

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département de Génie électrique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

*En vu de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Électrotechnique*

Sujet

*Etude d'un Générateur Asynchrone dans La
Production d'Energie Electrique par Eolienne*

Proposé et dirigé par :	Mr.S.MEKHTOUB	MC A L'ENP	Étudié par :	
Président du jury :	Mr.R.IBTIOUEN	PR A L'ENP		SAKI ALI
Examineur :	Mr.M.MAHMOUDI	MC A L'ENP		BELAIDI MOURAD

Promotion: juin 2006

E.N.P.10, Avenue Hassen-Badi, EL-HARRACH, ALGER.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma très chère mère et mon père qui se sont sacrifiés tout au long de mes études .

Mes frères et mes sœurs.

Toute la famille SAKI.

Toute la famille BOUDIEF.

Tous mes amis .

Et tous ceux qui me sont chers.

Ali

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma très chère mère et mon père qui se sont sacrifiés tout au long de mes études.

Mon frère et mes sœurs.

Toute ma famille.

Tous mes amis.

Et tous ceux qui me sont chers.

MOURAD

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au sien du département de Génie Electrique de l'Ecole Nationale Polytechnique (EL-HARRACH. ALGER), sous la direction de monsieur le maître de conférence à l'ENP S.MEKHTOUB.

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail.

Nous remercions nos encadreur Mr :S.MEKHTOUB pour son aides, son encouragements et sa patience.

Nous remercions également tous les membres du jury, pour avoir bien voulu évalué notre travail.

Tous les enseignants qui ont contribué à notre formation pendant notre cycle de formation .

ملخص

خلال هذا العمل قمنا بدراسة المولد الكهربائي اللامتزامن الذي يعتمد على المروحة الهوائية لتدويره, وذلك بإعطاء نموذج في الحالتين الخطية و المشبعة.

قمنا أيضا بإجراء تجارب تطبيقية على هذا المولد بالمخبر الموجود في المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات, النتائج التطبيقية التي حصلنا عليها قمنا بمقارنتها مع النتائج النظرية التقديرية.

كلمات المفتاح: تحرك ذاتي، المروحة الهوائية، مولد لامتزامن، التشبع، التحاكى.

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié le générateur électrique asynchrone basé sur une turbine éolienne, avec la modélisation de ce générateur en régime linéaire et saturé.

Nous avons fait des essais sur ce générateur au niveau de l'école nationale polytechnique, les résultats obtenus expérimentalement sont comparés avec les résultats de simulation.

Mot clé : Auto-amorçage, générateur asynchrone, éolienne, saturation, modélisation.

Abstract

In this work we studied the asynchronous electric generator based on a wind turbine, with the modeling of this generator with linear and saturated rate.

We carried out tests on this generator on the level of the polytechnic national school; the results obtained in experiments are compared with the results of simulation.

Key's words: Self-excited, Asynchronous generator, wind turbine, saturation, modeling.

Table des matières

Introduction générale	4
Chapitre I : Généralités sur les éoliennes	
I.1- Introduction	6
I.2 - Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.	6
I.2.1- Définition de l'énergie éolienne	6
I.3 - Les différents types d'éoliennes	7
I.3.1- Eoliennes à axe vertical	7
I.3.2- Eoliennes à axe horizontal	7
I.4 - Principaux composants d'une éolienne	9
I.4 .1-La tour	9
I.4 .2-La nacelle	9
I.4 .2 .1-Arbre lent	10
I.4 .2 .2-Un multiplicateur	10
I.4 .2 .3-le système de refroidissement	10
I.4 .2 .4 -la génératrice	10
I.4 .2 .5 –Anémomètre	10
I.4 .2 .6 -le système de control-commande	10
I.4 .3-Le rotor et les pales	11
I.4 .4-Le moyeu	11
I.5 - Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique	12
I.5 .1- Loi de Betz.....	12
I.5 .2-Production d'énergie mécanique	14
I.6- Stratégies de fonctionnement d'une éolienne	16

I .6.1-Bilan des forces sur une pale -----	16
I .6.2-Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne -----	16
I .6.2.1-Système à décrochage aérodynamique "stall"-----	16
I .6.2.2-Système d'orientation des pales "pitch" -----	17
I .6.3-Production optimale d'énergie -----	18
I.7-Modélisation mathématique du système de conversion d'énergie éolienne:-----	20
I .7.1-Reproduction des variations du vent -----	20
I .7.2-Modélisation de la turbine -----	22
I.8-Conclusion -----	24

ChapitreII: Modélisation et fonctionnement du générateur asynchrone

II .1-Introduction -----	25
II.2- Modèle linéaire de la machine asynchrone. -----	25
II.2.1-Représentation de la machine asynchrone -----	25
II.2.2-Hypothèses simplificatrices -----	26
II.2.3-Equations générales de la machine asynchrone -----	27
II.3 - Modèle diphasé équivalent de la machine -----	29
II.4 - Choix du référentiel -----	30
II.5 - Expression du couple électromagnétique -----	31
II.6- Conclusion -----	32

Chapitre III: Fonctionnement du générateur asynchrone auto-excité

III. Introduction-----	33
III.1- L'auto excitation à vide -----	33
III.2- Détermination de la capacité minimale de l auto excitation -----	37

III.3- Les caractéristiques de fonctionnement statique	-----38
III.4- Etude dynamique	-----43
III.4.1- Développement spatial du flux	-----43
III.5- Résultats de simulation et résultats expérimentaux	-----48
III.6- Conclusion	-----50
 Chapitre IV : Le phénomène transitoire des courants lors du retour réseau	
IV.1- Introduction	-----51
IV.2- Etude du transitoire du générateur asynchrone relié au réseau	-----51
IV.2.1 Le transitoire de courant	-----53
IV.2.2 L'influence de l'instant de connexion et les déphasages sur les pics de courant	-----56
IV.3 Conclusion	-----59
 Chapitre V : Fonctionnement et modèle de la machine asynchrone à double alimentation	
V.1- Introduction	-----60
V.2- Topologie et emploi des machines asynchrones à double alimentation	-----60
V.2.1- Structure des machines asynchrones à double alimentation	-----60
V.2.2- Application des machines asynchrones à double alimentation	-----62
V.3- Fonctionnement en génératrice à vitesse variable	-----64
V.4- Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation	-----67
V.5- Conclusion	-----68
Conclusion générale	-----69
Annexe	-----70
 Bibliographie	

Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs pays sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite "renouvelable", cette énergie est l'énergie éolienne. Elle apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire.

Plusieurs exemples des pays qui ont réussi à exploiter cette énergie, l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 12 GW, l'Espagne, numéro deux de l'Union Européenne avec 4,15 GW et le Danemark avec 2,9 GW à la fin de l'année 2002. L'Algérie n'a aucune installation éolienne malgré l'existence des conditions climatiques qui accompagnent l'utilisation de cette énergie.

Notre travail consiste à étudier un système éolien basé sur le générateur asynchrone.

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement, ainsi la modélisation mathématique du système de conversion d'énergie éolienne.

Le second chapitre présente la modélisation du fonctionnement de la machine asynchrone en régime linéaire.

Le troisième chapitre consiste à étudier l'auto-amorçage du générateur asynchrone. Nous présentons la forme de la tension et du courant obtenues par simulation ainsi que la tension obtenue expérimentalement.

Le quatrième chapitre traite le phénomène transitoire lors du retour réseau, nous présentons dans ce chapitre les formes de la tension et de courant à l'instant de la connexion au réseau, ses formes sont obtenues par simulation et validées par des essais expérimentaux.

Le cinquième chapitre et le dernier, présente la topologie et les domaines d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation. Son fonctionnement en génératrice à vitesse variable ainsi que les grandeurs de commande utilisées lorsqu'elle est intégrée à un système éolien. Une modélisation dans un repère diphasé de façon à mettre en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques.

Chapitre I

Généralité sur les éoliennes

I.1- Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [1]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

I.2- Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

I.2.1- Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur (Fig.I.1).

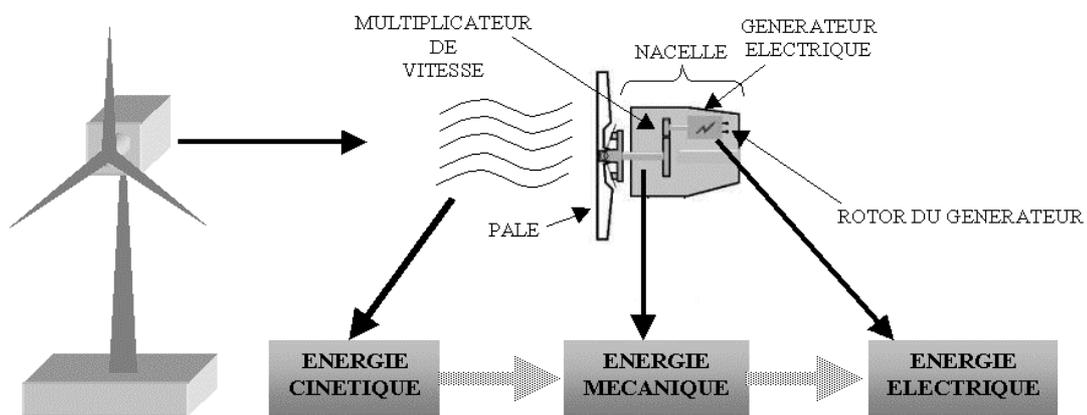


Fig. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [2].

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

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

I.3- Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice on classe les éoliennes selon deux types :

I.3 .1-Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance[3]. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [2].

I.3 .2-Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Dans ces types d'éolienne l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [4], ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [5].



a- éolienne à axe vertical.



b- éolienne à axe horizontal.

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale

- Eoliennes de petite puissance: inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance: de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance: supérieure à 1 MW.

I.4- Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou mat, la nacelle et l'ensemble rotor-pales.

I.4.1- La tour

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle.



I.4.2- La nacelle

Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande (Fig.I.2) :

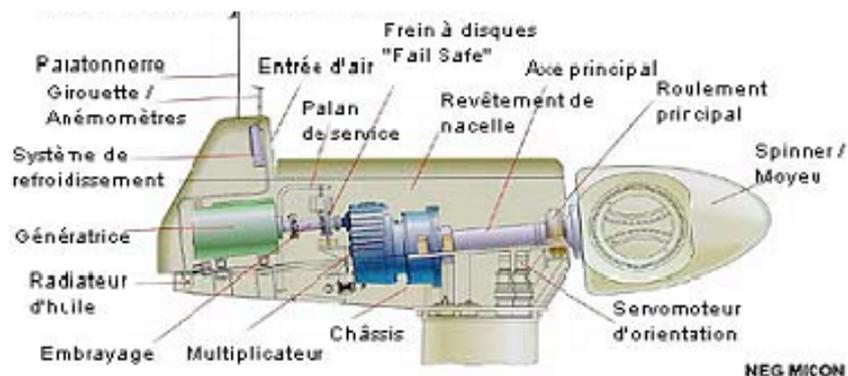


Fig.I.2- La nacelle.

I.4.2.1- Arbre lent

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

I.4.2.2- Un multiplicateur

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

I.4.2.3- le système de refroidissement

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

I.4.2.4- la génératrice

La fonction première de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines: une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone. De plus un convertisseur de puissance associé éventuellement à la génératrice selon le type (direct ou indirect) de connexion au réseau.

I.4.2.5- Anémomètre

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de control-commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s pour assurer la protection de l'éolienne.

I.4.2.6- le système de control-commande

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

I.4.3- Le rotor et les pales

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59%(limite de Betz). Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisque elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.

Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante.



I.4.4- Le moyeu

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

I.5- Energie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique

I.5.1- Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Fig.I .3 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit $(V_1+V_2)/2$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \rho S \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = m \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1):

$$P_m = \rho S \frac{(V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2)}{4} \quad (1.3)$$

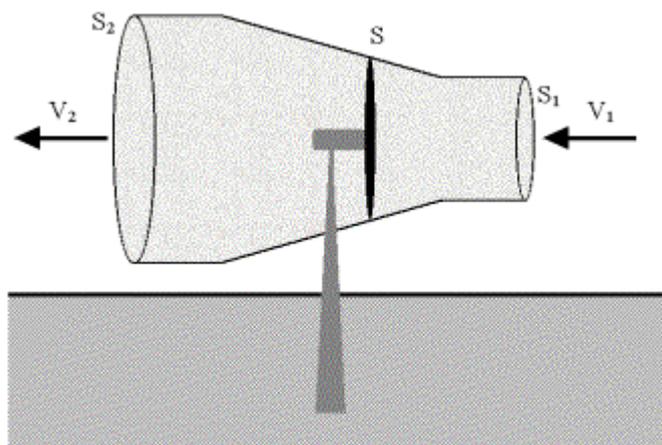


Fig.I.3- Tube de courant autour d'une éolienne.

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left[1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right]}{2} \quad (1.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Fig.I.4), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

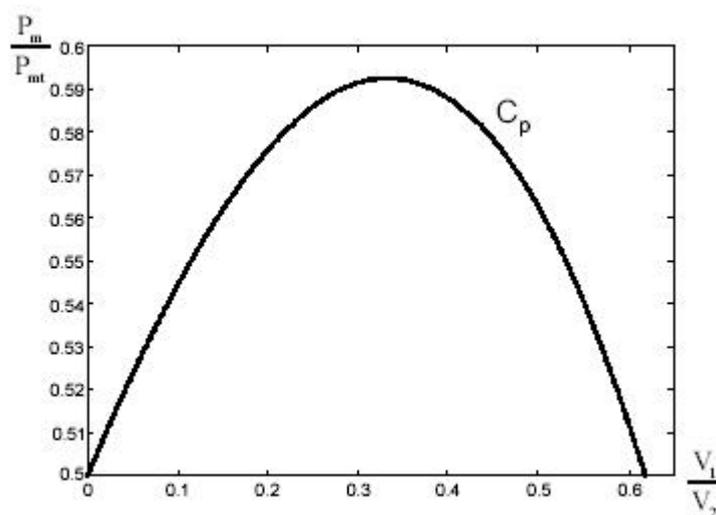


Fig .I.4- Coefficient de puissance.

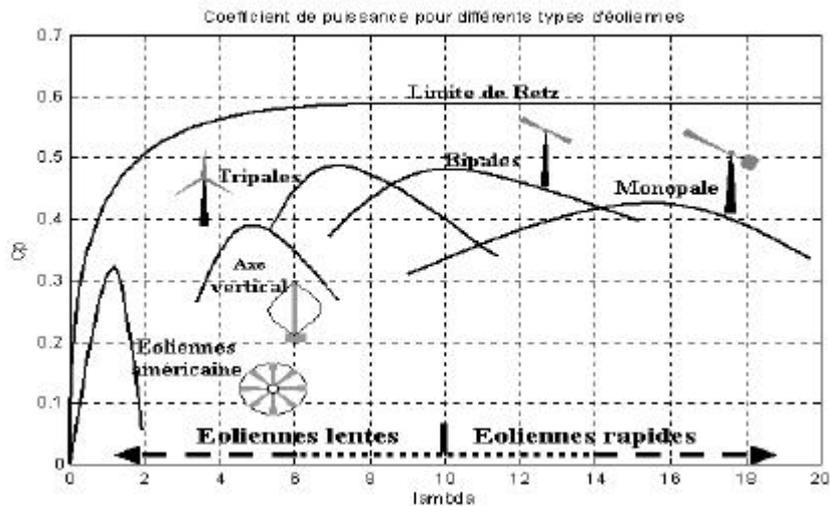


Fig.I.5- Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Fig.I.5) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation, les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Fig.I.5) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [6].

I .5.2- Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \tag{1.6}$$

Avec:
$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \tag{1.7}$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R : rayon de l'aérogénérateur. Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right)^3 \rho \pi R^3 V_1^3 \quad (1.8)$$

avec Ω_2 vitesse de rotation après multiplicateur. Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Fig.I.6) [6].

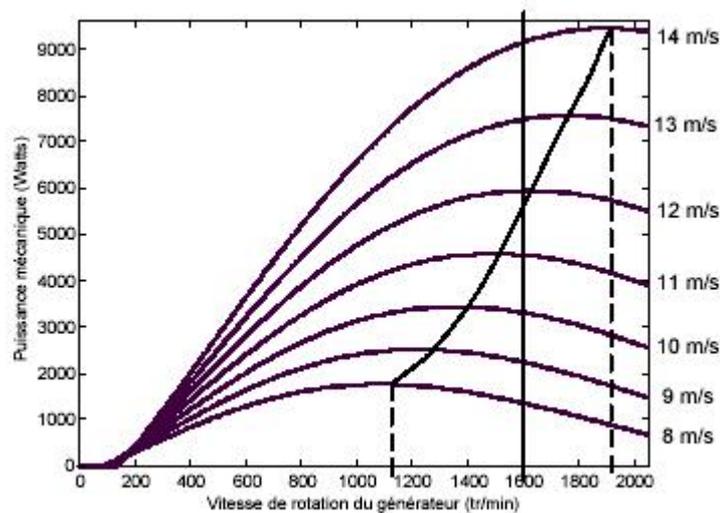


Fig.I.6- Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée.

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Fig.I.6) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/mn pour cet exemple.

I.6- Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

I.6.1- Bilan des forces sur une pale

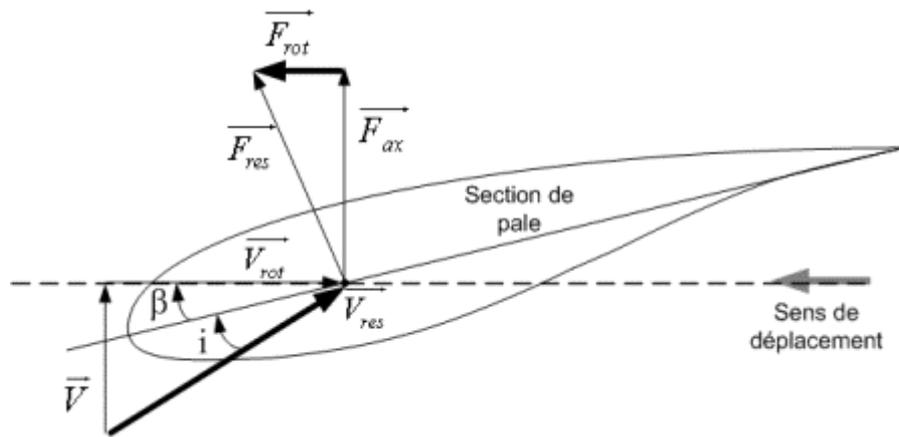


Fig.I.7- Bilan des forces sur une pale.

La (Fig.I.7) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [7]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représenté par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée V_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force F_{res} qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mât et une poussée en direction de la rotation F_{rot} qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

I.6.2- Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

I.6.2.1- Système à décrochage aérodynamique "stall"

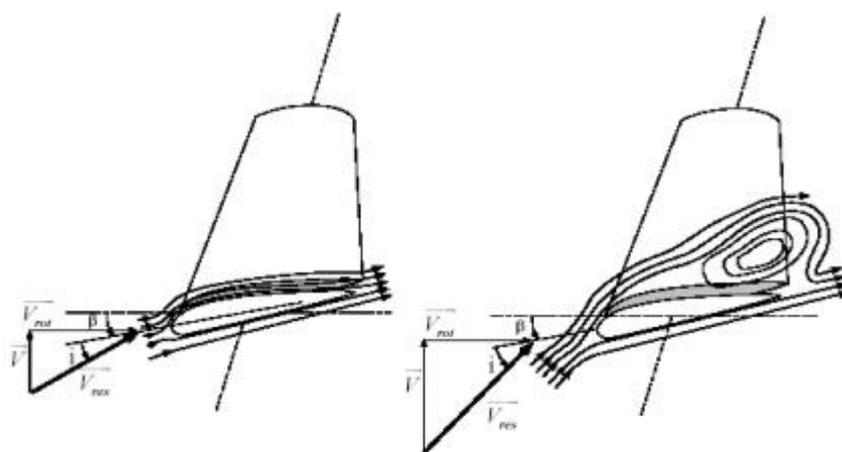


Fig.I.8- Flux d'air sur un profil de pale "stall".

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Fig.I.8) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

I.6.2.2- Système d'orientation des pales "pitch"

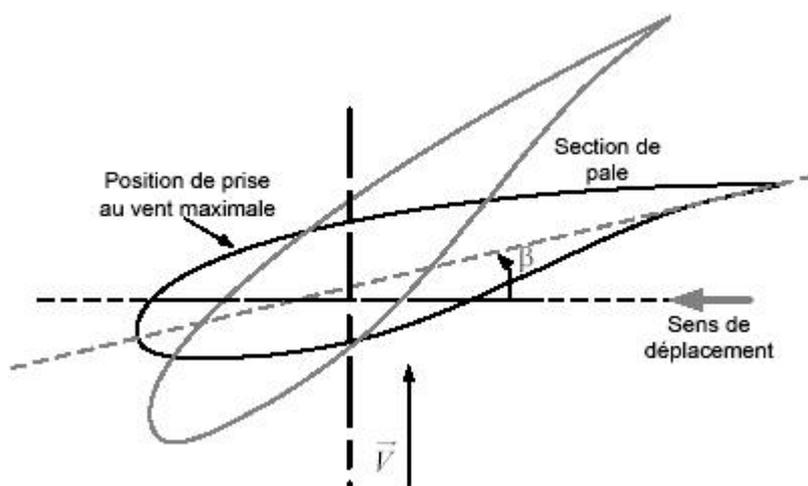


Fig.I.9- Variation de l'angle de calage d'une pale.

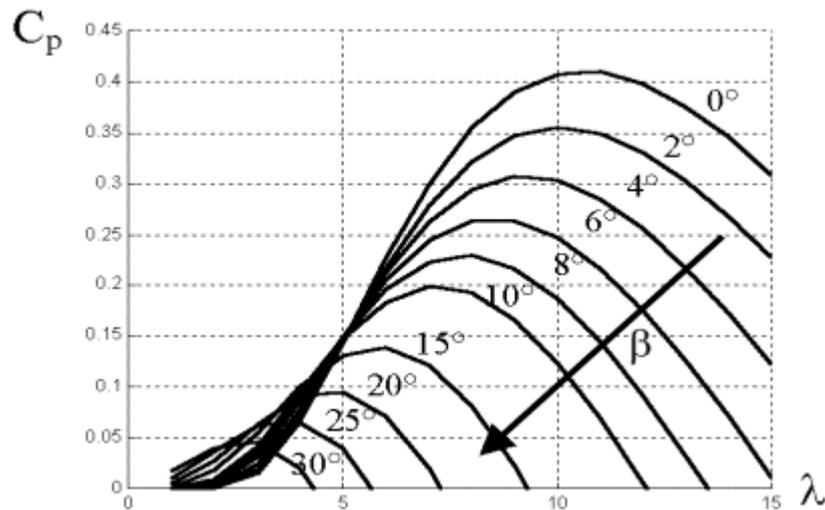


Fig.I.10- Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple.

I.6.3- Production optimale d'énergie

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la (Fig. I.6). Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \lambda_{opt} \cdot V/R \quad \text{avec } V \text{ la vitesse du vent} \quad (1.9)$$

La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la (Fig.I.11) [8]. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

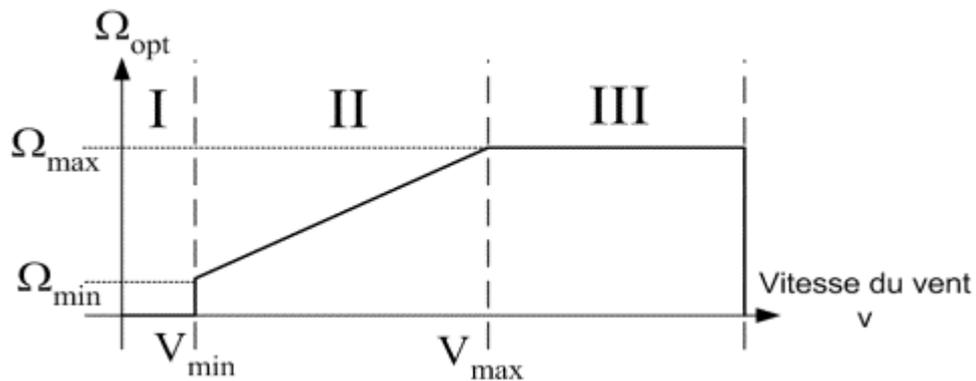


Fig.I.11- Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau (Fig.I.12). Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivrée par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables.

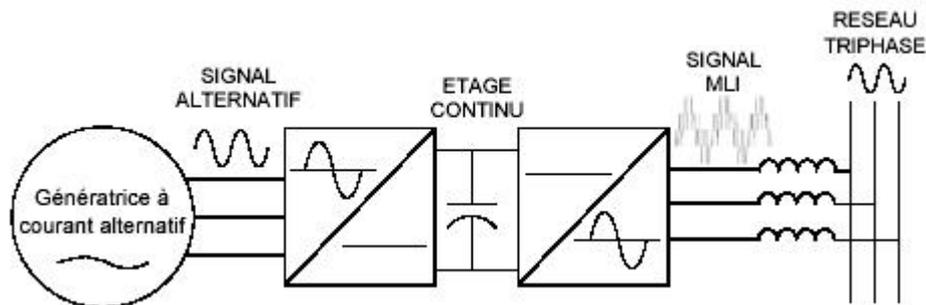


Fig.I.12- interface d'électronique de puissance.

I.7- Modélisation mathématique du système de conversion d'énergie éolienne

I.7.1- Reproduction des variations du vent

Les travaux de C. Nichita et Al. [9] ont montré que les variations du vent pouvaient être reproduites à partir de la densité spectrale établie par le météorologue I. Van der Hoven [10]. Ce modèle considère la composante de turbulence du vent (dissociée de la composante lente) comme un processus aléatoire stationnaire. Il présente la variation du carré de la vitesse du vent en fonction de la période d'observation de celle-ci. La vitesse moyenne du vent est mesurée sur une échelle de temps variant de 5 jours à 2 secondes. La reproduction de la caractéristique de Van der Hoven est présentée sur la (Fig.I.13). La discrétisation de cette courbe en pulsations ω_i avec la puissance correspondante S_i permet d'extraire l'amplitude A_i de chaque composante spectrale associée à ces pulsations :

$$A_i = \frac{2}{\pi} \sqrt{S_i} \quad (1.10)$$

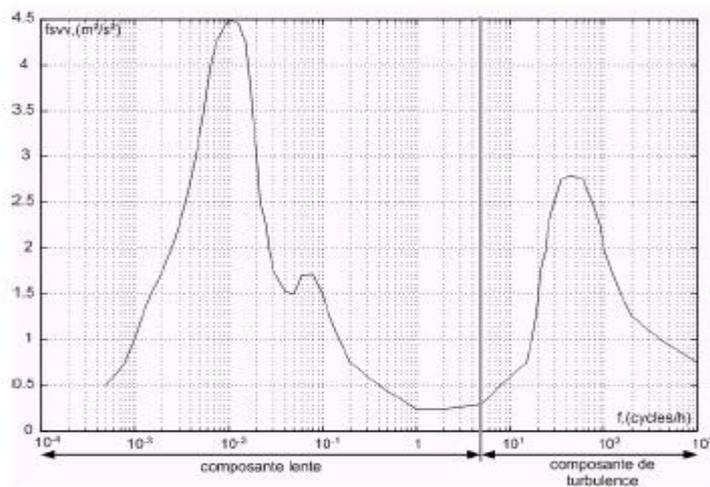


Fig.I.13- Reproduction de la caractéristique spectrale de Van der Hoven.

La variation $V(t)$ de la vitesse du vent est alors écrite en utilisant la somme des harmoniques correspondant à chaque pulsation ω_i avec une phase φ_i déterminée de façon aléatoire :

$$V(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (1.11)$$

avec N: nombre de valeurs discrètes utilisées pour l'échantillonnage.

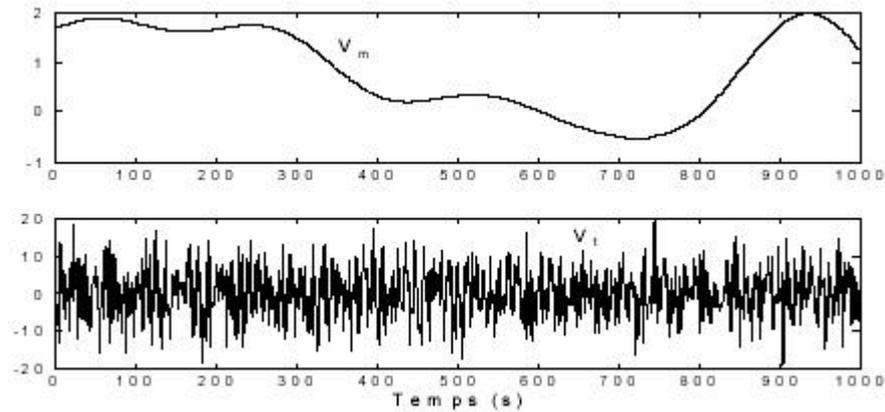


Fig.I.14- Composante lente et composante de turbulence de la vitesse du vent.

La vitesse de vent fait apparaître deux composantes : une composante lente correspondant à la vitesse moyenne du vent (V_m) et une composante rapide dite de turbulence (V_t) venant se superposer à cette vitesse moyenne. L'évolution des deux composantes sur 1000 secondes, une fois séparées, sont représentées sur la (Fig.I.14).

On constate aisément que quelle que soit la valeur de la vitesse moyenne du vent (caractérisée par la composante lente), la composante de turbulence possède les mêmes propriétés statistiques. En réalité, des campagnes de mesure ont démontré que l'importance de turbulences était liée à l'amplitude de la valeur moyenne [9]. Pour intégrer cette dépendance dans la modélisation, un traitement numérique consistant à corriger la composante de turbulence en fonction de la valeur moyenne à l'aide d'un filtre a été introduit (Fig.I.15).

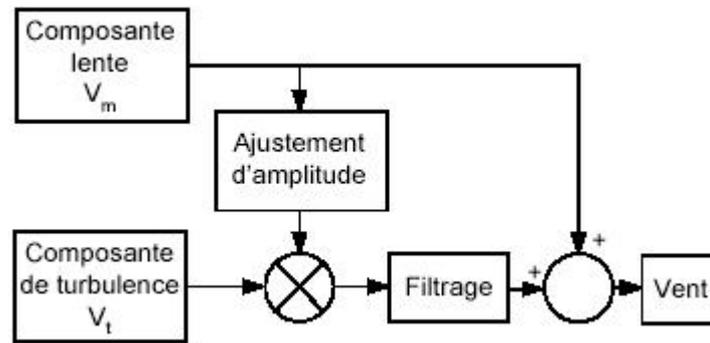


Fig.I.15- Synoptique de reconstitution du vent.

I.7.2- Modélisation de la turbine

Dans le cadre des études menées sur les systèmes éoliens, nous donnons les résultats obtenus [12] sur un banc d'essai expérimental, la (Fig.I.16) représente la partie électrotechnique de ce banc constituée d'une machine asynchrone de 7,5 kW couplée à une machine à courant continu de 10 kW. Donc la modélisation d'une éolienne de 10 kW pour ce simulateur. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3m et le rapport du multiplicateur de vitesse est de 5,4.

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique multiplicatrice à chaque éolienne. Dans ce cas, son évolution en fonction de λ est basée sur l'observation de données de plusieurs petites éoliennes de quelques kW. Suite à ces observations, λ est fixé à sa valeur maximale 0,495 et ses variations sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante :

$$C_p = 7,9563 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 - 9,4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0,001 \quad (1.12)$$

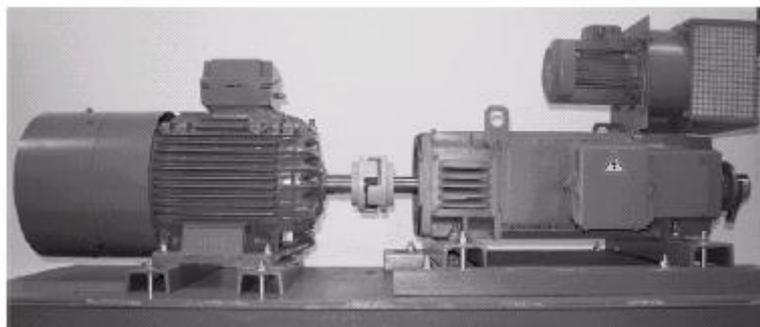


Fig.I.16- Génératrice asynchrone de 7,5 kW couplée à un moteur à courant continu de 10 kW.

La caractéristique correspondant à ce polynôme est donnée sur la (Fig.I.17). Connaissant les caractéristiques de l'éolienne ci-dessus et le coefficient de puissance, la puissance mécanique disponible sur l'arbre de transmission peut être calculée selon la relation:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (1.13)$$

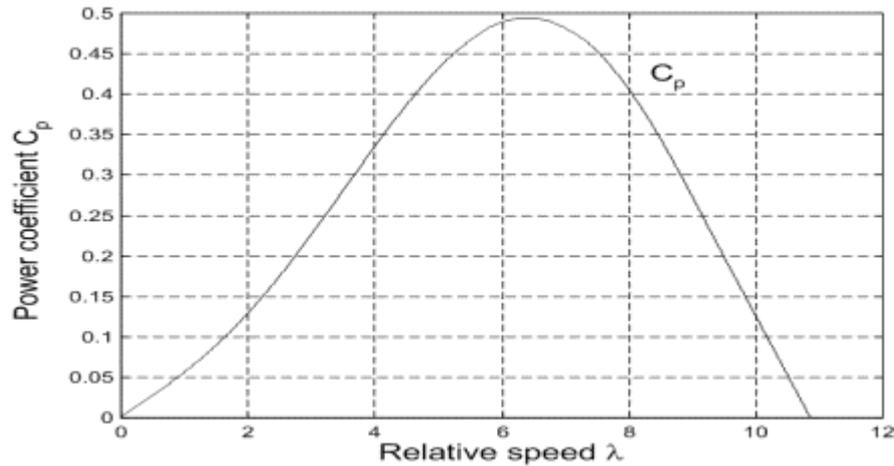


Fig.I.17- Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe).

Où ρ est la densité de l'air égale à $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$. Le couple Γ_T produit par cette éolienne est alors déduit :

$$\Gamma_T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2\Omega} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (1.14)$$

On introduisant le terme $C_T(\lambda) = C_p(\lambda)/\lambda$ appelé coefficient de couple, on obtient la relation suivante:

$$\Gamma_T = \frac{1}{2} C_T(\lambda) \rho \pi R^2 V^2 \quad (1.15)$$

La (Fig.I.18) montre le synoptique global du modèle de l'éolienne [9]... [11].

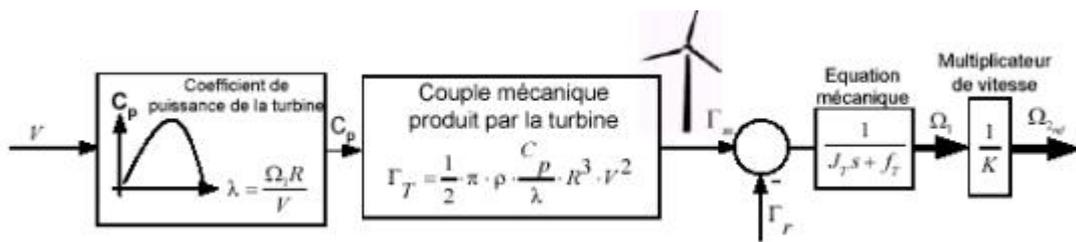


Fig.I.18- Génération d'une vitesse de référence à partir du modèle de l'éolienne.

I.8- Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique) ont été décrits.

L'autre partie du chapitre présente les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien. Trois grandes familles de machines utilisées qui sont : machines asynchrones, machines synchrones et machines à structure spéciale.

Chapitre II

Modélisation et Fonctionnement de la Machine Asynchrone en Régime Linéaire

II .1-Introduction

La machine asynchrone n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation, les courants de Foucault, l'effet pelliculaire ...etc.

Cependant nous n'allons pas tenir compte de ces phénomènes, car, d'une part leur formulation mathématique est difficile, d'autre part, leur incidence sur le comportement de la machine est considéré comme négligeable, sous certaines conditions. Ceci nous permet d'obtenir des équations simples, qui traduisent fidèlement le fonctionnement de la machine.

La modélisation de la machine asynchrone pour un fonctionnement en régime linéaire est basée sur la théorie des deux axes. Le modèle le plus utilisé est celui de RH Park.

Dans ce chapitre, nous utiliserons cette représentation triphasée-biphasée en tenant compte d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices [22].

La représentation matricielle et vectorielle permet d'obtenir des équations simples qui traduisent fidèlement le comportement global de la machine. L'ensemble des équations ainsi obtenues, constituera le modèle linéaire de la machine. Sa résolution à l'aide des méthodes numériques donnera les composantes des grandeurs simulées qui seront par la suite transformées pour obtenir des grandeurs réelles.

Nous donnons dans ce chapitre deux exemples d'application, l'un pour un fonctionnement en moteur, l'autre pour un fonctionnement en générateur.

II.2- Modèle linéaire de la machine asynchrone

II.2.1-Représentation de la machine asynchrone

La machine asynchrone utilisée est triphasée au stator et au rotor (Fig.II.1)

Les bobines statoriques sont réparties régulièrement à la périphérie de l'entrefer cylindrique.

La machine est représentée par trois phases statoriques (**as, bs, cs**), et trois phases rotoriques (**ar, br, cr**) qui tournent à la vitesse $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$.

$$\omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt} .$$

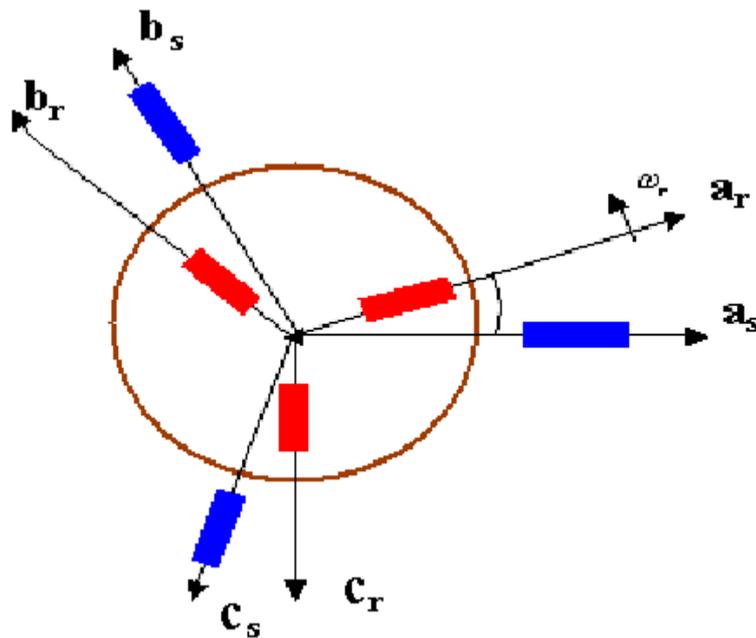


Fig.II.1 Représentation de la machine asynchrone triphasée

Le fonctionnement est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique. Cette interaction électromagnétique n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor.

II.2.2- Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, et comme nous l'avons déjà soulevé (dans II-1), il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices.

- On suppose que les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires. L'effet de peau est négligé.
- l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoidalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoidales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

II.2.3-Equations générales de la machine asynchrone

On écrit les équations par phase de la machine sous forme matricielle.

$$\begin{cases} [V_s] = [r_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \\ [V_r] = [0] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \end{cases} \quad (1-1)$$

Où les flux Φ_s et Φ_r s'expriment par :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases} \quad (1-2)$$

avec $[V], [i], [\Phi], [r]$: sont respectivement Les vecteurs des tensions, courants, flux et matrice des résistances.

s, r : désignent les grandeurs statoriques, rotoriques.

$$[i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, [v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}, [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[r_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}, [r_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

Les matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ s'écrivent :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{aas} & L_{abs} & L_{acs} \\ L_{bas} & L_{bbs} & L_{bcs} \\ L_{cas} & L_{cbs} & L_{ccs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{aar} & L_{abr} & L_{acr} \\ L_{bar} & L_{bbr} & L_{bcr} \\ L_{car} & L_{cbr} & L_{ccr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

L_s, L_r : Inductance propre statorique, et rotorique.

M_s, M_r : Inductance mutuelle entre phases statoriques, et ou rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles stator - rotor est définie par :

$$[M_{sr}] = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

L_m : Maximum de l'inductance mutuelle stator-rotor

En introduisant les expressions des flux de (1-2) dans (1-1) nous obtenons le système :

$$\begin{cases} [V_s] = [r_s][i_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][i_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][i_r] \} \\ [V_r] = [r_r][i_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rr}][i_r] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][i_s] \} \end{cases} \quad (1-4)$$

La variation sinusoïdale des inductances mutuelles de la machine, suivant la position angulaire introduit les coefficients dépendants du temps dans le système différentiel régissant le fonctionnement dynamique de la machine, ce qui rend la formulation du modèle très complexe.

Par un changement de variable adéquat, les coefficients intervenant dans le système différentiel deviennent indépendants du temps.

Les grandeurs tension, courant et flux, des deux armatures seront transformées dans un système de référence choisi selon l'application envisagée.

II.3 - Modèle diphasé équivalent de la machine

Après l'application de la transformation de Park, le système réel d'enroulement triphasé est substitué par un système biphasé équivalent, disposé selon deux axes (d et q) tournant à une vitesse angulaire ω_a fixée (Fig. II.2).

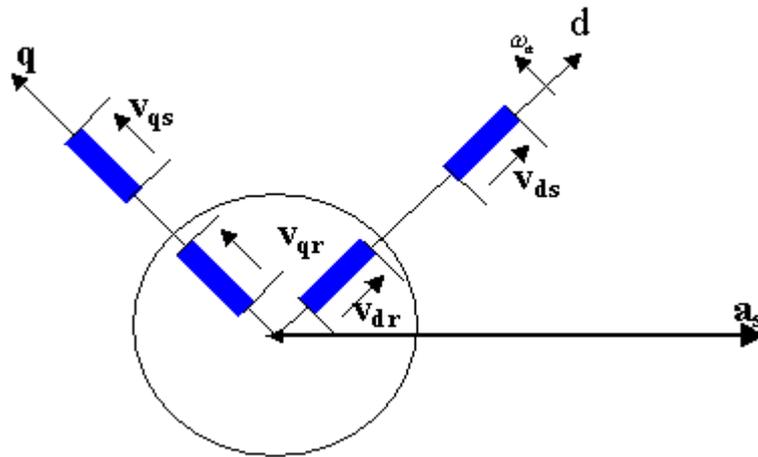


Fig. II.2. Modèle de la machine après la transformation de Park

D'après la théorie de Park, la matrice orthogonale de transformation ($[P(\theta)]$) est définie par :

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

avec θ l'angle entre les deux axes **d** et **as**.

Les grandeurs transformées sont données par :

$$[v_{dgo}] = [P(\theta)][v_s], \quad [i_{dgo}] = [P(\theta)][i] \quad \text{et} \quad [\Phi_{dgo}] = [P(\theta)][\Phi].$$

En multipliant les deux membres de (1-4) par $[P(\theta)]$, et après des simplifications, on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_a \Phi_{qs} \\ v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_a \Phi_{ds} \end{cases} \quad (1-5-a)$$

D'une façon analogue on obtient le système suivant pour les grandeurs rotoriques.

$$\begin{cases} v_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_a - \omega_r) \Phi_{qr} \\ v_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_a - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (1-5-b)$$

L'expression des flux totaux prend la forme :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{dr} = l_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = l_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (1-6)$$

Avec :

$$\begin{cases} l_s = L_s - M_s \\ l_r = L_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} \cdot L_m \end{cases}$$

l_s, l_r : L'inductance cyclique propre d'une phase du stator et du rotor respectivement

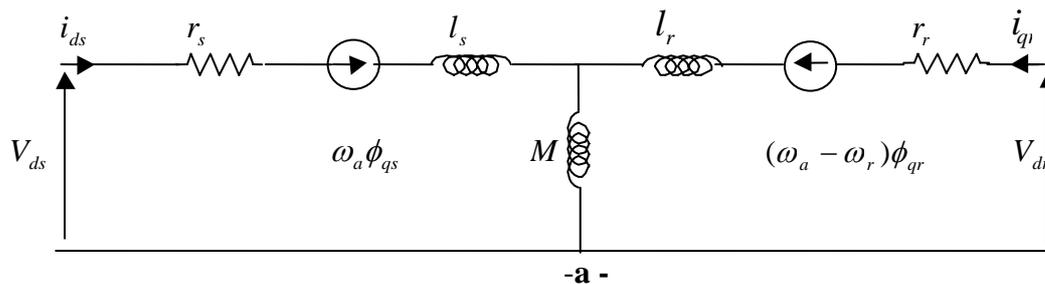
M : L'inductance mutuelle cyclique stator – rotor.

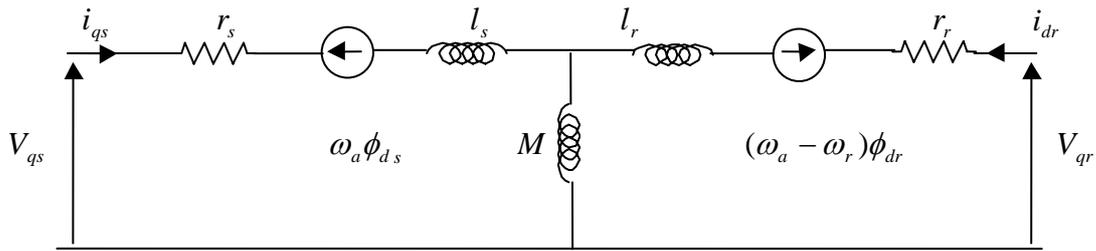
II.4 - Choix du référentiel

Il est plus intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit à l'une des armatures, soit au champ tournant, selon les objectifs de l'application.

Dans chacun de ces nouveaux référentiels, les équations de la machine sont plus simples que dans le référentiel quelconque.

Nous représentons ci-dessous (Fig. II.3) les schémas équivalents suivant les deux axes pour un référentiel quelconque de vitesse ωa .





- b -

Fig. II.3. Schéma équivalent en régime dynamique de la machine asynchrone dans un référentiel arbitraire : **a-** Suivant l'axe d **b-** Suivant l'axe q.

Le choix du référentiel se fait en fonction de la valeur de ω_a :

$\omega_a = 0$: correspond au référentiel stationnaire.

$\omega_a = \omega_r$: correspond au référentiel lié au rotor.

$\omega_a = \omega_s$: correspond au référentiel lié au champ tournant.

II.5 - Expression du couple électromagnétique

L'expression générale du couple électromagnétique résulte de la dérivée de la coénergie par rapport à l'angle mécanique de rotation.

$$C_e = p \cdot [i_s]^t \cdot \frac{d}{dt} [M_{sr}] [i_r].$$

Dans le repère **d, q** l'équation devient :

$$C_e = p \cdot M \cdot (i_{dr} \cdot i_{qs} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (1-7)$$

p : est le nombre de paire des pôles

L'équation du mouvement s'écrit sous la forme :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_f \cdot \Omega = C_e - C_r \quad (1-8)$$

C_e, C_r : représentent les couples électromagnétique et résistant.

k_f : c'est le coefficient de frottements.

J : c'est le moment d'inertie.

II.6- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions sur le fonctionnement et la modélisation de la machine asynchrone en tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices, lors de cette étude nous avons négligé l'effet de la saturation du circuit magnétique. Le modèle dynamique en régime linéaire est destiné à simplifier l'étude du comportement du moteur, et permet d'avoir une idée précise sur les contraintes maximales mécaniques et électriques.

Cependant, l'utilisation de ce modèle pour simuler le fonctionnement en génératrice asynchrone conduit à des résultats divergents qui ne reflètent aucune réalité pratique.

Chapitre III

Fonctionnement du Générateur Asynchrone Auto-excité

III. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'étude théorique statique et dynamique du phénomène d'autoamorçage du générateur asynchrone. Nous avons utilisé un programme de simulation qui donne les formes de la tension, et de courants statorique lors de l'auto amorçage. Nous avons effectué des essais expérimentaux sur une machine du laboratoire à l'ENP.

Pour l'étude statique du générateur asynchrone, plusieurs méthodes ont été proposées pour calculer la capacité, et la vitesse critique qui assurent l'auto excitation d'une part, et l'influence de celles ci sur les caractéristiques de fonctionnement d'autre part.

III.1 - L'auto excitation à vide

Le schéma équivalent par phase du générateur asynchrone avec capacité est représenté par la (Fig. III.1).

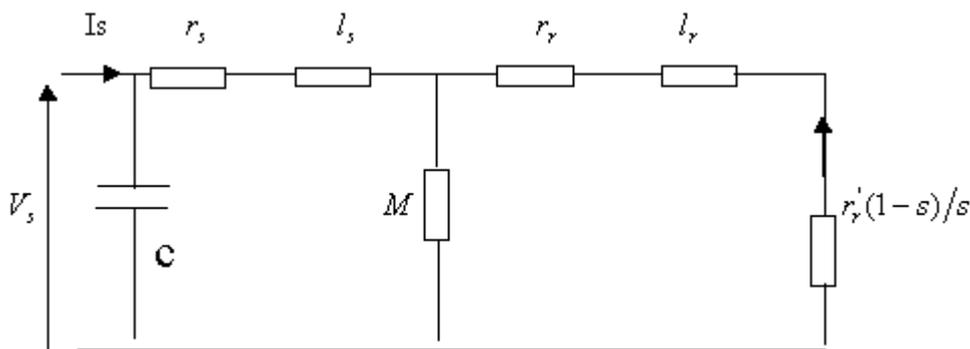


Fig.III.1-Schéma équivalent monophasé du générateur asynchrone avec capacité

Hypothèses

- La saturation n'apparaît qu'au niveau de la réactance magnétisante
- Les pertes fer sont négligées
- Toutes les grandeurs au rotor sont supposées vu du stator

Supposons que la vitesse ω_r est constante et pour simplifier on ne considère que le fonctionnement à vide.

$$\text{Soient : } \begin{cases} z_r = \frac{r_r}{s} + j l_r \omega_s \\ z_s = r_s + j \left(l_s \omega_s - \frac{1}{c \omega_s} \right) \\ z_m = j M \omega_s \\ z = z_s + (z_m // z_r) \\ z_c = -\frac{j}{c \omega_s} \end{cases} \quad (2-1)$$

Le fonctionnement autonome (auto-excité) en régime établi du générateur asynchrone à vide est décrit par :

$$I_c + I_s = 0$$

qui se traduit par :

$$z_c + z = 0 \quad (2-2)$$

L'impédance z est donnée par :

$$z = \frac{(r_s + j l_s \omega_s) \left(j M \omega_s + \frac{r_r}{s} + j l_r \omega_s \right) + j M \omega_s \left(\frac{r_r}{s} + j l_r \omega_s \right)}{j M \omega_s + \frac{r_r}{s} + j l_r \omega_s} \quad (2-3)$$

z , z_c : est l'impédance de la machine, et du condensateur respectivement

L'équation (2-2) traduit l'intersection des courbes représentatives de chaque branche (Fig.III-2). La détermination du point de fonctionnement (p) conduit facilement à une interprétation physique de l'auto excitation. Elle permet en outre de mettre en évidence une analogie entre le générateur asynchrone et la génératrice à courant continu shunt.

Le phénomène est classiquement connu sous le nom de résonance du circuit oscillant R L C, ici elle correspond à la résonance entre l'inductance de la machine L_s et la capacité c .

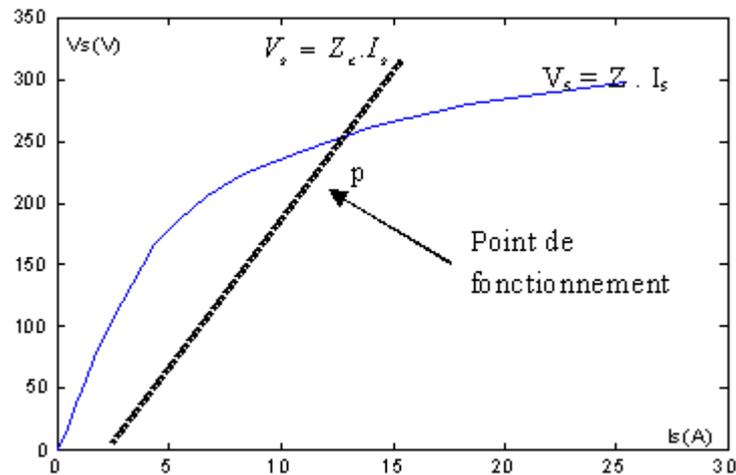


Fig. III.2- Détermination du point de fonctionnement pour le générateur asynchrone

En séparant les parties réelles et imaginaires de l'équation (2-2), il en résulte :

$$\operatorname{Re}(z) = r_s + \frac{(M\omega_s)^2 \frac{r_r}{s}}{\left(\frac{r_r}{s}\right)^2 + (\omega_s L_r)^2} \quad (2-4)$$

$$\operatorname{Im}(z) = l_s \omega_s - \frac{1}{c\omega_s} + M\omega_s \frac{\left(\frac{r_r}{s}\right)^2 + L_r l_r \omega_s^2}{\left(\frac{r_r}{s}\right)^2 + (\omega_s L_r)^2} \quad (2-5)$$

Avec :

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}, \quad L_s = l_s + M, \quad L_r = l_r + M$$

Hormis l'inductance de magnétisation M , on considère comme constantes les résistances et les inductances de fuite de la machine. Les deux équations (2-4) et (2-5) présentent un système de deux équations algébriques non linéaires, comportant quatre variables: la vitesse de rotation ω_r , la capacité c , la pulsation statorique ω_s et l'inductance de magnétisation M , donc il suffit alors de fixer deux paramètres pour déterminer les deux autres.

Pour une vitesse d'entraînement ω_r , et un niveau de saturation bien définie (M fixe), on peut déterminer la valeur de la pulsation statorique, ainsi la valeur de la capacité qui assurent l'auto excitation dans le cas correspondant.

En effet, à partir de l'équation (2-4) on peut tirer l'expression de ω_s .

$$\omega_s = \frac{r_s L_r^2 \omega_r}{(r_s L_r^2 + M^2 r_r)} + \frac{r_r M^2 \omega_r}{2(r_s L_r^2 + r_r M^2)} \left(1 \pm \sqrt{1 - 4r_s \frac{r_s L_r^2 + r_r M^2}{M^4 \omega_r^2}} \right) \quad (2-6)$$

D'après l'équation (2-5) on peut déterminer l'expression de la capacité c .

$$c = \frac{1}{\omega_r^2} \frac{r_r^2 + L_r^2 (\omega_s - \omega_r)^2}{r_r^2 L_s + (\omega_s - \omega_r)^2 (L_r^2 L_s - L_r M^2)} \quad (2-7)$$

Pour un fonctionnement au voisinage de synchronisme (un glissement très faible $s \approx 0$)

On aura :

$$\lim_{s \rightarrow 0} \operatorname{Re}(z) \approx r_s + \frac{\omega_s^2 M^2}{r_r} s \quad \Rightarrow \quad s_1 \approx -\frac{r_r r_s}{\omega_s^2 M^2} \quad (2-8)$$

$$\text{ce qui donne :} \quad \begin{cases} \omega_{s1} \approx \omega_r \\ c_1 \approx \frac{1}{L_s \omega_s^2} \end{cases} \quad (2-9)$$

à partir de la relation (2-4) et pour des valeurs élevées du glissement on aura

$$s_2 \approx \frac{r_r}{r_s} \quad (2-10)$$

ce qui donne :

$$\begin{cases} \omega_s \approx \frac{\omega_r}{2} \\ c_2 \approx \frac{1}{\omega_{s2}^2 (l_s + l_r)} \end{cases} \quad (2-11)$$

Nous remarquons donc, qu'il existe deux points déférents, le premier pour les glissement faibles ou la pulsation statorique proche de celle de rotation, ce point caractérisé par la résonance de la capacité c avec l'inductance principale statorique L_s .

Le deuxième point correspond à une vitesse excessive (double à la pulsation statorique). Cette vitesse est loin d'être atteinte pratiquement, mais il possède les mêmes origines que celui qui correspond au premier point.

En effet, d'un point de vue matériau le circuit magnétique de la machine possède généralement une caractéristique magnétique, dont l'allure est similaire à celle de la (fig.III.3).

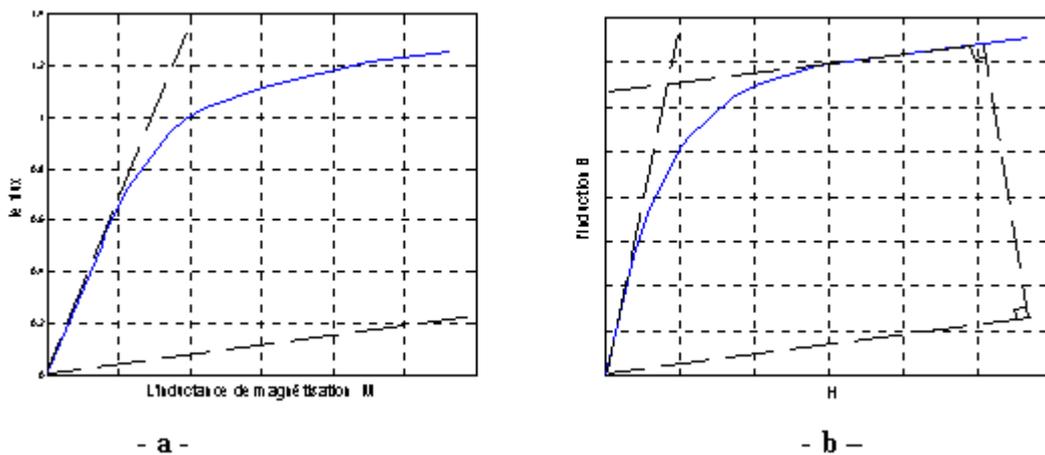


Fig.III.3- a. Caractéristique de magnétisation $B = f(H)$

b. le flux en fonction de l'inductance de magnétisation

Cette figure montre qu'il existe deux valeurs limite de la perméabilité :

$$\mu_0 \leq \mu \leq \mu_{\max}$$

ou : μ_0 : perméabilité du vide

μ_{\max} : perméabilité qui dépend de la nature du matériau.

Ces perméabilités, limitent la variation de l'inductance de magnétisation entre : $M_{\min} \leq M \leq M_{\max}$

III.2-Détermination de la capacité minimale de l'auto-excitation

Comme à partir de l'expression analytique (2-7) on peut déterminer la valeur de la capacité critique, on peut également la déterminer numériquement, dans cette dernière approche

en utilisant une méthode itérative (NEWTON RAPHSON) pour résoudre le système d'équation (2-4, 2-5). On va fixer la vitesse et la valeur de la capacité initiale qui assure l'auto excitation, et dans chaque pas de calcul, nous obtenons une valeur de ω_s et une réactance de magnétisation ($x_m = \omega_s M$).

Itérativement la capacité va diminuer jusqu'à la valeur de x_m . Elle devient très proche de $x_{m_{ax}}$ à ce niveau on peut tirer la valeur minimale de la capacité C_{min} [22].

La (fig.III.4) représente la variation de la capacité C_{min} en fonction de la vitesse, nous remarquons que la capacité minimale est inversement proportionnelle à la vitesse de rotation.

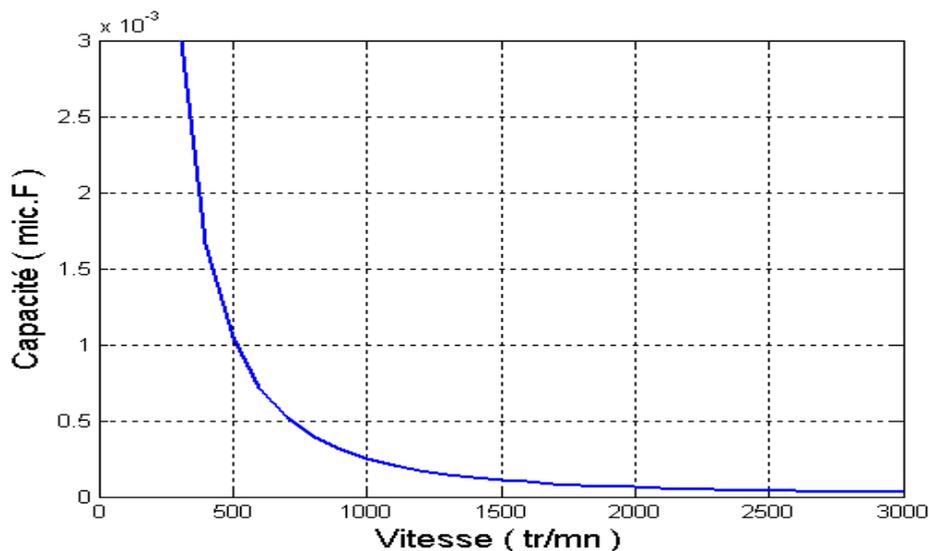


Fig. III.4- Variation de la capacité minimale C_{min} en fonction de la vitesse

III.3- Les caractéristiques de fonctionnement statique

On distingue deux caractéristiques principales de fonctionnement statiques, les caractéristiques pour une capacité constante, et celle pour une vitesse de rotation constante.

Ces deux caractéristiques basées sur la courbe de magnétisation $V_m(x_m)$, cette dernière obtenue par un essai au synchronisme, puis elle est modélisée par une fonction mathématique correspondante, pour nous on a choisi la fonction la plus générale (Polynomial).

$$V_m = \sum_{k=0}^7 a_k x^k$$

La détermination de la valeur de tension V_m nous permet de déduire les autres grandeurs, en effet, à partir du schéma équivalent (Fig.III.1) on peut calculer:

Le courant rotorique :

$$I_r = \frac{V_m}{(\omega_s l_r)^2 + \left(\frac{r_r}{s}\right)^2} \quad (2-12)$$

Le courant statorique :

$$I_s = \frac{V_m}{\sqrt{r_s^2 + \left(l_s \omega_s - \frac{1}{c \omega_s}\right)^2}} \quad (2-13)$$

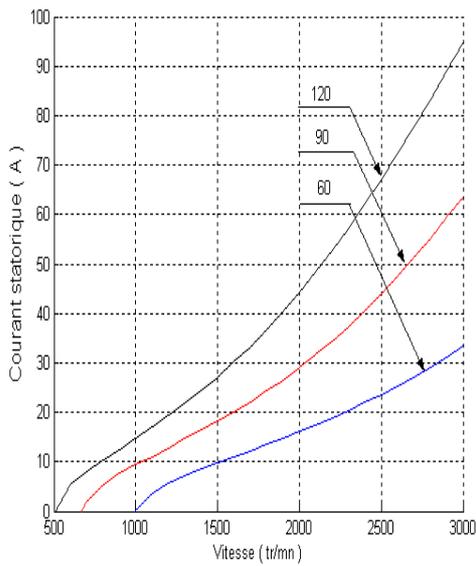
La tension statorique :

$$V_s = \frac{I_s}{c \omega_s} \quad (2-14)$$

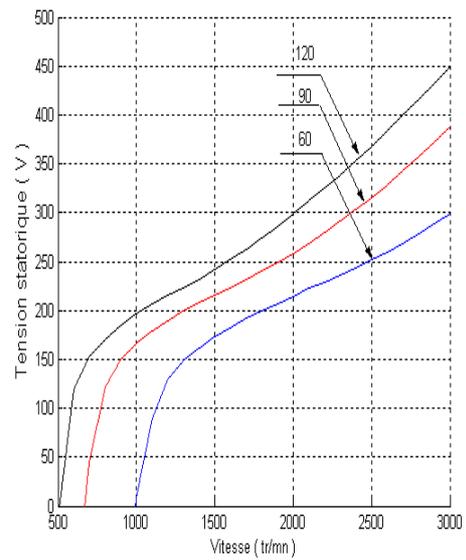
Pour faire apparaître l'influence de la vitesse sur les différentes grandeurs, nous utiliserons un algorithme similaire à celui qui est décrit précédemment (pour calculer la valeur de C_{\min}), Sauf dans ce cas on va :

- 1- imposer les conditions initiales M_0 et ω_{s0} avec les valeurs de la capacité et de la vitesse.
- 2- résoudre le système d'équations (2-4,2-5) pour M et ω_s .
- 3- calculer V_m puis les grandeurs (I_r , I_s ...).

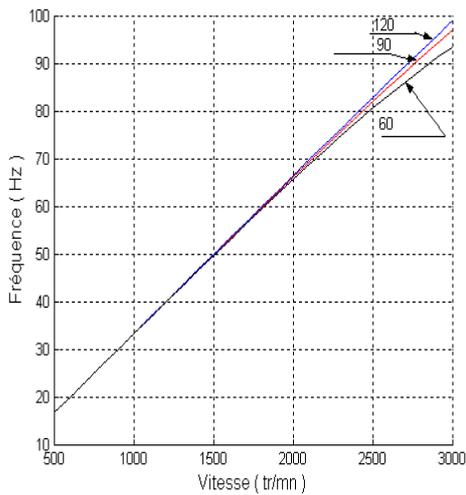
La (fig.III.5) présente la variation de la tension, courant statorique, la fréquence et le couple en fonction de la vitesse pour trois valeurs de la capacité (60, 90, et 120 μF).



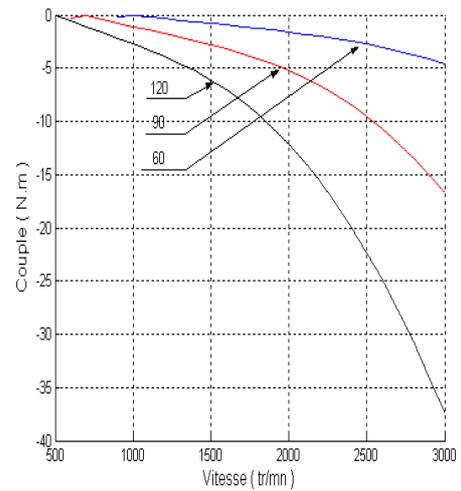
- a -



- b -



- c -



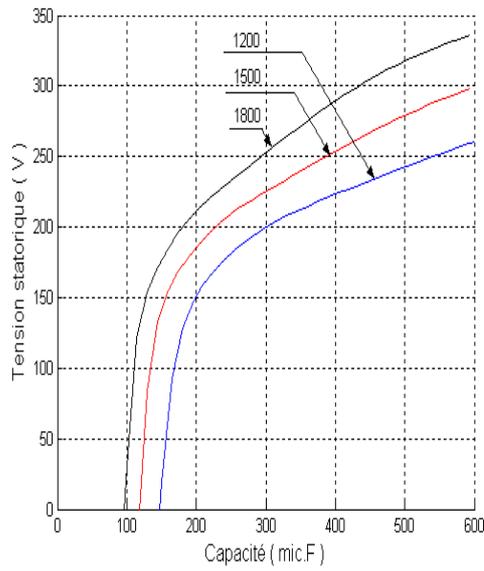
- d -

Fig. III.5- présentent la variation de :

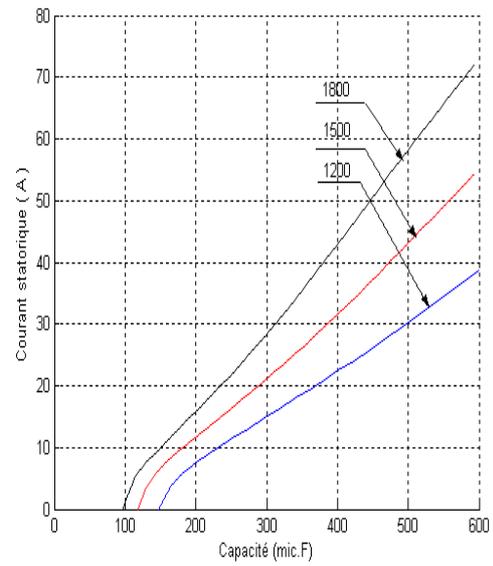
- a. La tension c. La fréquence b. Le courant statorique d. Le couple

en fonction de la vitesse pour trois valeurs de capacité (60, 90, et 120 μF).

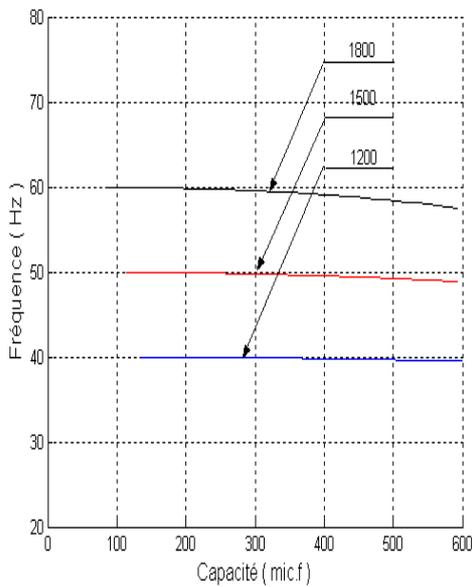
En revanche, la (fig.III.6) présente la variation de la tension, courant statorique, la fréquence et le couple en fonction de la capacité pour trois valeurs de la vitesse (1200, 1500, et 1800 tr/mn).



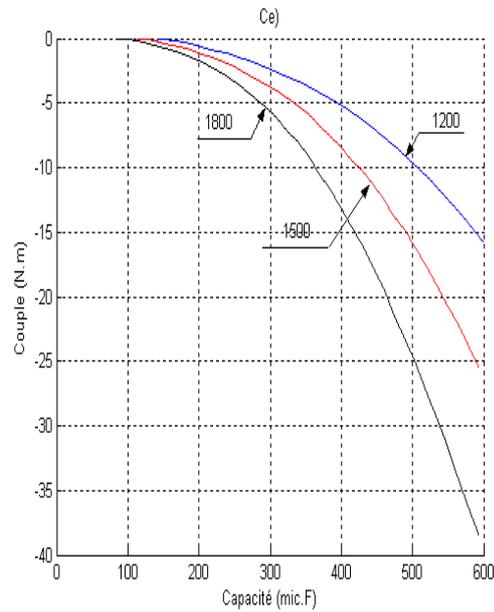
- a -



- b -



- c -



- d -

Fig. III.6- présentent la variation de :

a. la tension b. le courant statorique c. la fréquence d. le couple
 en fonction de la capacité pour trois valeurs de la vitesse (1200, 1500, et 1800 tr/mn).

Les deux valeurs critiques des vitesses et des capacités apparaissent sur les figures des tensions, et des courants. Nous constatons que la tension et le courant augmentent rapidement puis, dès que la machine commence à se saturer, l'augmentation devient moins rapide.

Les (fig.III.5) montrent l'influence de la vitesse sur les différentes grandeurs, dans le cas d'une vitesse croissante, par exemple, et pour une capacité de $60\mu\text{F}$ on lit une vitesse critique de 1000 tr/mn tant disque pour les capacités 90, 120 μF cette vitesse diminue à 700, 500tr/mn respectivement (Fig.III.5.a), ces valeurs critiques correspondent à l'auto-amorçage de la machine.

Tout fonctionnement au voisinage de la second valeur critique pourrait causer des dommages à la machine et au matériel de mesure, en effet, à partir de la vitesse 2500 tr/mn et pour la capacité de $90\mu\text{F}$ la tension développée par le générateur dépasse 550 (valeur crête) ainsi le courant dépasse 45A (valeur crête) pour atteindre des valeurs considérables, soit théoriquement infinie au voisinage d'une vitesse N légèrement inférieure à la valeur critique de désamorçage.

L'allure de la (fig.III.5.b) prouve bien que la capacité joue le même rôle que la vitesse, ainsi toutes les interprétations faites pour la vitesse restent valables, avec une particularité pour la fréquence qui est très sensible aux variations de la vitesse et beaucoup moins sensible aux variations de la capacité.

Pour avoir une tension fixe, il suffit d'agir sur la capacité ou/et la vitesse, mais il faut toujours tenir compte la variation de la fréquence statorique (figIII.6.c, figIII.7.c).

Dans notre application pratique nous utilisons une batterie de condensateur de $90\mu\text{F}$ ($270\mu\text{F}$ pour le montage en triangle), et avec une vitesse d'entraînement de 1500tr/mn, d'après ces figures la tension statorique sera autour de 380 V, avec un courant I_s de l'ordre 18A (en valeur crête).

Ces valeurs qui résultent de l'étude statique seront les même que ceux issus de l'étude dynamique, cette dernière représente l'objet de la partie suivante.

III.4- Etude dynamique

Comme on a indiqué ci-dessus, la non linéarité de la caractéristique magnétique a une importance particulière pour le fonctionnement en générateur.

Plusieurs travaux concernant l'évolution des méthodes permettant de tenir compte de certains phénomènes on peut citer : (NORMAN 1934, CHANG et LLOYD 1949) puis (AGRWAL et ALGER 1961, ANGST 1963) et (GRELLET 1977).

Le phénomène peut être modélisé soit par les outils de calcul du champ magnétique soit par l'usage des modèles de circuit classique à inductance saturable.

Dans ce dernier modèle deux procédures sont proposées pour l'implémentation de la caractéristique de magnétisation $\phi(i)$:

La première est l'introduction d'un facteur de saturation [22]. La seconde procédure (que nous utiliserons) est l'association du phénomène à une variation d'une inductance de magnétisation M_{st} dite statique et une autre M_{dy} dite dynamique.

III.4.1- Développement spatial du flux

Suivant les deux axes d et q on définit les deux composantes des vecteurs spatiaux (flux et courant), en se basant sur les hypothèses du flux mono harmonique et de la distribution sinusoïdale des enroulements.

Les flux suivant chaque axe et à travers chaque bobine est la somme d'un flux mutuel et d'un flux des fuites, et on admet que cette dernière composante est indépendante de la saturation et est proportionnelle au courant correspondant (fig.III.7)

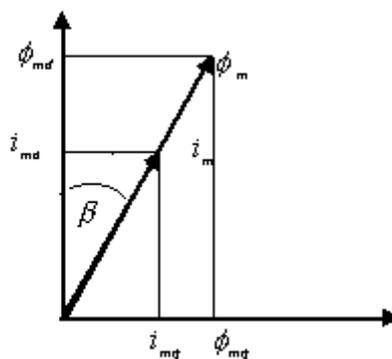


Fig. III.7- Représentation des vecteurs courants et flux magnétisant

$$\begin{cases} \overline{\psi}_s = \overline{\phi}_s + \overline{\phi}_m \\ \overline{\psi}_r = \overline{\phi}_r + \overline{\phi}_m \end{cases} \quad (2-15)$$

$$\overline{\phi}_m = M \cdot \overline{I}_m = \overline{\phi}_{md} + j\phi_{mq}$$

$$\overline{I}_m = \overline{I}_s + \overline{I}_r = (i_{ds} + j.i_{qs}) + (i_{dr} + j.i_{qr}) = i_{md} + j.i_{mq}$$

$\overline{\phi}_s, (\overline{\phi}_r)$: Vecteur de flux des fuites statoriques, (rotoriques)

$\overline{\phi}_m, (\overline{I}_m)$: Vecteur de flux magnétisant, (courant de magnétisant) .

Le système d'équation (1-5) s'écrit :

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + l_s \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{d\phi_{md}}{dt} \\ v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + l_s \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{d\phi_{mq}}{dt} \\ 0 = r_r \cdot i_{dr} + l_r \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{d\phi_{md}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{qr} \\ 0 = r_r \cdot i_{qr} + l_r \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{d\phi_{mq}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (2-16)$$

l_s, l_r : représentent les inductances de fuite respectivement au stator et au rotor que nous considérons comme constantes

Pour déterminer la quantité $\frac{d\phi_{md}}{dt}$

en effet :

$$\frac{d\phi_{md}}{dt} = \frac{d(\phi_m \cdot \cos(\beta))}{dt} = \frac{d\phi_m}{dt} \cdot \cos(\beta) - \phi_m \cdot \frac{d\beta}{dt} \cdot \sin(\beta) \quad (2-17)$$

$$\frac{d\phi_m}{dt} \cdot \cos(\beta) = \frac{d\phi_m}{d.i_m} \frac{d.i_m}{dt} \cdot \cos(\beta) = \frac{d\phi_m}{d.i_m} \cdot \cos(\beta) \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{i_{md}}{\cos(\beta)} \right) \quad (2-18)$$

$$\frac{d\phi_m}{dt} \cdot \cos(\beta) = \frac{d\phi_m}{di_m} \left[\frac{d.i_{md}}{dt} + i_{md} \cdot \text{tg}(\beta) \frac{d\beta}{dt} \right] \quad (2-19)$$

(2-17) s'écrit alors :

$$\frac{d\phi_{md}}{dt} = \frac{d\phi_m}{di_m} \cdot \frac{di_{md}}{dt} + \left[\frac{d\phi_m}{dt} \cdot i_{md} \cdot \text{tg}(\beta) - \phi_m \cdot \sin(\beta) \right] \cdot \frac{d\beta}{dt} \quad (2-20)$$

pour la détermination de $\frac{d\beta}{dt}$, nous avons :

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\arctg \left(\frac{i_{mq}}{i_{md}} \right) \right) = \frac{\cos \beta}{i_m} \cdot \left(\frac{d.i_{mq}}{dt} - \text{tg}(\beta) \frac{d.i_{md}}{dt} \right) \quad (2-21)$$

Donc l'équation (2-17) peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{d\phi_{md}}{dt} = \left[\frac{d\phi_m}{di_m} + \sin(\beta)^2 \cdot \left(\frac{\phi_m}{i_m} - \frac{d\phi_m}{di_m} \right) \right] \cdot \frac{di_{md}}{dt} + \left[\left(\frac{d\phi_m}{di_m} - \frac{\phi_m}{i_m} \right) \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \right] \frac{di_q}{dt} \quad (2-22)$$

$\frac{d\phi_{mq}}{dt}$: est calculé par la même méthode :

$$\frac{d\phi_{mq}}{dt} = \left[\frac{d\phi_m}{di_m} + \cos(\beta)^2 \cdot \left(\frac{\phi_m}{i_m} - \frac{d\phi_m}{di_m} \right) \right] \cdot \frac{di_{mq}}{dt} + \left[\left(\frac{d\phi_m}{di_m} - \frac{\phi_m}{i_m} \right) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \right] \frac{d.i_{md}}{dt} \quad (2-23)$$

Deux quantités sont apparues dans les expressions (2-22) et (2-23) :

$\frac{\phi_m}{i_m}$: représente une mutuelle inductance statique M_{st}

$\frac{d\phi_m}{di_m}$: représente une mutuelle inductance dynamique M_{dy}

Si on pose :

$$L_d = \frac{d\phi_m}{di_m} + \sin(\beta)^2 \cdot \left(\frac{\phi_m}{i_m} - \frac{d\phi_m}{di_m} \right)$$

$$L_q = \frac{d\phi_m}{di_m} + \cos(\beta)^2 \cdot \left(\frac{\phi_m}{i_m} - \frac{d\phi_m}{di_m} \right)$$

$$L_{dq} = \left(\frac{d\phi_m}{di_m} - \frac{\phi_m}{i_m} \right) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\beta)$$

L_d, L_q : sont des mutuelles inductances saturables statoriques suivant les axes d et q

L_{dq} : est considéré comme la mutuelle inductance entre les enroulements placés suivant l'axe **d** et ceux placés suivant l'axe **q**, elle est connue sous le nom « inter saturation » [22].

avec ces nouvelles inductances le système d'équation (2-16) devient :

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + l_s \cdot \frac{d.i_{ds}}{dt} + L_d \frac{d.i_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{d.i_{mq}}{dt} \\ v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + l_s \cdot \frac{d.i_{qs}}{dt} + L_d \frac{d.i_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{d.i_{md}}{dt} \\ 0 = r_r \cdot i_{dr} + l_r \cdot \frac{d.i_{dr}}{dt} + L_d \frac{d.i_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{d.i_{mq}}{dt} + \omega_r \cdot (l_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{mq}) \\ 0 = r_r \cdot i_{qr} + l_r \cdot \frac{d.i_{qr}}{dt} + L_q \frac{d.i_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{d.i_{md}}{dt} + \omega_r \cdot (l_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{md}) \end{cases} \quad (2-24)$$

pour revenir aux équations de système (2-16) il suffit de faire :

$$L_d = L_q = M_{st} = M, \quad L_{dq} = 0$$

Les deux mutuelles sont déterminées à partir de la courbe de magnétisation qui est modélisée par une fonction mathématique correspondante. Cette dernière doit être fiable pour tous les points de la caractéristique de magnétisation, et notamment pour ceux qui se situent dans la zone d'une forte saturation.

On peut citer quelques expressions mathématiques qui reproduisent la relation entre le courant et le flux :

$$\phi(I) = a \cdot f_n(I) + \mu_0 I \quad \text{où} \quad f_n(I) = [1 - \exp(-x^n)]^{\frac{1}{n}}$$

$$\phi(I) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k I^k$$

$$\phi(I) = \frac{aI}{b + |I|} + cI$$

$$\phi(I) = \text{artg}(bI) + cI$$

$$I(\phi) = a \cdot \sinh(b\phi) + c\phi$$

$$I(\phi) = \sum_{k=0}^p a_k \cdot \phi^{2k+1}$$

$$I(\phi) = a\phi^{2m+1} + c\phi \text{ où } (m \text{ entier } \geq 1)$$

$$\phi(I) = [M_s + (M_0 - M_s) \exp(-B \cdot I^2)] I$$

Pour notre caractéristique magnétique relevée nous adoptons l'approximation suivante :

$$\phi(I) = 0.63 \arctan(0.15 \cdot I_m)$$

ce qui permet de déterminer les deux inductances mutuelles :

$$M_{st} = \begin{cases} 0.09 \text{ H,} & \text{si } I_m < 3 \text{ A} \\ \frac{0.63 \arctan(0.15 I_m)}{I_m} \text{ H,} & \text{si } I_m \geq 3 \text{ A.} \end{cases}$$

$$M_{dy} = \frac{37.8}{9 I_m^2 + 400}$$

Lors de la simulation numérique, ces deux inductances doivent être ajustées en relation avec le courant magnétisant pour chaque itération de calcul.

La (Fig.III.8) [22] représente le résultat de l'approximation de la caractéristique de magnétisation obtenue à partir du relevé expérimental :

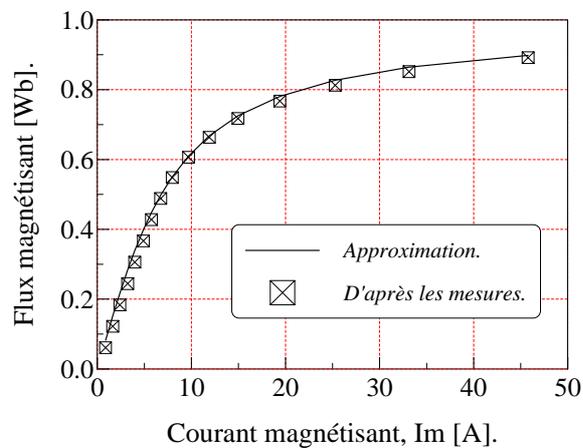


Fig.III.8- Approximation mathématique de la caractéristique de magnétisation.

III.5- Résultats de simulation et résultats expérimentaux

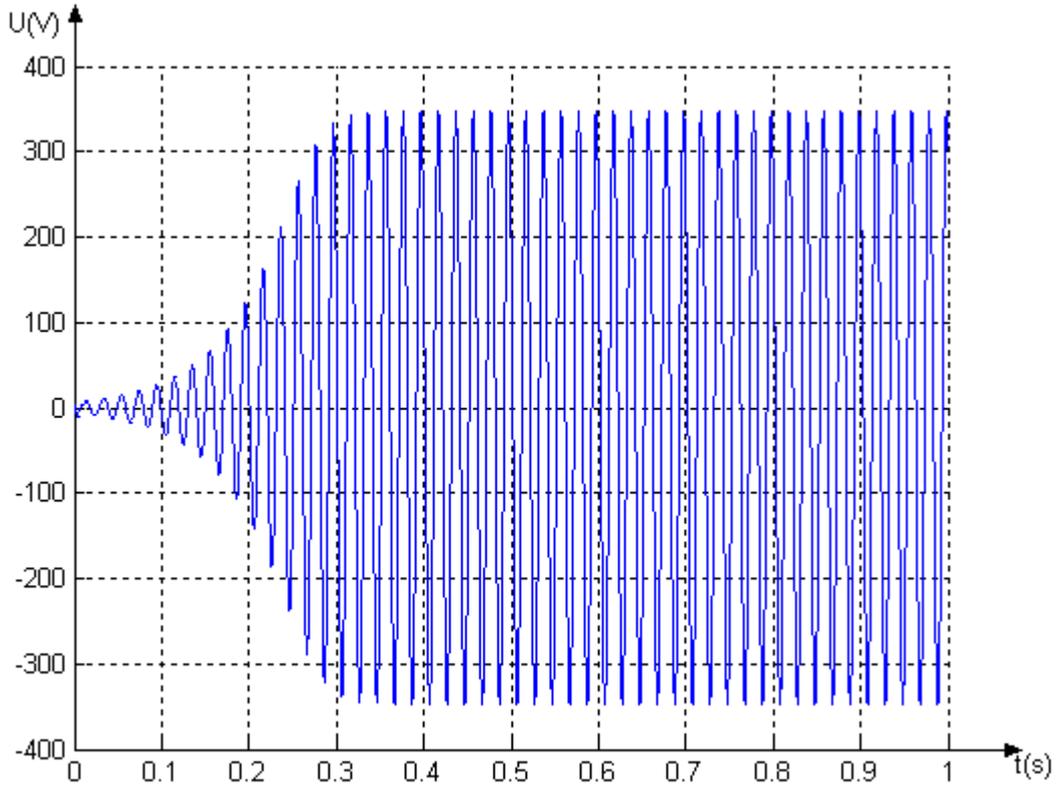


Fig.III.9- Tension statorique d'auto-amorçage obtenue par simulation pour $r_r=0.92\Omega$ et $C=90\mu F$.

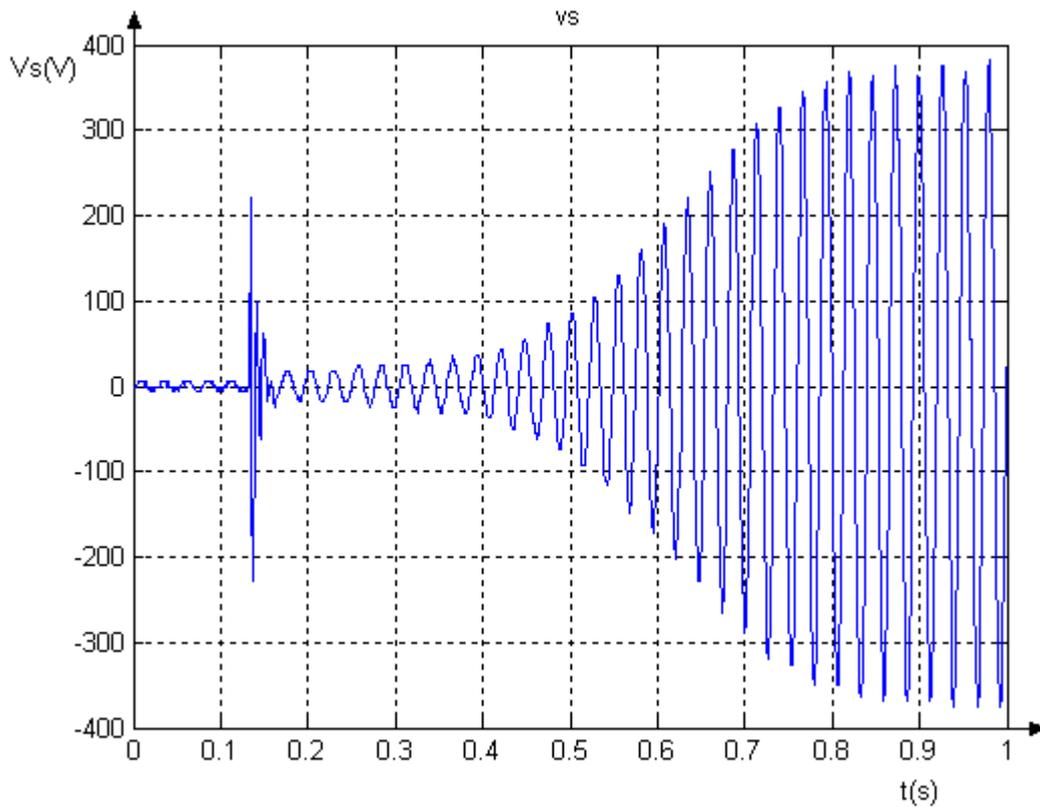


Fig.III.10- Tension statorique d'auto-amorçage obtenue expérimentalement.

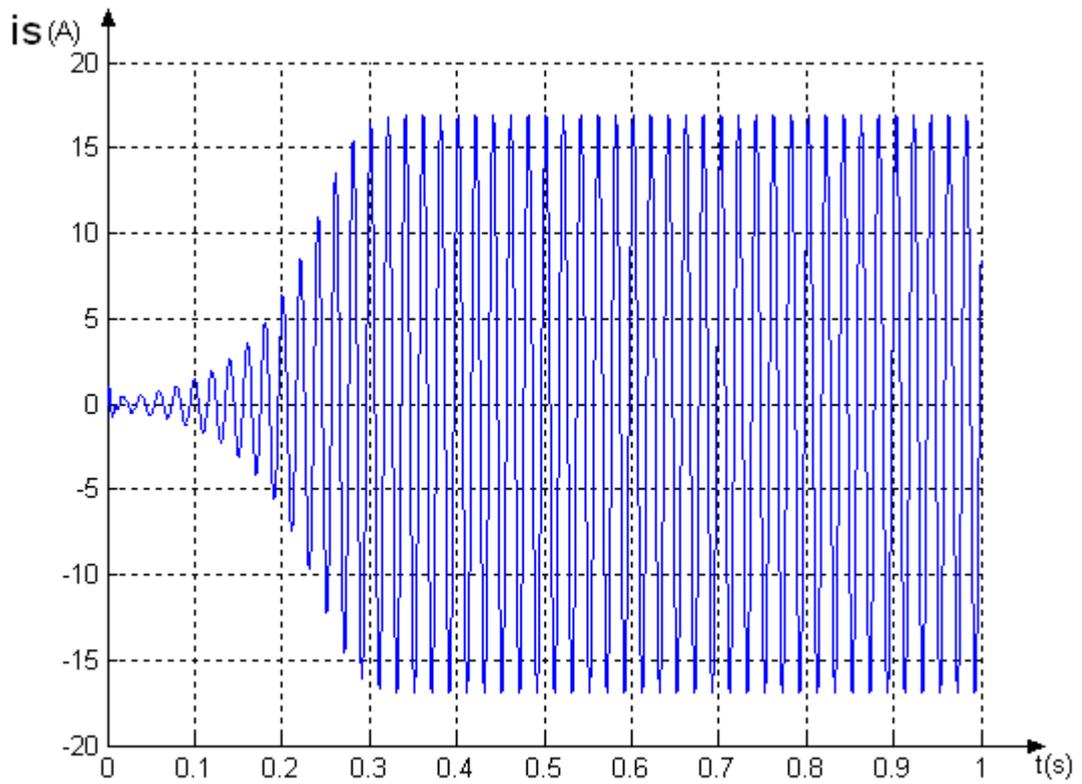


Fig.III.11- courant statorique d’auto-amorçage obtenu par simulation pour $r_r=0.92 \Omega$ et $C=90\mu F$.

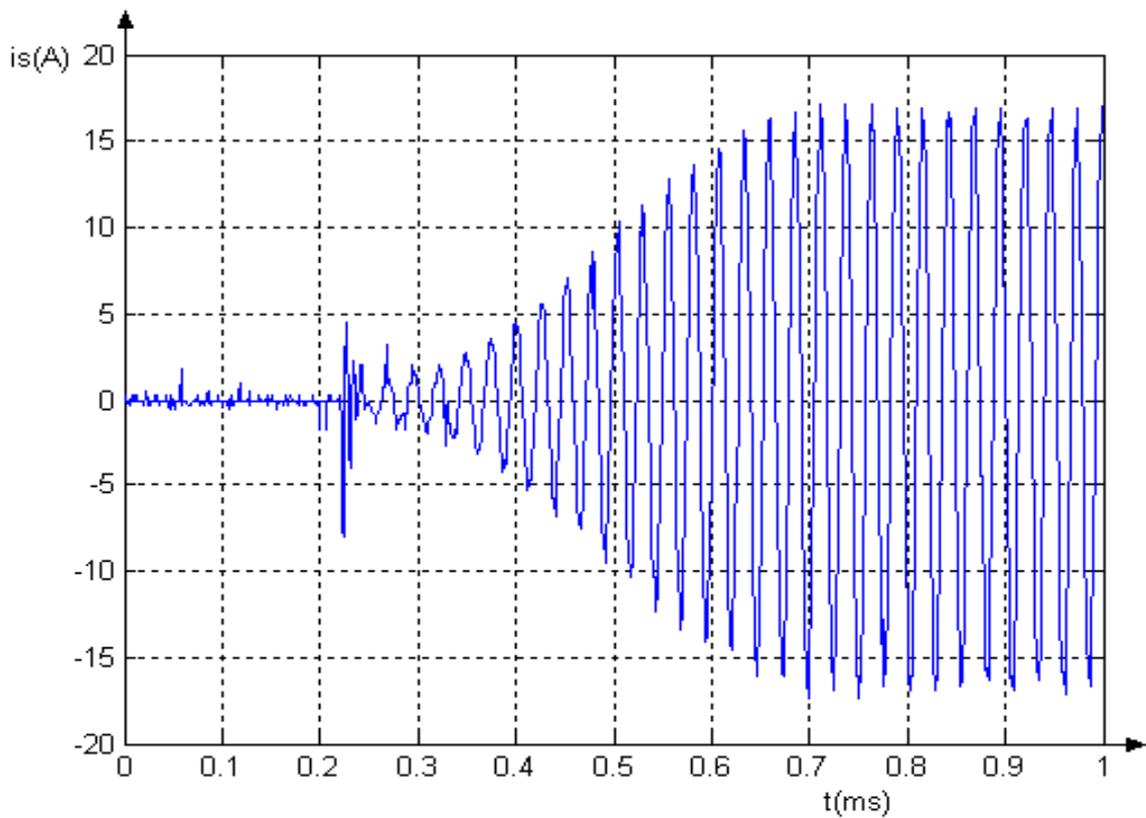


Fig.III.12- Courant statorique d’auto-amorçage obtenu expérimentalement.

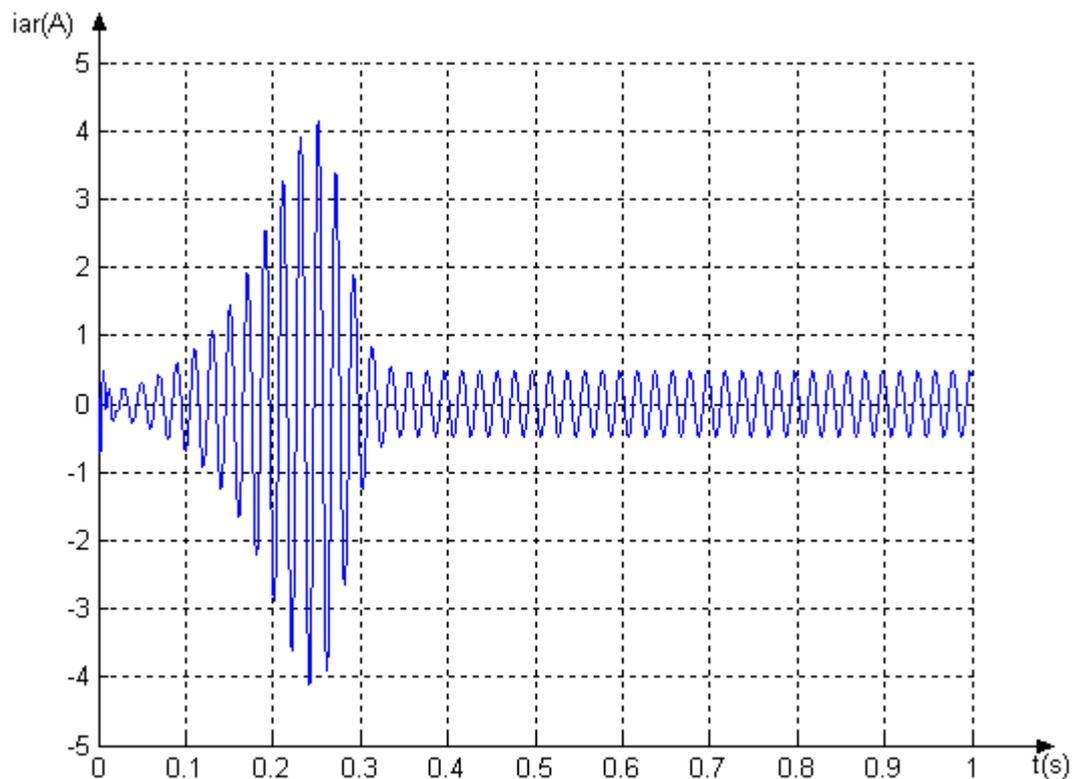


Fig.III.11- Courant rotorique d'auto-amorçage obtenu par simulation pour $r_r=0.92\Omega$ et $C=90\mu F$

III.6- Conclusion

L'introduction de la non linéarité de la caractéristique du circuit magnétique dans le modèle linéaire donne une bonne similitude entre les résultats de simulation et ceux de l'expérience.

Cette concordance des résultats montre bien l'effet de la saturation en fonctionnement générateur d'une part, et d'autre part la validité du modèle proposé.

Chapitre IV

Le phénomène transitoire des courants lors du retour réseau

IV.1- Introduction

Après la modélisation du générateur asynchrone en régime dynamique dans le cas isolé, dans ce chapitre nous étudions le comportement du générateur asynchrone relié au réseau, et plus particulièrement les cas des connexions et des reconnections du générateur.

Pratiquement, pendant l'exploitation du réseau de distribution, pas mal d'incidents peuvent survenir. Ces derniers généralement pourvus des moyens de ré-enclenchement automatique ou de commutation des jeux des barres (à titre d'exemple). Ce qui peut résulter un transitoire violent et des efforts électrodynamiques sévères sur le système d'accouplement mécanique de la machine asynchrone (rotor, arbres, ...).

Dans cette partie nous essayons de mettre en évidence le phénomène qui accompagne la connexion du générateur au réseau d'une part, et la contribution des conditions initiales sur le transitoire d'autre part.

IV.2- Etude du transitoire du générateur asynchrone relié au réseau

Pour assurer l'autoamorçage, le générateur asynchrone entraîné par un moteur à courant continu à la vitesse de synchronisme. Les condensateurs (de 90 μ .F) sont connectés en triangle et reliés au stator de générateur par l'intermédiaire d'un interrupteur.

Une fois le régime permanent est atteint, on relie le générateur au réseau à l'aide d'un interrupteur K (Fig.IV.1), et à l'aide de **GS2020** qui Lié à un PC on peut enregistrer les formes des signaux obtenus.

On a fait plusieurs opérations d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur K, et chaque fois on enregistre la forme des courants.

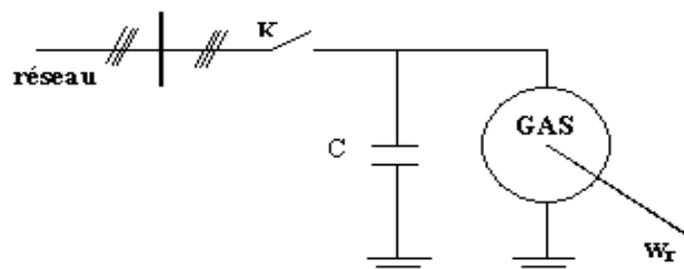


Fig. IV.1- Le dispositif expérimental

Avant la connexion, l'interrupteur K est ouvert. Le fonctionnement d'une façon autonome de la machine constitue un système équilibré, où les enroulements sont parcourus par les courants suivants :

$$\begin{cases} i_{as} = I_a \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha) \\ i_{bs} = I_a \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{cs} = I_a \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} v_{a1} = V_{a1} \sqrt{2} \cos(\omega t) \\ v_{b1} = V_{a1} \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c1} = V_{a1} \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

V_{a1} , I_a , α représentent respectivement la valeur efficace de la tension, et la valeur efficace du courant, et le déphasage entre le courant et la tension de la machine.

Après la fermeture de l'interrupteur K (l'accrochage au réseau), le réseau va imposer sa tension à la machine, donc les expressions des tensions deviennent :

$$\begin{cases} v_{as} = V_a \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi) \\ v_{bs} = V_a \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{cs} = V_a \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

V_a : la valeur efficace de la tension du réseau.

φ : le déphasage entre la tension de réseau est celle de la machine.

La figure (Fig.IV.2) représente la tension de la machine lors de retour réseau obtenue par simulation, il est évident que la tension de la machine chute pour atteindre la tension de réseau.

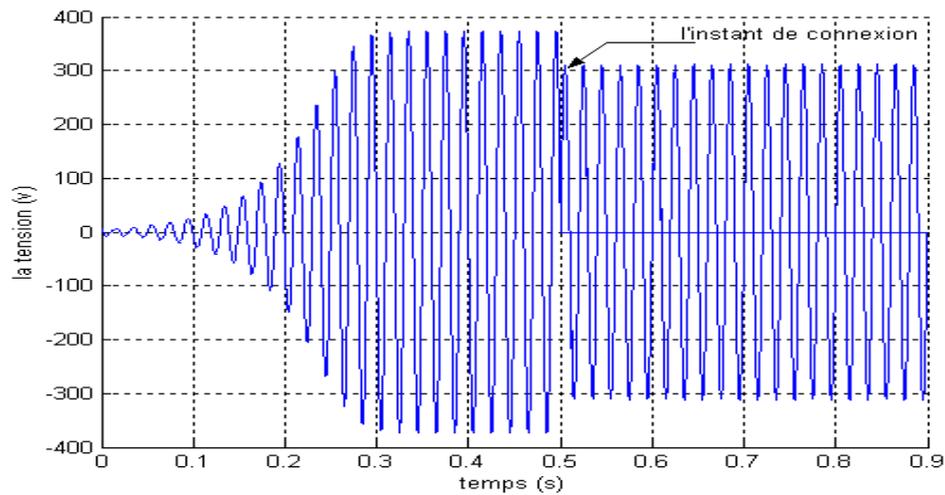


Fig. IV.2 La tension de la machine lors de la connexion au réseau

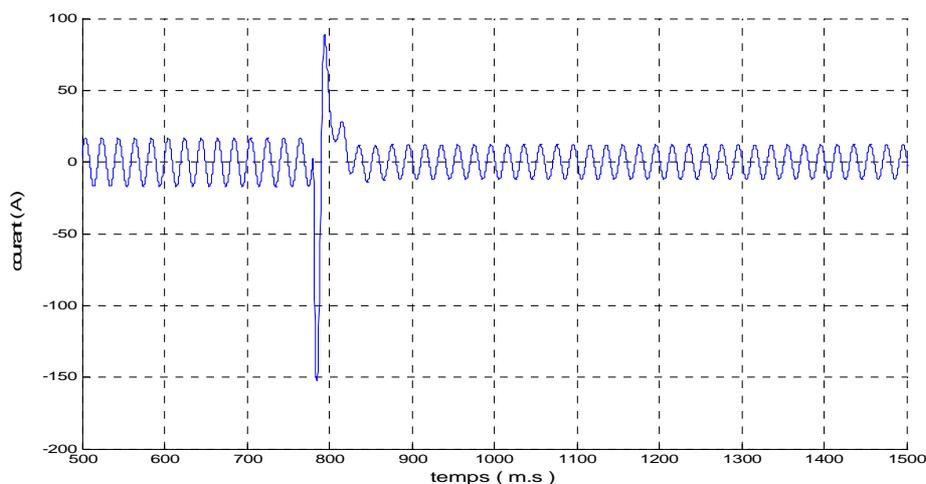
IV.2.1- Le transitoire du courant

Pour pouvoir comparer entre les courants obtenus par simulation et ceux qui obtenus par expérience, il faut d'abord avoir les mêmes conditions, Ce qui est très difficile à réaliser.

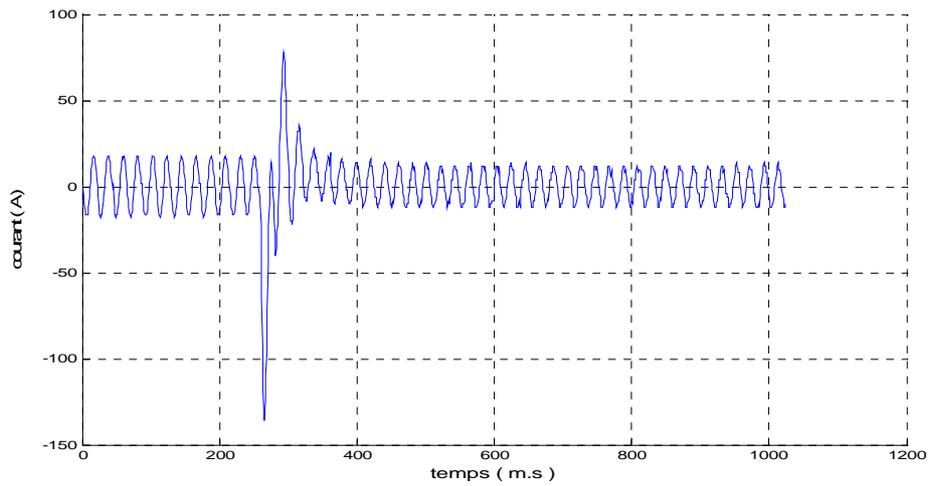
De cet effet, nous supposerons par la suite, que la vitesse reste constante lors du régime transitoire. Cette hypothèse est plus proche de la réalité pour les machines les plus puissantes (où l'inertie devient plus importante).

Afin de cerner les paramètres gouvernant le régime transitoire, nous avons procédé à plusieurs testes expérimentaux, et on les a comparés avec ceux de simulation (nous avons utilisé le même modèle explicite dans le chapitre précédent).

Les figures (fig.IV.3,4,5) présentent les formes des courants lors du retour réseau à des instants quelconques.

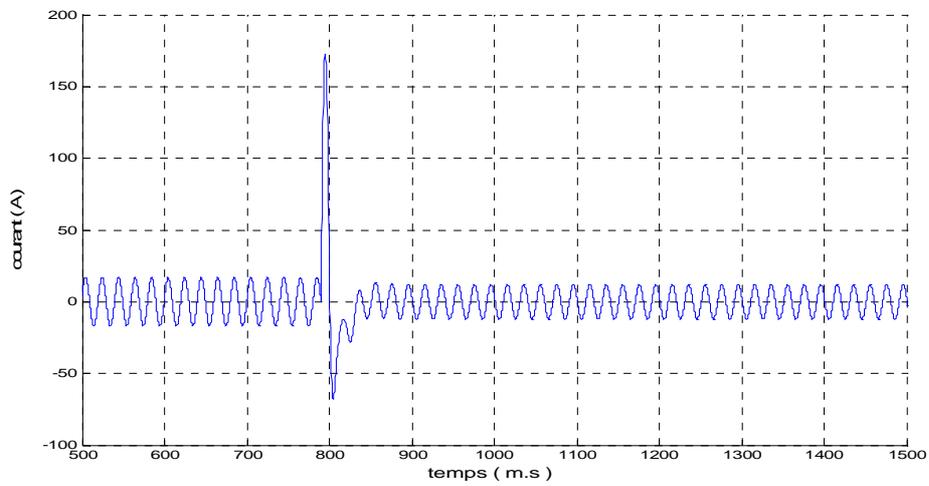


-a-

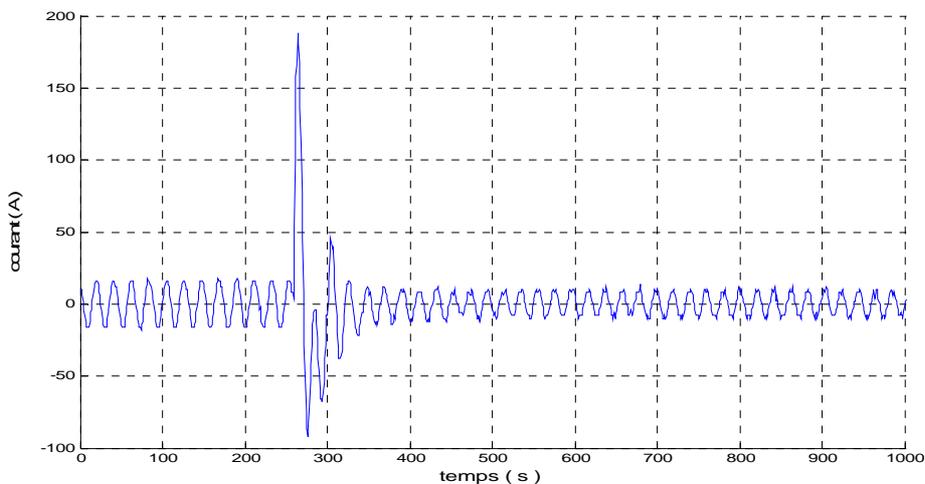


- b -

Fig. IV.3-Pic de courant négatif a- Obtenu par simulation
b- Relevé expérimentalement

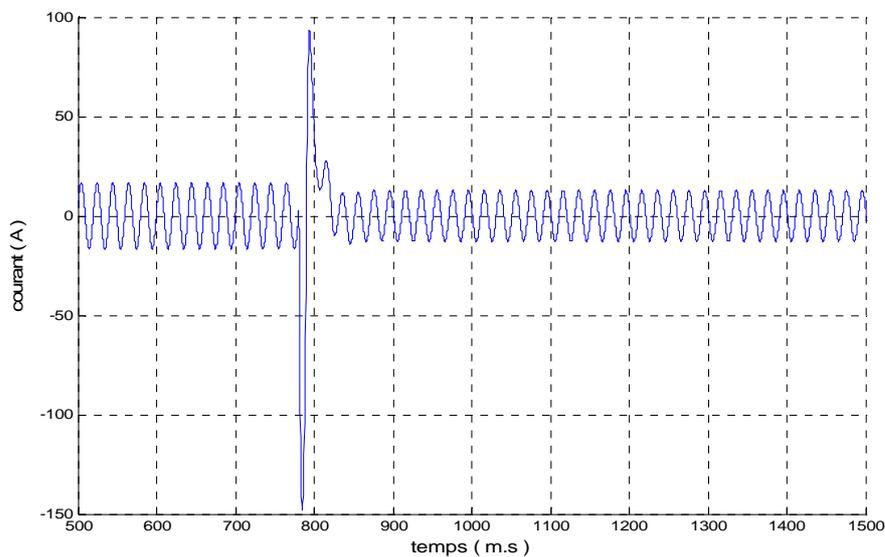


- a -

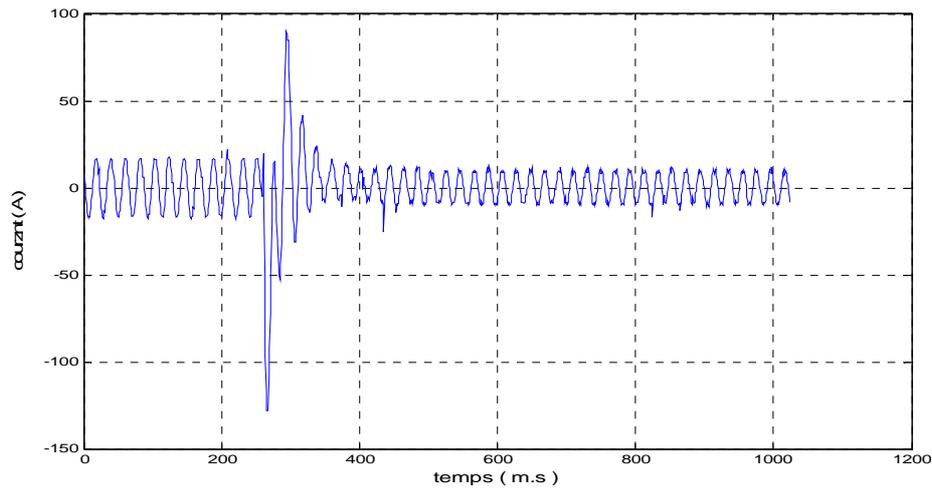


-b-

Fig. IV.4-Pic de courant positif a- Obtenu par simulation
 b- Relevé expérimentalement



-a-



- b -

Fig.IV.5- Pic de courant à un point proche de l'intermédiaire

a- Obtenu par simulation

b- Relevé expérimentalement

Nous ne cherchons pas la superposition entre les résultats obtenus par simulation et les résultats obtenus expérimentalement, à cause de la difficulté de la mise aux mêmes conditions.

Le réseau revient à un instant quelconque, où les enroulements de la machine sont parcourus par des courants ayant une phase α et valeur I_a . Et au vue de l'aspect aléatoire du phénomène (pics négatifs, pics positifs, connexions douces,...), nous cherchons la relation entre ces derniers et le déphasage entre la tension et le courant d'une part, et leur relation avec l'instant de connexion d'autre part.

Au niveau de notre programme, nous n'avons pas la possibilité d'agir sur le déphasage α , nous agirons que sur le déphasage φ .

IV.2.2-L'influence de l'instant de connexion et les déphasages sur les pics de courant

La figure (Fig.IV.6) représente la variation de pic de courant en fonction du déphasage entre la tension de réseau et celle du générateur asynchrone.

La figure (Fig.IV.7) représente la variation de pic de courant en fonction de l'instant de connexion.

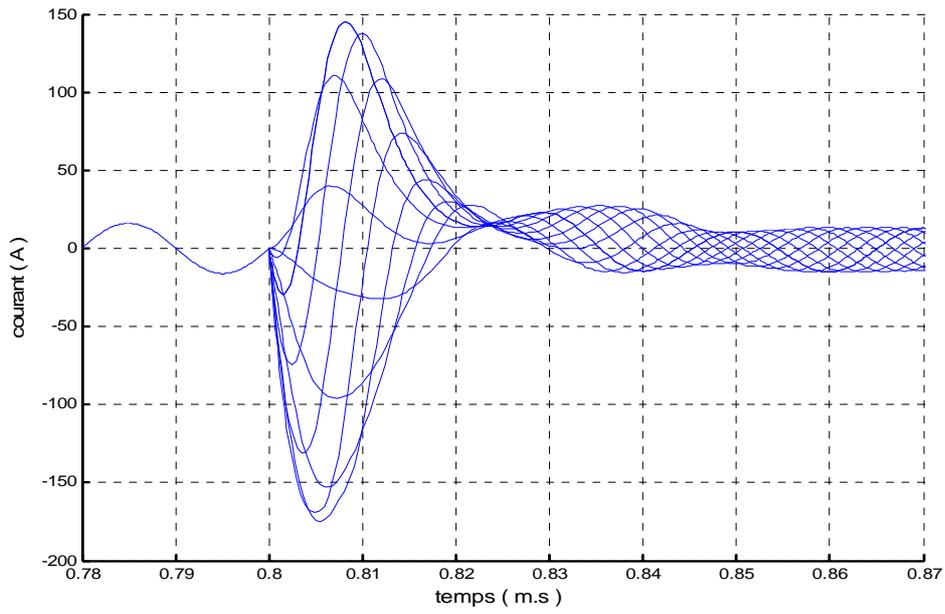


Fig. IV.6.a Le transitoire du courant en fonction de déphasage (φ)

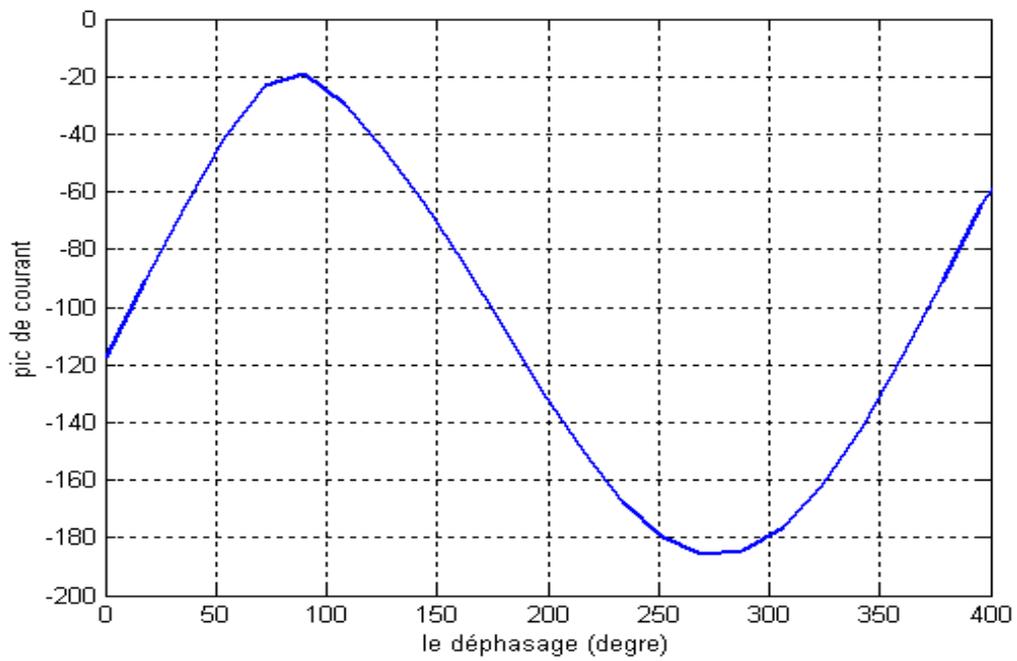


Fig. IV.6.b. Variation des pics du courant en fonction de déphasage (φ)

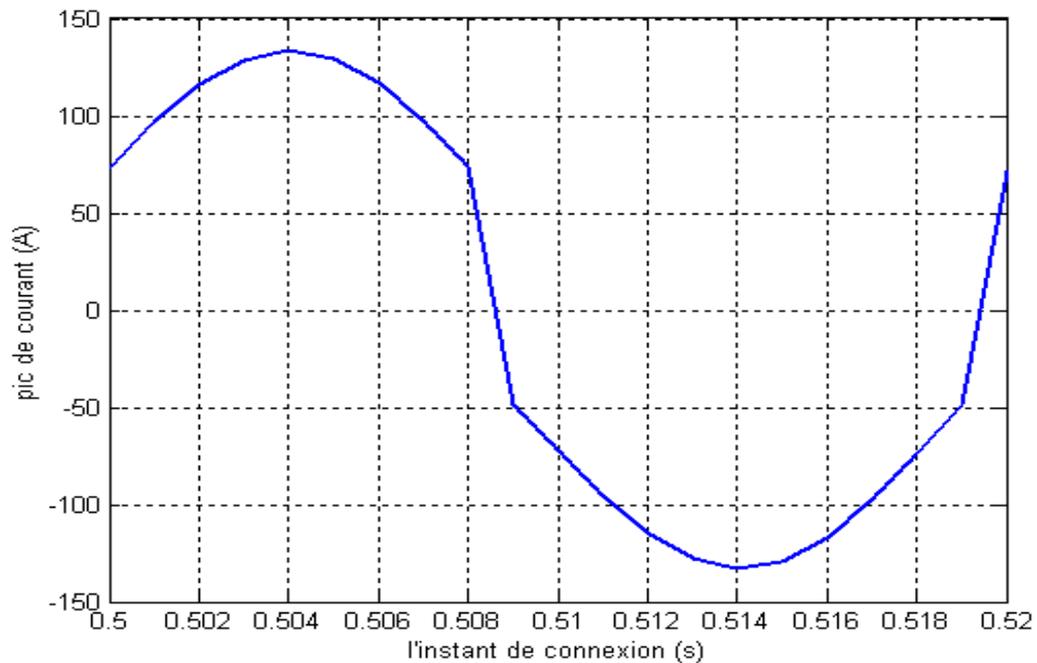


Fig. IV.7 Variation des pics de courant en fonction des instants de connexion

D'après les figures, on constate que les pics de courant varient d'une façon périodique avec la variation de déphasage tension-courant, et aussi avec la variation de l'instant de connexion.

D'après la figure (Fig. IV.6), l'amplitude des pics de courant minimale est obtenue pour des déphasages de 0 et 2π , tandis que les pics maximums sont obtenus pour le déphasages π , c-à-d, lorsque la tension de réseau devienne en opposition de phase par rapport au courant statorique de la machine ($\varphi - \alpha = \pi$).

La figure (Fig.IV.7) montre bien la périodicité de phénomène en fonction de l'instant de connexion, le pic de courant peut atteindre 135A et -135A, c-à-d le courant atteint presque 7.5 fois le courant en régime permanent, ces valeurs sont retrouvées pour une déphasage $\varphi = 0$.

IV.3-Conclusion

Nous avons présenté le phénomène transitoire qui accompagne le retour réseau sur le générateur asynchrone, pendant un fonctionnement autonome. Ce phénomène engendre des pics de courant qui peuvent atteindre 10 fois le courant nominal, ainsi des pics de couple qui dépassent 12 fois le couple nominal.

Ces pics sont principalement en fonction de déphasage entre la tension de réseau et le courant de la machine d'une part, et l'instant de retour réseau d'autre part.

Les résultats obtenus montrent la violence du phénomène (pic positif, pic négatif,...) pour le courant et pour le couple, ainsi on montre que ce dernier ne dépend que de l'instant de connexion.

Chapitre V

Fonctionnement et Modèle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

V.1- Introduction

Lorsque la machine asynchrone est directement connectée au réseau en fonctionnement générateur, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées. Une solution consiste à insérer un convertisseur entre la machine et le réseau. Le dispositif peut alors fonctionner à vitesse variable car quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension est redressée et un onduleur côté réseau est chargé d'assurer la cohérence entre la fréquence du réseau et celle délivrée par le dispositif. Toutefois ce convertisseur doit être dimensionné pour faire transiter la totalité de la puissance générée par la machine. Il doit donc être correctement refroidi et présente un encombrement non négligeable surtout dans les cas où il se trouve dans la nacelle de l'éolienne. De plus il peut être générateur de perturbations harmoniques importantes.

Partant de ce constat, nous avons décidé d'utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Même si la présence de contacts glissants et d'un bobinage rotorique la rend moins robuste, la présence d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau. De plus, si la plage de variation de vitesse est limitée à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur doit alors être dimensionné pour seulement 30 % de la puissance nominale de la machine. L'énergie électrique peut non seulement être produite du stator vers le réseau mais également, pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau.

V.2- Topologie et emploi des machines asynchrones à double alimentation

V.2.1- Structure des machines asynchrones à double alimentation

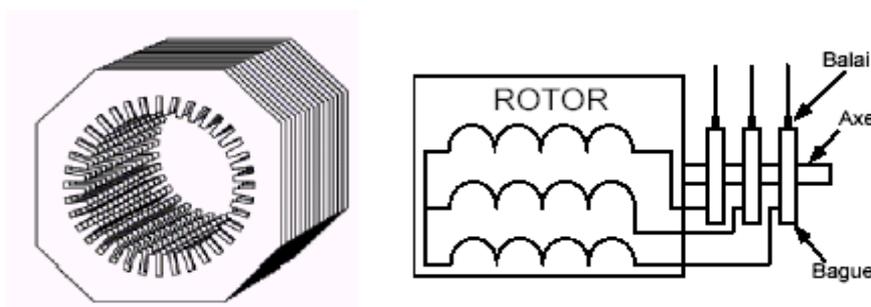


Fig.V.1- Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Fig.V.1). En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hyposynchrone (Fig.V.2) [15].

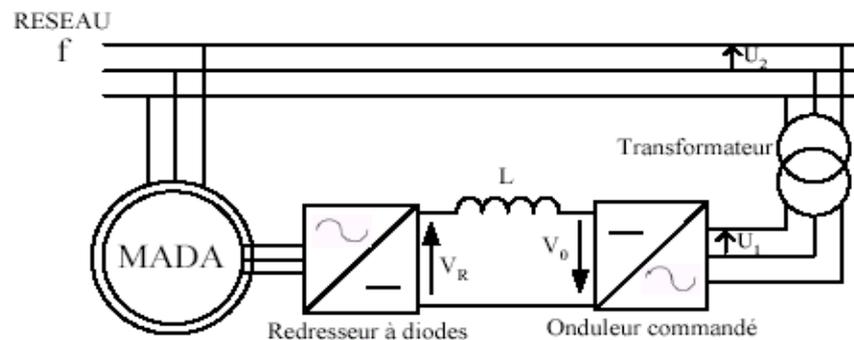


Fig.V.2- cascade hypo synchrone

Nous verrons comment nous pouvons utiliser la "réversibilité" de ce principe afin de faire fonctionner la machine asynchrone à double alimentation en générateur à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative".

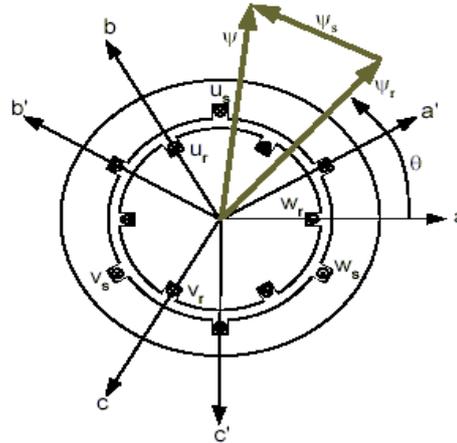


Fig.V.3- Configuration des enroulements et des flux dans une machine asynchrone à double alimentation.

V.2.2- Application des machines asynchrones à double alimentation

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques [20]. Ce dispositif est par conséquent économique, et contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même méthode peut être appliquée au fonctionnement générateur dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée:

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions [16].
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.

- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

Une troisième application de la MADA consiste à faire fonctionner celle-ci en moteur à vitesse variable à hautes performances avec deux convertisseurs : un au rotor et un au stator (Fig.V.4) [17].

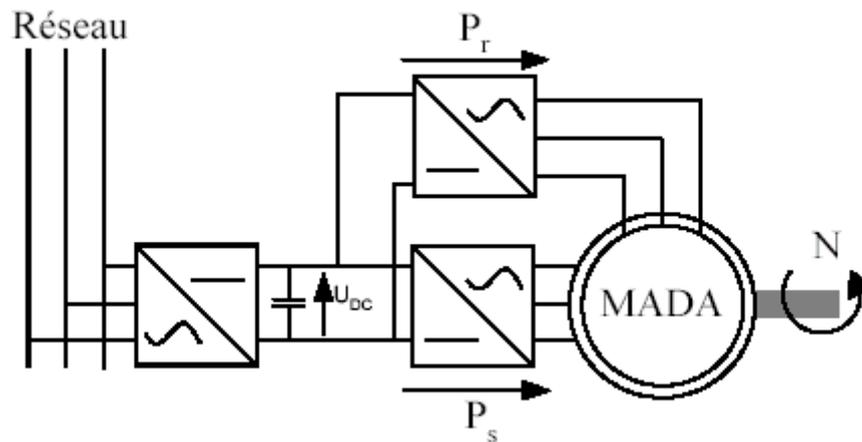


Fig.V.4- MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances

Ce dispositif permet de faire varier la vitesse de rotation depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse nominale à couple constant et depuis la vitesse nominale jusqu'à six fois celle-ci à puissance constante. Ce mode de fonctionnement présente de nombreux avantages :

La commande vectorielle permet une bonne maîtrise du flux et du couple sur toute la plage de variation et confère une dynamique particulièrement élevée.

Le système se prête très bien aux applications nécessitant d'excellentes propriétés de freinage puisqu'il suffit d'inverser le sens du champ tournant au rotor.

Les fréquences d'alimentation sont partagées entre le stator et le rotor, limitant ainsi la fréquence maximale de sortie requise par chaque convertisseur et les pertes fer de la machine.

Les puissances traversant les convertisseurs sont également partagées entre stator et rotor évitant ainsi le surdimensionnement de ces convertisseurs.

V.3- Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La (Fig.V.5) montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure Scherbius PWM). P_{RES} est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_S la puissance transitant par le stator, P_R la puissance transitant par le rotor, et P_{MEC} la puissance mécanique [13]. Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hyposynchrone. En mode moteur hypersynchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hyposynchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hypersynchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $(g.P_{MEC})$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

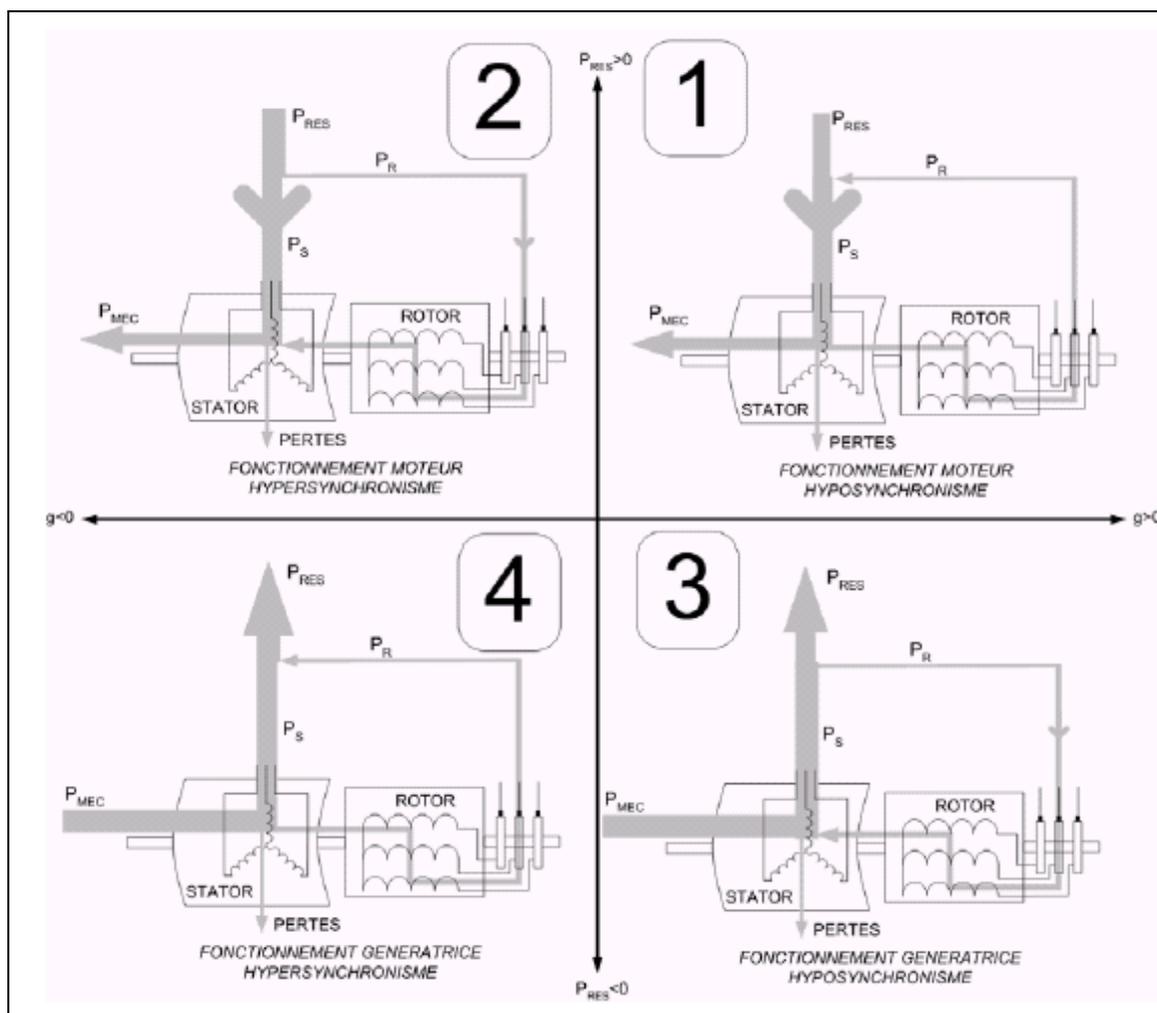


Fig.V.5 - Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

A titre de comparaison, la (Fig.V.6) montre la caractéristique de production optimale pour les deux types de machines (cage d'écurie avec convertisseur et MADA) dans un système éolien. Nous constatons que si la machine à cage est capable de produire de l'énergie pour les très faibles vitesses de vent, cette énergie est écrêtée à la puissance nominale lorsque la machine atteint une vitesse très légèrement supérieure au synchronisme. La MADA ne commence à produire qu'à partir de 1000 tr/mn (ce qui correspond à la vitesse de synchronisme moins 30%) de façon à ne pas augmenter la taille du convertisseur rotorique. La puissance totale produite par la MADA est la somme des puissance statorique et rotorique.

Or, jusqu'au synchronisme, la puissance rotorique est négative, la MADA produit donc légèrement moins que la machine à cage. En revanche, au-delà du synchronisme, la figure montre que la MADA est capable de produire de l'énergie par l'intermédiaire du rotor

jusqu'à 1900 tr/min (vitesse de synchronisme + 30%) [14], [18], [19].

Dans notre application, nous nous intéresserons au fonctionnement du troisième quadrant (fonctionnement générateur hyposynchrone), de façon à ne traiter le transfert de puissance rotorique dans une seule direction (réseau vers rotor). Le convertisseur côté réseau sera donc un simple redresseur unidirectionnel. La tension du bus continu est par conséquent fixée et nous nous intéressons uniquement au contrôle du convertisseur côté rotorique.

L'étude de la bidirectionnalité du transfert de puissance entre le rotor et le réseau et la commande du convertisseur coté réseau feront l'objet d'une seconde étape dans l'étude de la MADA en générateur.

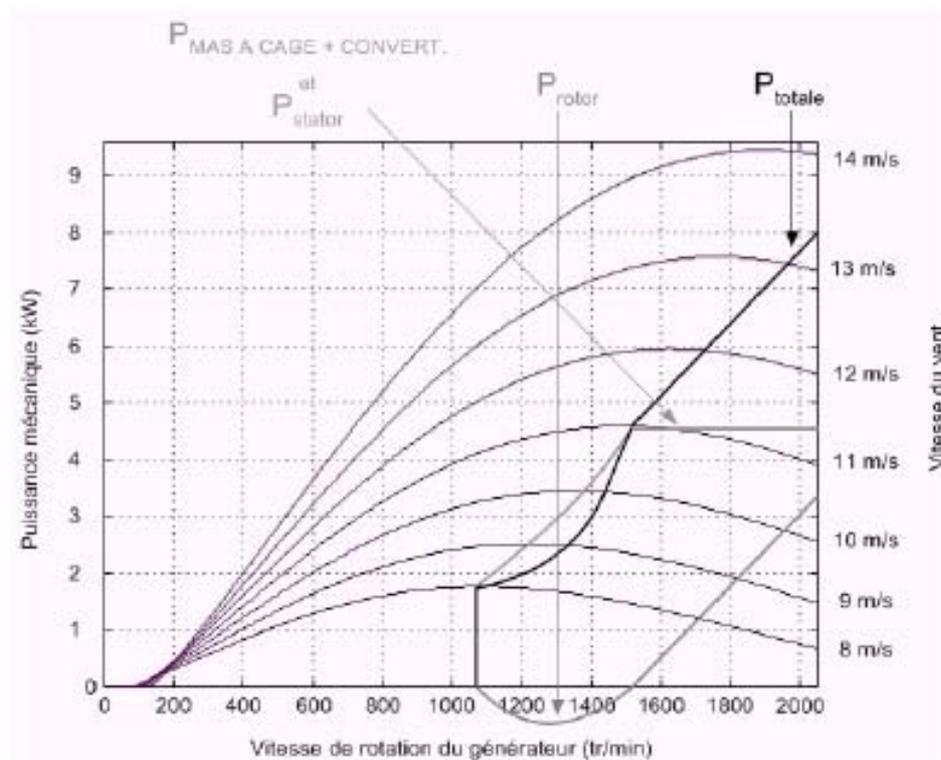


Fig.V.6- caractéristique de production d'énergie optimale de la MADA et de la machine à cage.

V.4- Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage exposé dans le chapitre II. En effet lors de cette modélisation, on assimile la cage d'écureuil à un bobinage triphasé. La seule différence réside dans le fait que ces enroulements ne sont plus systématiquement en court-circuit par conséquent les tensions diphasées rotoriques du modèle que l'on rappelle ci-après ne sont pas nulles.

Rappel du modèle diphasé de la machine asynchrone à double alimentation [21]:

Equations électriques :

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_a \Phi_{qs} \\ v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_a \Phi_{ds} \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_a - \omega_r) \Phi_{qr} \\ v_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_a - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases}$$

L'expression des flux totaux prend la forme :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{dr} = l_s \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = l_s \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases}$$

avec:

$$\begin{cases} l_s = L_s - M_s \\ l_r = L_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} \cdot L_m \end{cases}$$

Equation mécanique.

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_f \cdot \Omega = C_e - C_r$$

Avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques.

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_s} \cdot (i_{dr} \cdot \Phi_{qs} - i_{qr} \cdot \Phi_{ds}).$$

V.5- Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la structure d'une machine asynchrone à double alimentation en comparaison avec les machines classiques de type synchrone ou asynchrone à cage.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut présenter cette machine par rapport aux structures classiques, nous avons analysé les possibilités qu'elle offrait en fonctionnement moteur et générateur. L'analogie de fonctionnement qui peut être faite avec les machines synchrones dans la configuration des flux a conduit à dénommer cette machine : "machine généralisée".

Conclusion Générale

La problématique abordée dans ce projet nous a permis d'étudier le fonctionnement des machines asynchrones utilisées dans les systèmes éoliens.

Nous avons commencé notre projet par un rappel sur les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique ainsi que les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement. Nous avons cité les équations et les concepts physiques régissant le fonctionnement de l'éolienne, ainsi la modélisation mathématique du système de conversion de l'énergie éolienne.

Dans la deuxième partie, nous avons réalisé une première étude qui consiste à établir un bilan des performances et des limites d'utilisation de la machine asynchrone auto-excitée. Une modélisation nous a permis de simuler son comportement en régime saturé et de confirmer ces résultats par des validations expérimentales. Cette confirmation permet de mettre l'accent sur l'importance de la saturation magnétique de la machine.

La troisième partie de ce projet est consacrée à l'utilisation du générateur asynchrone connecté au réseau, la tension produite est imposée par le réseau.

Le phénomène du retour réseau produit des pics de courant et de couple très importants qui dépendent essentiellement de l'instant de connexion et du déphasage entre la tension de la machine et celle du réseau. Ces pics obtenus pour le courant et le couple sont maximums pour des tensions en opposition de phase et minimums dans le cas des tensions en phase.

La dernière partie présente la structure de la machine asynchrone à double alimentation en comparaison avec les machines classiques de type synchrone ou asynchrone à cage.

La machine asynchrone à double alimentation a des avantages par rapport aux structures classiques, à titre d'exemple cette machine peut donner une tension fixe et à fréquence constante.

Annexe

Caractéristiques de la machine utilisée :

$$R_r = 0.92\Omega$$

$$R_s = 1.3/3\Omega$$

$$L_s = L_r = 0.004H$$

$$M = 0.078 H$$

$$J = 0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

$$P = 2 \text{ (4 pôles)}$$

$$V = 220/380 V$$

$$P = 3.5 \text{ kW}$$

Bibliographie

- [1] P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [2] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [3] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [5] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne, "<http://www.windpower.org/fr/core.htm>".
- [4] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [6] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley et Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [7] P. Berlu, "Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance", Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, 1999.
- [8] A. D. Diop, "Contribution au Développement d'un Simulateur Electromécanique d'Aérogénérateurs : Simulation et Commande en Temps Réel d'une Turbine de Puissance Moyenne à Angle de Calage Variable", Thèse de doctorat, Université du Havre, 8 juillet 1999.
- [9] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, E. Ceanga, N.A. Cutululis, "Modelling non-Stationary Wind Speed for Renewable Energy Systems Control", The annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle III, 2000 ISSN 1221-454X, pp.29-34.
- [10] I. Van der Hoven, "Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycle per Hour", Journal of Meteorology, 1957, Vol. 14, pp.160-164.

- [11] F. Poitiers, "Etude d'un système éolien basé sur une machine asynchrone a double alimentation", Actes de la sixième Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003, pp. 361-366.
- [12] Frédéric POITIERS, « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Le 19 décembre 2003.
- [13] C. Kelber, W. Schumacher, "Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machines", VSSH 2000. European Conference Variable Speed in Small Hydro. Grenoble, France, 26-28 Jan. 2000.
- [14] R. Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine - A Comparison with Alternative Schemes", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, September 2002, pp 414-421.
- [15] G.D. Marques, "Numerical Simulation Method for the Slip Power Recovery System", IEEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 146, N° 1, January 1999, pp 17-24.
- [16] V. De Oliveira, E. Monmasson, R. Meuret, J. P. Louis, "Steady-state analysis of a doubly-fed induction generator for aircraft application, Electromotion 01, Bologne, juin 2001, Proc. pp. 547-551.
- [17] P.-E. Vidal, "Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation", Actes de JCGE 2003, Saint-Nazaire, 5 et 6 Juin 2003, pp. 177-182.
- [18] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "A Doubly Fed Induction Generator Using Back to Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine", IEE Proceedings on Electrical Power Applications, Vol. 143, N° 5, September 1996, pp. 380-387.
- [19] S. Bhowmik, R. Spée, J. H. R., Enslin, "Performance Optimization for Doubly Fed Wind Power Generation Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, N° 4, July-August 1999, pp. 949-958.

- [20] A.Masmoudi, "Contribution à la commande en tension de la machine doublement alimentée", Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie PARIS VI, 1994.
- [21] F. Poitiers, M. Machmoum, R. Le Doeuff, M.E. Zaim, "Control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion systems", International Journal of Renewable Energy Engineering, Vol. 3, N° 3, December 2001, pp. 373-378.
- [22] M.KAIROUS Djilali "Calcul Analytique du couple et des courants dans une machine Asynchrone auto-exitée Reliée au Réseau ", Thèse magister, ENP, Alger, Octobre 2004.
- [23] J.CHATELIN, "Machines Electriques " ,Dunod 1998 .
- [24] A.ABOU AKAR, "Modélisation des Moteurs Asynchrone Triphasé A cage ", Thèse de Doctorat, université de Claude Bernard-Lyon, France 1991.
- [25] T.KHALIDI, "Retour Réseau sur un Autoamorçage Accidentel de la Machine Asynchrone", Thèse Magister, E .N.P, Alger, juillet 1999.