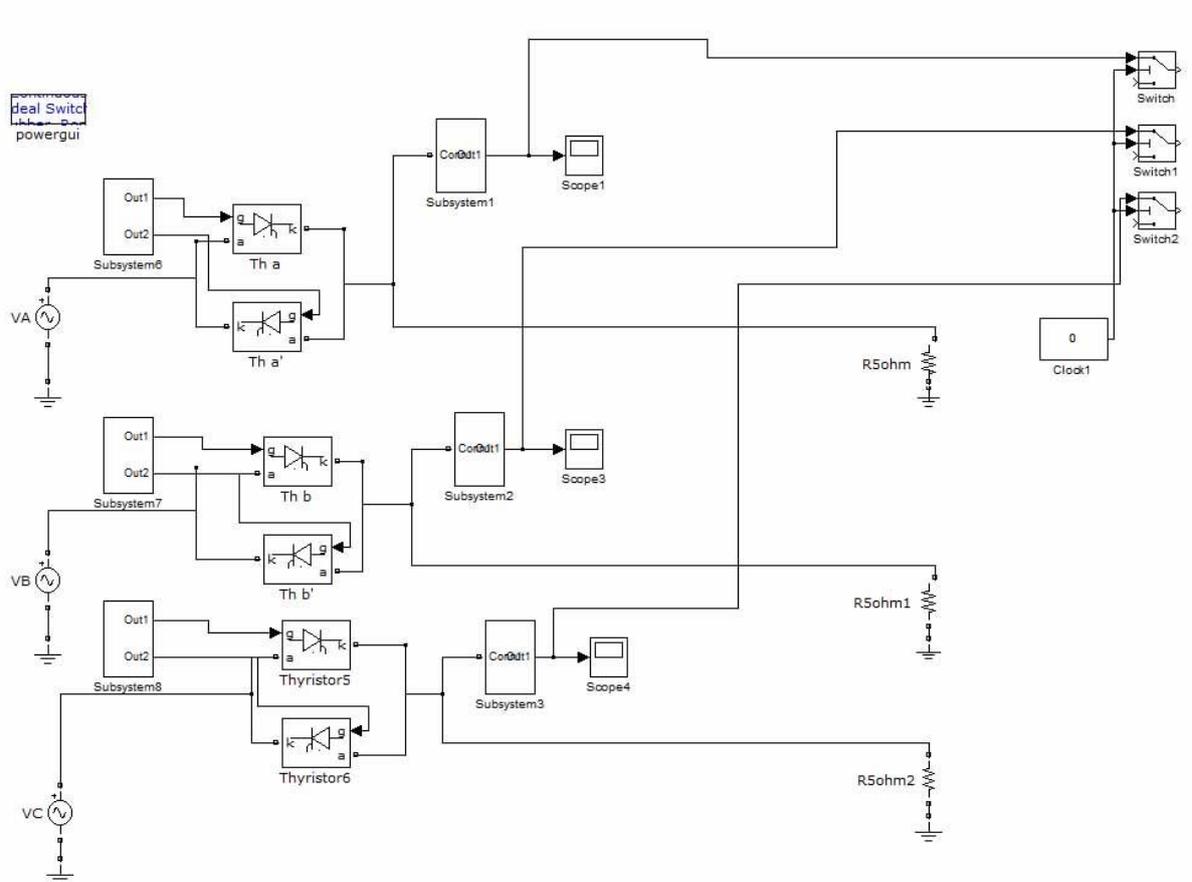


Fig.III.6. Schéma Simulink du gradateur

Le gradateur est utilisé sur les 10 périodes qui suivent l'instant d'accrochage, c'est-à-dire pour 0.2 secondes, puis par la suite il est court-circuité. Pour ces 10 périodes, une caractéristique d'angle d'amorçage en rampe est suivie pour déterminer les impulsions des gâchettes des thyristors et leurs instants de conduction. Le gradateur est court-circuité au bout de la dixième période.

La figure III.7 illustre les angles d'amorçage appliqués à la simulation pour les 10 périodes qui suivent l'accrochage :

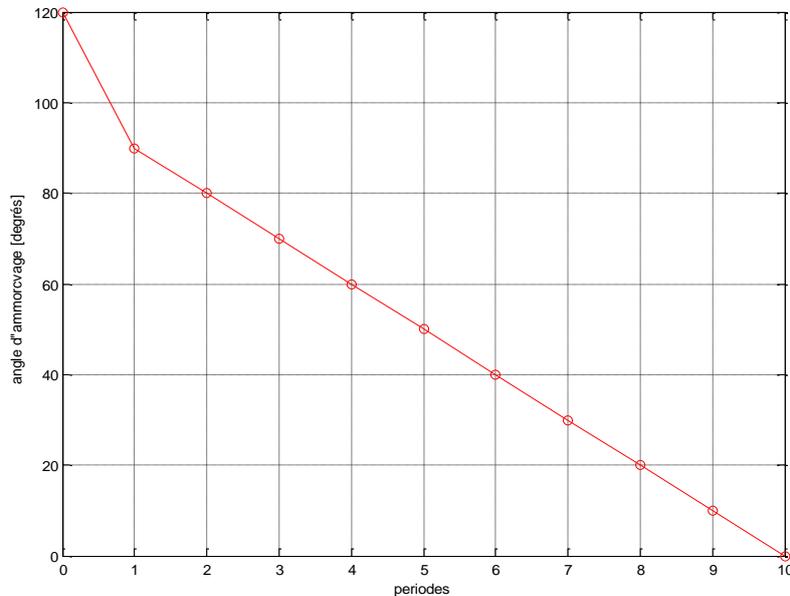


Fig.III.7. Angles d'amorçage du gradateur pendant l'accrochage au réseau

6. Résultats de simulation

Nous avons opéré pour le même instant de connexion (2.016 secondes), les simulations de l'accrochage au réseau. D'une part, directement sans passer par un gradateur, d'autre part en incluant le gradateur entre les tensions du réseau et les bornes de la machine. Nous visualisons les tensions au moment de l'accrochage et comparons ensuite les résultats obtenus par rapport au courant statorique.

Les figures III.8, III.9, III.10, III.11 sont relatives aux simulations de l'accrochage direct de la machine au réseau sans l'utilisation du gradateur. Les figures III.12, III.13, III.14, III.15 sont le résultat de la simulation de l'accrochage au réseau via gradateur.

Les figures III.8 et III.9 montrent l'évolution de la tension lors du raccordement du générateur ainsi qu'un zoom sur l'instant d'accrochage respectivement. Les figures III.10 et III.11 montrent l'évolution du courant lors du raccordement de la génératrice à cage ainsi qu'un zoom sur l'instant d'accrochage respectivement.

Les figures III.12 et III.13 illustrent l'évolution de la tension lors du raccordement de la génératrice à cage ainsi qu'un zoom sur l'instant d'accrochage. Les figures III.14 et III.15 montrent respectivement, l'évolution du courant lors du raccordement de la génératrice à cage ainsi qu'un zoom sur l'instant d'accrochage.

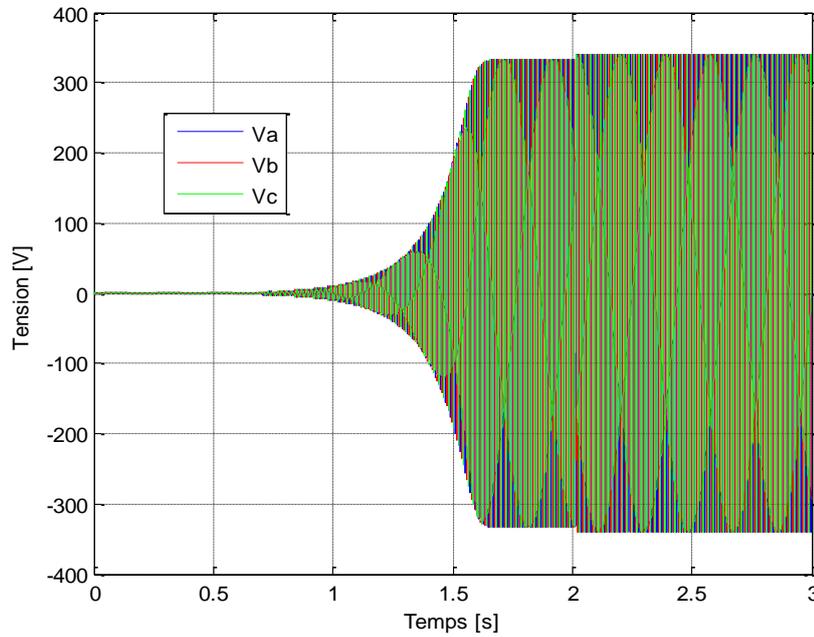
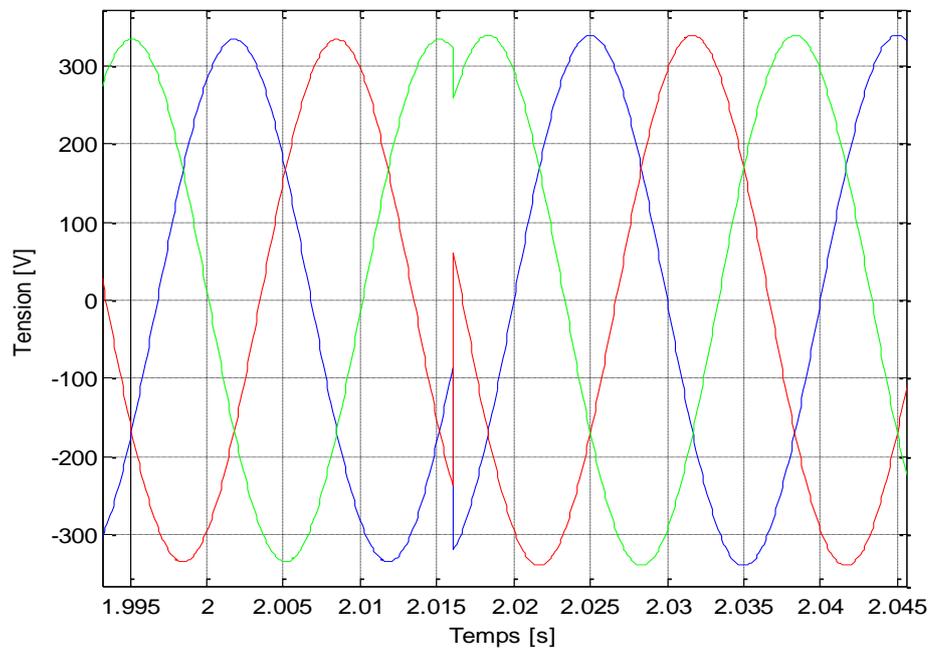


Fig.III.8. Evolution de la tension lors du raccordement sans gradateur



FigIII.9. Zoom sur le transitoire de la tension lors du raccordement sans gradateur

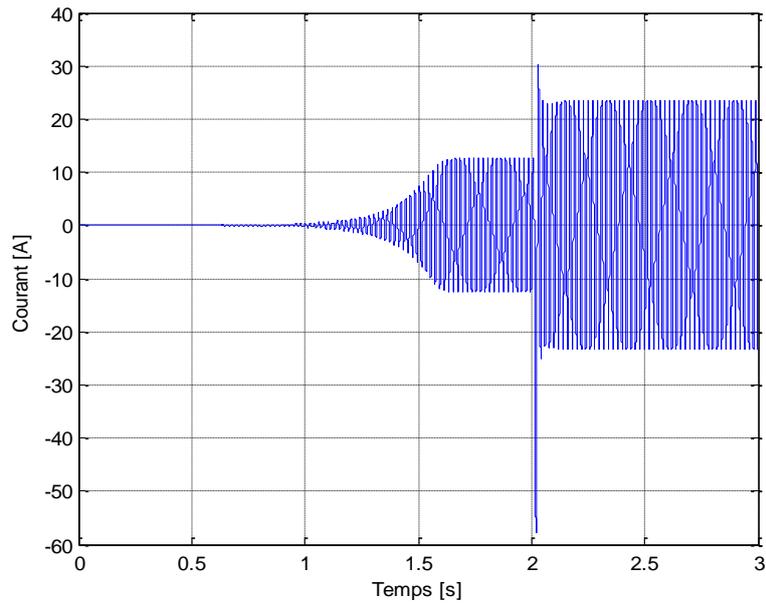


Fig.III.10. Evolution du courant lors du raccordement sans gradateur

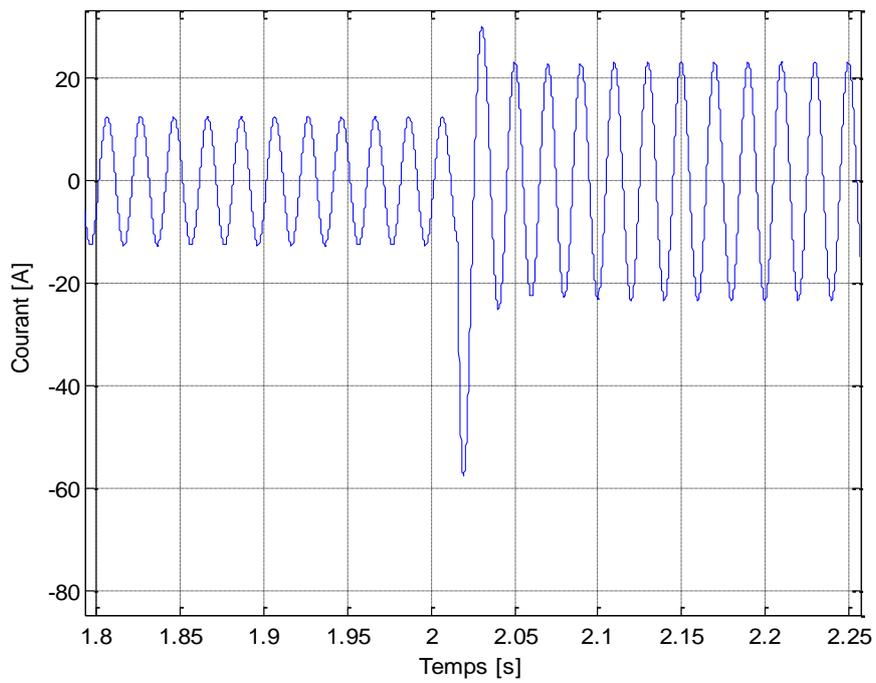


Fig.III.11. Zoom sur le transitoire du courant lors du raccordement sans gradateur

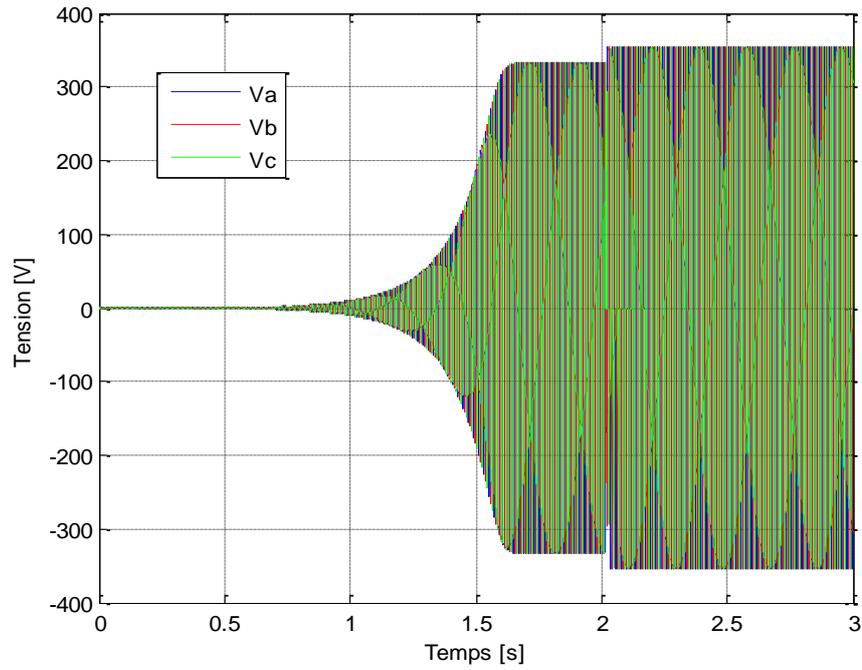


Fig.III.12.Evolution de la tension lors du raccordement via gradateur

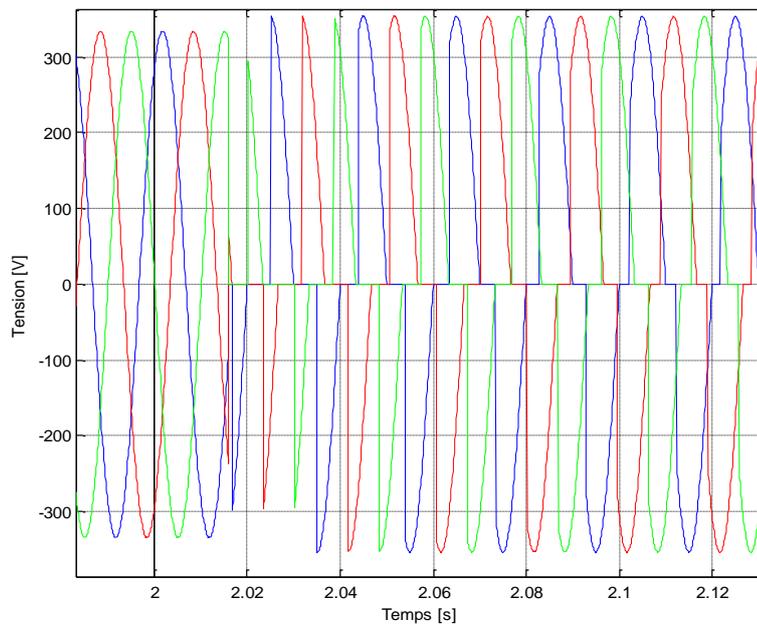


Fig III.13.Zoom sur le transitoire de la tension lors du raccordement via gradateur

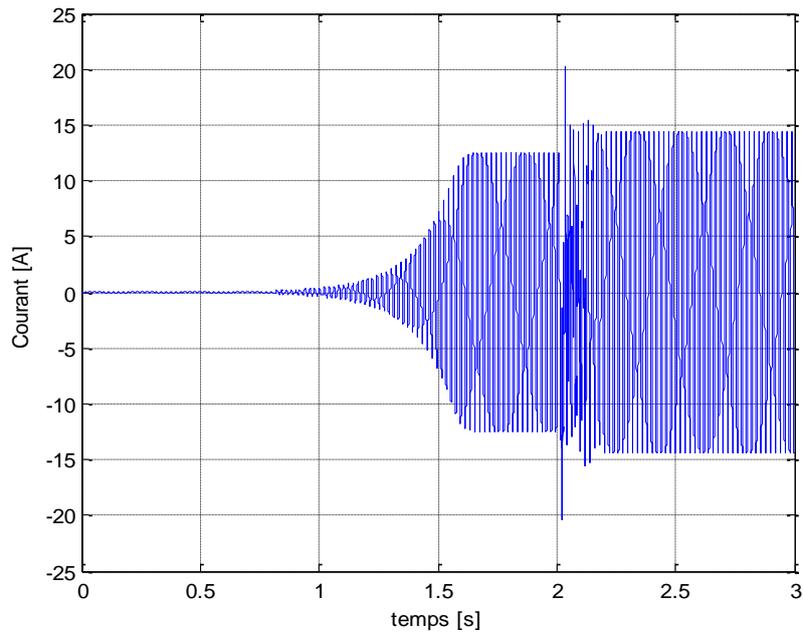


Fig.III.14.Evolution du courant lors du raccordement via gradateur

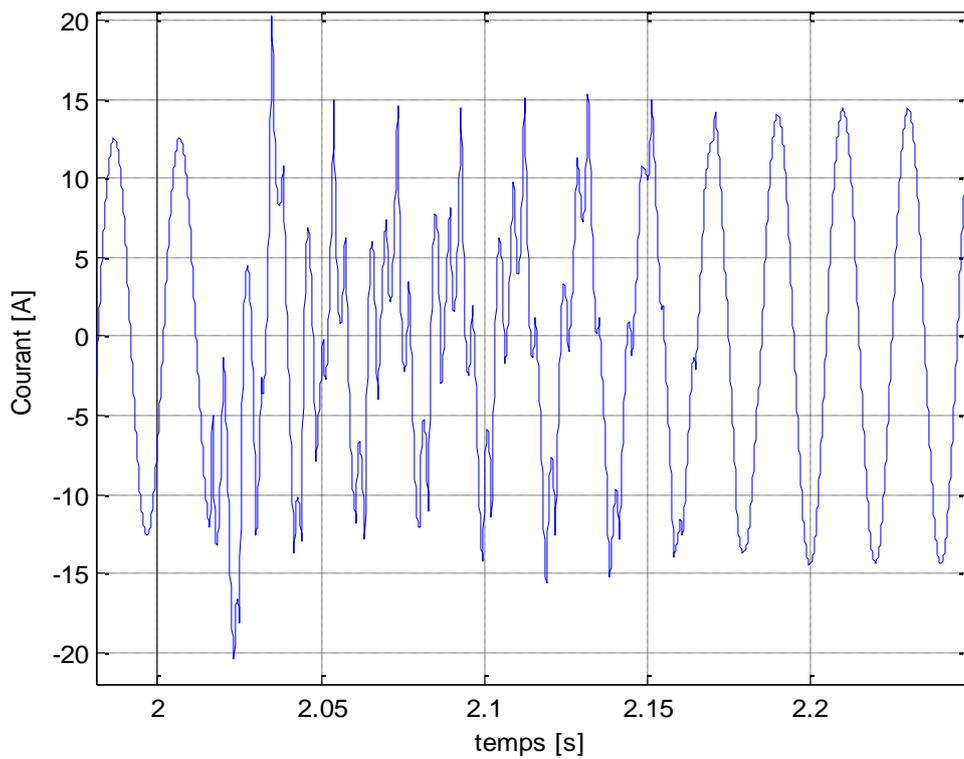


Fig.III.15.Zoom sur le transitoire du courant lors du raccordement via gradateur

On notera, sur la figure III.12, le découpage de phase de la tension pour les 10 périodes qui suivent l'instant de raccordement au réseau de la MAS.

Nous constatons en comparons les figures III.11 et III.15 que le pic de courant a fortement été atténué par l'utilisation du gradateur pour opérer la connexion au réseau. Bien que la forme du courant soit loin d'être une sinusoïde parfaite et le courant envoyé donc au réseau est pollué d'harmoniques. Mais c'est un moindre mal, puisque cela ne dure pas plus de 10 périodes (temps de l'accrochage via gradateur) et le pic de courant est réduit de $2/3$.

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une modélisation de la génératrice à cage sur le logiciel MATLAB/SIMULINK ainsi que celle du gradateur qui est utilisé pour le raccordement au réseau. Nous avons proposé une méthode d'amorçage du gradateur et nous avons présenté les résultats de simulation de l'accrochage direct sans gradateur et de l'accrochage via le gradateur. De Part la comparaison de ces résultats, nous pouvons affirmer que l'utilisation du gradateur réduit les pics de courant lors du raccordement de la machine.

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons dans un premier chapitre donné des rappels sur l'énergie éolienne et exposé les différents types de topologie rencontrées en insistant sur celles des éoliennes avec génératrice asynchrone à cage.

Dans le deuxième chapitre nous avons suivi les étapes nous conduisant à la modélisation de la machine asynchrone à cage en tenant compte de la saturation.

Dans le troisième chapitre nous avons implémenté un modèle, dans le logiciel MATLAB/SIMULINK, de la machine asynchrone à cage pour un fonctionnement en génératrice raccordée au réseau électrique et d'un gradateur dont l'utilisation se limite à l'accrochage doux de la machine au réseau. Nous avons proposé une méthode pour l'amorçage des thyristors du gradateur et réalisé pour un même instant d'accrochage les simulations dans le cas d'un raccordement direct, puis dans le cas de l'accrochage via gradateur. Nous avons comparé les résultats de ces simulations par rapport aux transitoires obtenus sur le courant.

Nous avons pu par simulation déterminer que le gradateur dans le cadre de son utilisation en association avec la génératrice asynchrone à cage pour le raccordement au réseau permettait de réduire les pics de courant.

Il serait intéressant de poursuivre cette étude et dans une perspective de détermination d'une commande pour l'amorçage des thyristors.

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 délivre 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] Yasine BENDJEDDOU, " Contribution à l'étude des performances d'un générateur asynchrone", Thèse de magistère, L'Université Hadj Lakhdar Batna, 2013, pp-14-44
- [19] Saïd MEKHTOUB, "Machine asynchrone en régime saturé", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2001, pp-6-24
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] B. DE FORNEL, "Machines asynchrones – Alimentation et caractéristiques", ARTICLE TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR d3620, 2004, pp-1-4
- [24] G. Quinonez-Varela and A. "Cruden, Modelling and validation of a squirrel cage induction generator wind turbine during connection to the local grid", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 2, No. 2, March 2008, pp-1-8
- [25] Salim ASFIRANE, Soufiane BELHADJ EZZINE, " Etude des Performances d'un Générateur à Cage en Isolé et Connecté au Réseau", Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2014