

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



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN
ELECTROTECHNIQUE

OPTION : MACHINES ELECTRIQUES

THEME

**Modélisation et simulation de la génératrice
asynchrone auto-excitée, application à la
conversion de l'énergie éolienne**

Proposé par :

M^r. HADDAD Salah.

dirigé par :

M^{elle}. BARA Ghania

M^r. HACHEROUF Younes

PROMOTION: 2011/2012

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la volonté, la santé et la patience.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à Mr. HADDAD Salah, professeur au département Electrotechnique, nous a proposé ce sujet, nous a orienté le long de la réalisation de ce mémoire, nous a prodigué les précieux conseils qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude. Nous tenons également à remercier vivement toute personne qui nous a aidé à élaborer et à réaliser ce mémoire, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à accomplir ce travail. Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation, nos sincères remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis pour leur soutien moral et matériel...



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A la mémoire de mes défunts parents qui n'ont cessé de me rappeler qu'on ne peut se fier à la richesse quelle qu'elle soit, seule l'instruction fait exception.

A ma belle mère Hnifa

A mes chères sœurs Nora et Sadia ainsi que leurs familles

A mon cher frère Merzouk et à sa femme Ghania

A mes nièces et à mes neveux : Céline, Yamina, Massinissa et Rayane

A toute ma famille

A tous mes ami(e)s

A toute la promotion d'électrotechnique (2012)

A tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Ghania.

Je dédie ce modeste travail en premier lieu

A mes très chers parents à qui je dois tout

A mes très chères sœurs Rabeaa , Ouzna, Hayet, Samia et Radia

A mes chers frères Karim, Mourad, Kader, Abdallah, et Mohamed Cherif

A mes nièces et à mes neveux : Sadia, notre petit ange Asia, Hamza, Madjid et Yahia.

A tous mes ami(e)s sans exception

A toute la promotion d'électrotechnique (2012)

A tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Younes.

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : généralités sur les systèmes éoliens	
I.1.Introduction.....	04
I.2. Historique et avenir de l'énergie éolienne.....	05
I.3.principe de fonctionnement de l'éolienne.....	06
I.4 Différents types d'éoliennes.....	06
I.4.1.Eoliennes à axe vertical.....	07
I.4.2. Eoliennes à axe horizontal.....	10
I.5.Les principaux composants d'une éolienne.....	11
I.5.1.le moyeu.....	12
I.5.2.les pales ou capteurs d'énergie cinétique du vent.....	12
I.5.3.l'arbre primaire.....	12
I.5.4.le multiplicateur mécanique de vitesse.....	12
I.5.5.Le système de refroidissement.....	12
I.5.6.L'arbre de la génératrice ou l'arbre secondaire.....	13
I.5.7. Les capteurs des caractéristiques du vent ou outils de mesures.....	13
I.5.8.Le système d'orientation de la nacelle.....	13
I.5.9.les composants du système d'orientation des pales	13
I.5.10.La tour ou Mât.....	13
I.5.11.Le générateur électrique	14
I.5.12. La fondation.....	14

I.6. Caractéristique du vent : Aérodynamisme	14
I.6.1.Loi de Betz.....	15
I.6.2.Coefficient de puissance.....	16
I.6.3. Classification des turbines selon leurs puissances et leurs dimensions.....	19
I.6.4 Le système d'orientation des pales.....	19
I.6.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	20
I.7.Conclusion.....	21

Chapitre II : partie électrique

II.1. Introduction.....	22
II.2.les différents types d'éoliennes.....	22
II.2.1.les éoliennes à vitesse fixe.....	22
II.2.2.Les éoliennes à vitesse variable.....	24
II.3. Les machines électriques et les convertisseurs associés les plus utilisés pour la conversion électromécanique.....	25
II.3.1. La génératrice asynchrone à double alimentation(DFIG).....	25
II.3.2.Les machines synchrones.....	26
II.3.2.1. Machine synchrone à rotor bobiné.....	27
II.3.2.2. Machine synchrone à aimants permanents.....	28
A. Structure avec redresseur à diodes.....	28
B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....	29
C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont.....	29

D. Structure avec redresseur MLI.....	30
II.3.2.3 Machines à reluctance variable.....	30
II.3.3.Machine asynchrone à cage à vitesse variable.....	31
II.3.3.1. Machine asynchrone auto-excitée par condensateur fixe.....	32
A. Machine asynchrone auto excitée par un seul condensateur fixe.....	33
B. Machine asynchrone auto excitée par une batterie de condensateurs fixes.....	33
II.3.3.2.Machine asynchrone auto excitée par une batterie de condensateurs fixes avec un système de compensation.....	33
A. Capacité de compensation en série.....	34
B. Batterie de condensateurs commandés.....	34
C. Configuration avec convertisseur unidirectionnel (redresseur à diodes ou mixte)...	35
D. Configuration avec convertisseurs bidirectionnels (convertisseurs à MLI).....	36
II.4.Conclusion.....	37
 Chapitre III : Modélisation de la génératrice auto-excitée	
III.1.Introduction.....	38
III.2.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone auto excitée.....	38
III.3.Modélisation de la machine.....	40
III.3.1.Modèle linéaire.....	40
III.3.2.Modèle saturé.....	46
III.4.Elaboration du modèle de la machine asynchrone pour l'étude en génératrice autonome.....	51
III.4.1.En prenant en considération Lm'	52

III.4.2.En négligeant L_m'	53
III.5.Système d'auto-amorçage.....	55
III.5.1. Auto-amorçage à vide.....	55
III.5.2.Fonctionnement en charge.....	57
III.5.2.1.Charge équilibrée.....	57
III.5.2.2.Charge déséquilibrée.....	58
III.5.Conclusion.....	59
Chapitre IV : Simulation et Interprétation des résultats	
IV.1.Introduction.....	60
IV.2.Identification de l'inductance magnétisante (L_m).....	61
IV.3.Etude de la génératrice asynchrone à cage.....	63
IV.3.1.Fonctionnement à vide.....	63
A. Résultat du modèle linéaire.....	64
B. Résultat du modèle saturé.....	65
IV.3.2.Fonctionnement en charge.....	70
A. Charge équilibrée.....	70
B. Charge déséquilibrée.....	76
IV.4.Conclusion.....	81
Conclusion générale.....	82

Introduction générale

Introduction Générale

L'homme utilise l'énergie sous forme de chaleur, de lumière ou de mouvement. La maîtrise de l'énergie est donc le moteur de l'activité humaine. Ainsi elle est au cœur de l'avenir de notre société. Autant elle fut un facteur de construction et de création de richesse. D'une part, l'évolution démographique de la planète, implique une progression durable des besoins énergétiques. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) et rapproche l'échéance de leur épuisement. Cette situation, ajoutée à la conviction grandissante que le changement climatique d'origine humaine est réel et que les émissions de dioxyde de carbone à effet de serre y contribuent grandement, a suscité un nouvel intérêt dans les sources d'énergie renouvelables sans carbone. Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables (non dégradée), géographiquement diffuse : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres.

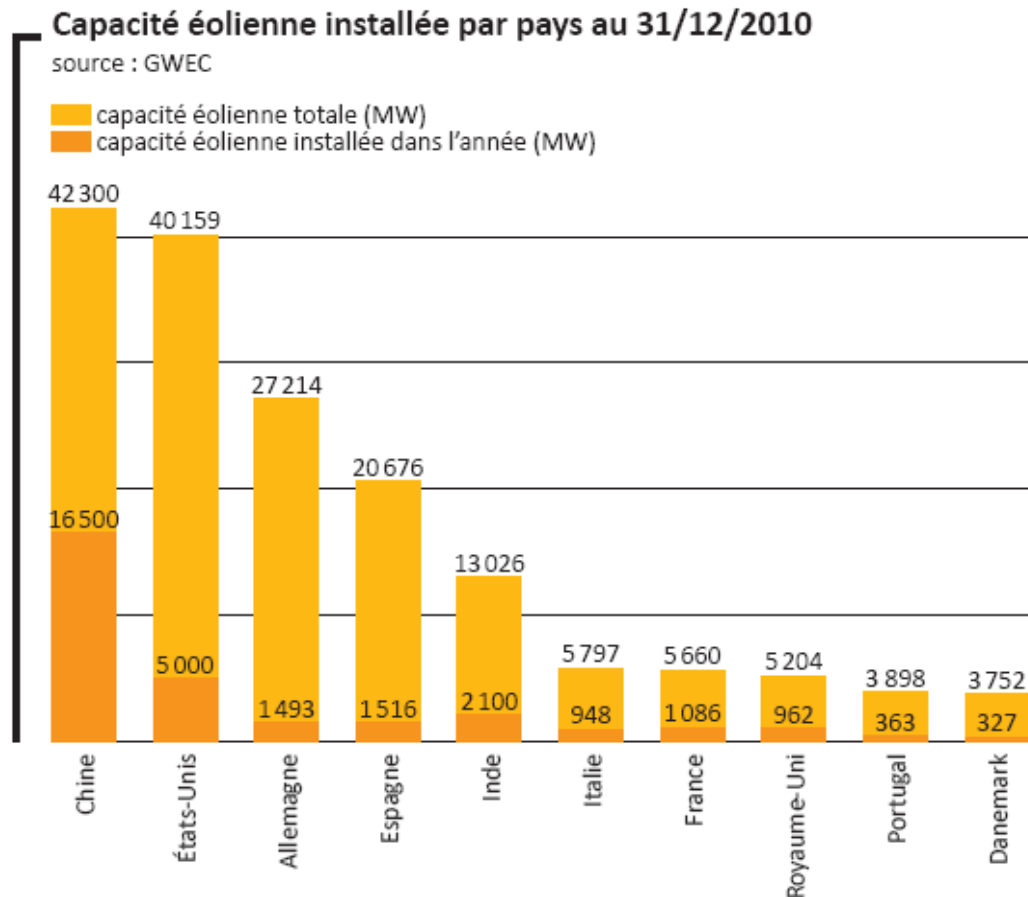
L'énergie éolienne est, parmi les énergies renouvelables, celle qui connaît la croissance la plus rapide au monde. Elle est presque universellement reconnue comme une source d'énergie la plus prometteuse pour produire de l'électricité propre à court et à moyen termes. De plus elle contribue à la préservation de l'environnement. Elle représente 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 dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (offshore) où la présence du vent est plus régulière.

De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. Hormis 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.

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. C'est le cas de la Chine, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 42300 MW,

Introduction générale

les Etats Unis, numéro deux avec 40159 MW et l'Allemagne avec 27214 MW à la fin de l'année 2010. L'histogramme suivant donne le classement des dix premiers pays producteurs de l'énergie éolienne au monde [SER].



Notre travail s'inscrit dans le cadre de l'étude d'un système éolien basé sur le générateur asynchrone à cage d'écureuil.

Nous présentons dans le premier chapitre l'état de l'art sur l'énergie éolienne et sur les différentes chaînes utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne dans les systèmes isolés et autonomes. Nous parlerons ainsi sur l'évolution de cette énergie durant ces dernières décennies en donnant les dernières statistiques de l'utilisation de cette énergie dans le monde. Nous citons ensuite les diverses architectures employées dans le fonctionnement isolé et autonome.

L'aérodynamisme est une étude primordiale afin de faire la liaison entre la partie mécanique est la partie électrique et pour cela nous avons donné des relations théoriques qui expliquent la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Nous concluons ce chapitre en faisant une comparaison entre les différents types d'éoliennes du point de vue puissance.

Introduction générale

La partie électrique dans la conversion de l'énergie éolienne fera l'objet de second chapitre de notre mémoire, nous commençons par décrire les deux grandes familles d'éoliennes (à vitesse fixe et variable), ensuite nous exposons brièvement les différentes machines électriques et convertisseurs associés utilisés pour chaque famille. La machine asynchrone auto-excitée en fonctionnement autonome fait l'objet de notre étude.

Le troisième chapitre porte sur l'étude analytique de la machine asynchrone auto-excitée et nous commençons par expliquer son principe de fonctionnement. L'élaboration du modèle en utilisant la transformation de Park est primordial afin d'étudier les caractéristiques de la machine d'une façon plus simplifiée. Nous utilisons deux modèle (linéaire et non linéaire) pour l'étude de notre machine. Le modèle non linéaire prend en considération la variation de l'inductance magnétisante $L_m(i_m)$ qui traduit la saturation de la machine, l'identification de cette inductance passe par des essais expérimentaux [IDJ].

Par la suite nous nous intéressons dans la dernière partie de ce chapitre, à la modélisation de circuit extérieur de la machine qui prend en considération la charge connectée avec ces deux types (équilibré et déséquilibré).

Enfin le dernier chapitre est consacré à l'utilisation des modèles élaborés dans le troisième chapitre pour construire des programmes en faisant appel au logiciel MATLAB-SIMULINK. La simulation de ces derniers va nous permettre de tracer et interpréter les figures concernant les caractéristiques de la machine à vide et en charge.

La conclusion générale est dédiée à une synthèse du travail présenté et aux perspectives envisagées.

Chapitre I

I.1.Introduction :

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable.

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 des vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées 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. 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. Historique et avenir de l'énergie éolienne :

Pendant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu est le moulin à vent utilisé par le meunier pour la transformation du blé en farine, on peut aussi citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande. Par la suite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non-connectés à un réseau électrique. Des installations sans stockage d'énergie impliquaient que le besoin en énergie et la présence d'énergie éolienne soient simultanés. L'avènement des batteries a permis de stocker cette énergie et ainsi de l'utiliser sans présence de vent. Cependant ce type d'installation ne concernait que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

Depuis les années 1990, l'amélioration technologique des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours.

Fin 2010, 193 GW (milliards de watts) d'éolien sont installés dans le monde. En 2010, la Chine a investi 63 milliards de dollars dans l'éolien et les Etats-Unis 18 milliards de dollars. La croissance des investissements dans l'éolien a été de 34 % en 2010. Quand à la puissance, elle a augmenté de 22 % en 2010 (soit 35,8 GW). Les pays qui s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service de champs d'éoliennes qui n'existaient pas auparavant). De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les Etats par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont la Chine et les pays occidentaux (Amérique et Europe). D'autres puissances économiques émergentes, comme le Brésil, l'Inde et le Mexique commencent à investir lourdement dans l'énergie éolienne. En 2007, l'Allemagne disposait de 22.3 GW de puissance éolienne installée, les Etats-Unis 16.8 GW, l'Espagne 15.1 GW, l'Inde 8 GW, la Chine 6.1 GW et la France 2.4 GW (uniquement à terre). En 2008, les Etats Unis étaient devenus le premier pays pour la capacité d'énergie éolienne avec 25170 MW installés, devant l'Allemagne (23902 MW). Ce secteur employait en 2008 environ 85000 Américains.

En 2010 la Chine détrône les Etats-Unis avec 42 GW (soit plus que 60 % de la puissance du parc nucléaire français) de puissance installée contre 40 GW pour les Américains.

De son côté, l'Afrique bénéficie d'un vaste potentiel pour le développement de l'énergie éolienne, surtout dans le Nord, le long des côtes et en Afrique du Sud. À la fin de l'année 2009, environ 96 % des installations éoliennes du continent (763 MW) se trouvaient en Egypte (430 MW), au Maroc (253 MW) et en Tunisie (54 MW). En Afrique du Sud, 7000 MW sont actuellement en développement [EgE].

I.3.Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Un aérogénérateur, couramment appelé « éolienne » capte l'énergie cinétique du vent et la transforme en énergie mécanique par l'intermédiaire des pales, puis le générateur la convertit en énergie électrique.

Un système d'électronique de puissance placé directement après le générateur rend cette énergie accessible au réseau, un transformateur élève la tension de sortie afin de la transporter aux lieux de consommation.

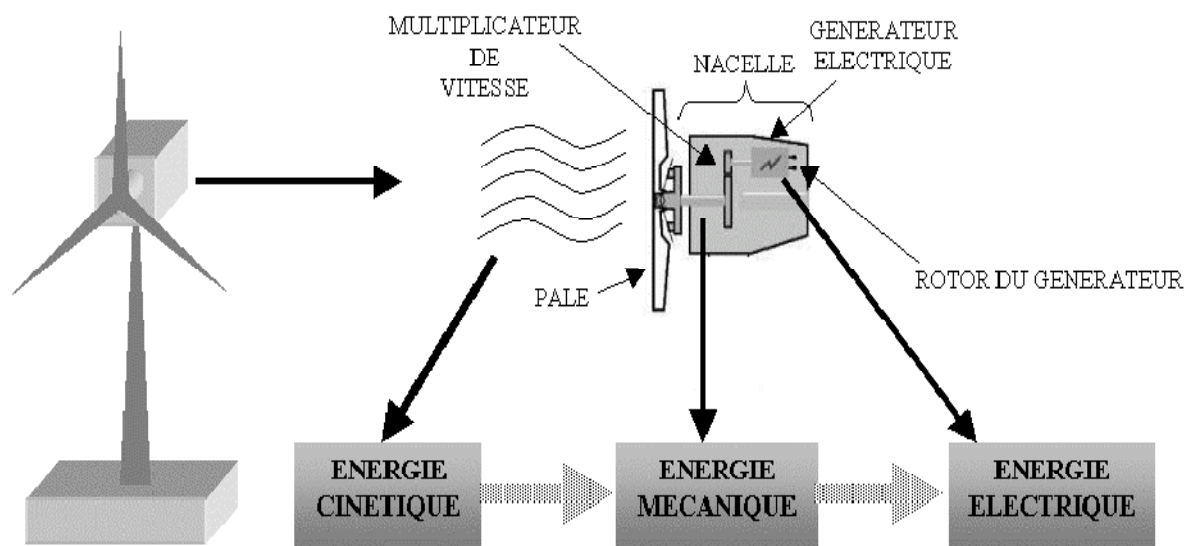


Figure. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.4.Différents types d'éoliennes:

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

I.4.1. Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. Il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir dans toutes les directions sans avoir à orienter le rotor, cependant elles ne peuvent pas démarrer automatiquement, il faut les lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production [Boy].

Elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances et les câbles des haubans doivent passer au dessus des pales cela présente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole. La conception verticale impose que les éoliennes fonctionnent avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur, et en raison de leur petite taille l'énergie produite reste faible. Cette faible efficacité de la conversion d'énergie a limité le développement de ces éoliennes, laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal [Yac].

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

➤ **Eolienne a axe vertical de type Savonius :**

C'est un ingénieur finlandais qui l'a breveté à la fin des années 1920, le principe de fonctionnement de ce type d'éolienne est la trainé différentielle entre les aubes constitués de parties cylindriques en opposition. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (**Figure I-2**). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique [Mekk], [Yac], [EgE].

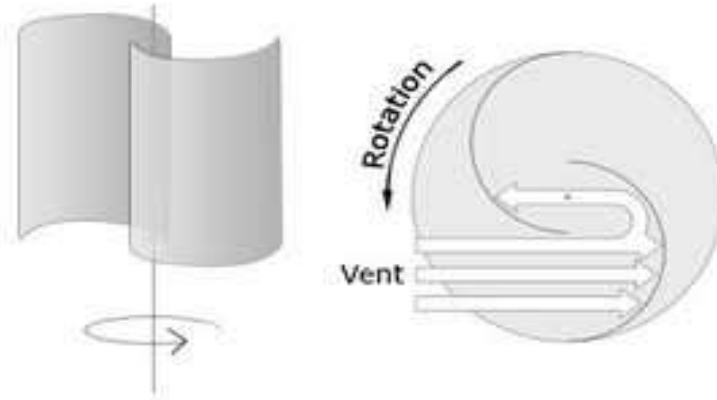


Figure I-2 Effet du vent sur un corps creux

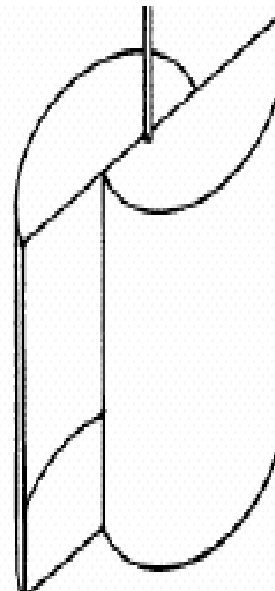


Figure I-3 Le rotor de Savonius.

➤ **Eolienne à axe vertical de type Darrieus :**

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur faisant tourner le dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent, cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même

lorsqu'elle est à l'arrêt. L'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Georges Darrieus. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique ou parabolique. (Figure I-4).



Figure I-4: éolienne de Darrieus

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol et ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant ainsi de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine. En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable, ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commercialisées sont à axe horizontale [Mekk], [EgE].

I.4.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales [Idj].

Toutefois, les structures les plus courantes sont les rotors à trois pales car ils constituent un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mât dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion [Lam]. La portance de ces ailes placées dans le vent sert à générer un couple moteur entraînant la rotation. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent [IDJ]. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol (**Figure I-5**) [Poi].

Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6MW.

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront aux cas des éoliennes à axe horizontal.



Figure 1-5 : éolienne à axe horizontal

Avantages :

- ✓ Coût limité,
- ✓ Peu de contraintes mécaniques,
- ✓ Grande efficacité.

Inconvénients :

- ✓ Bruit conséquent,
- ✓ Vibration non négligeables,
- ✓ Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

I.5. Principaux composants d'une éolienne :

La figure suivante donne un aperçu des différents composants d'une éolienne, dans ce qui suit nous les décrirons brièvement :

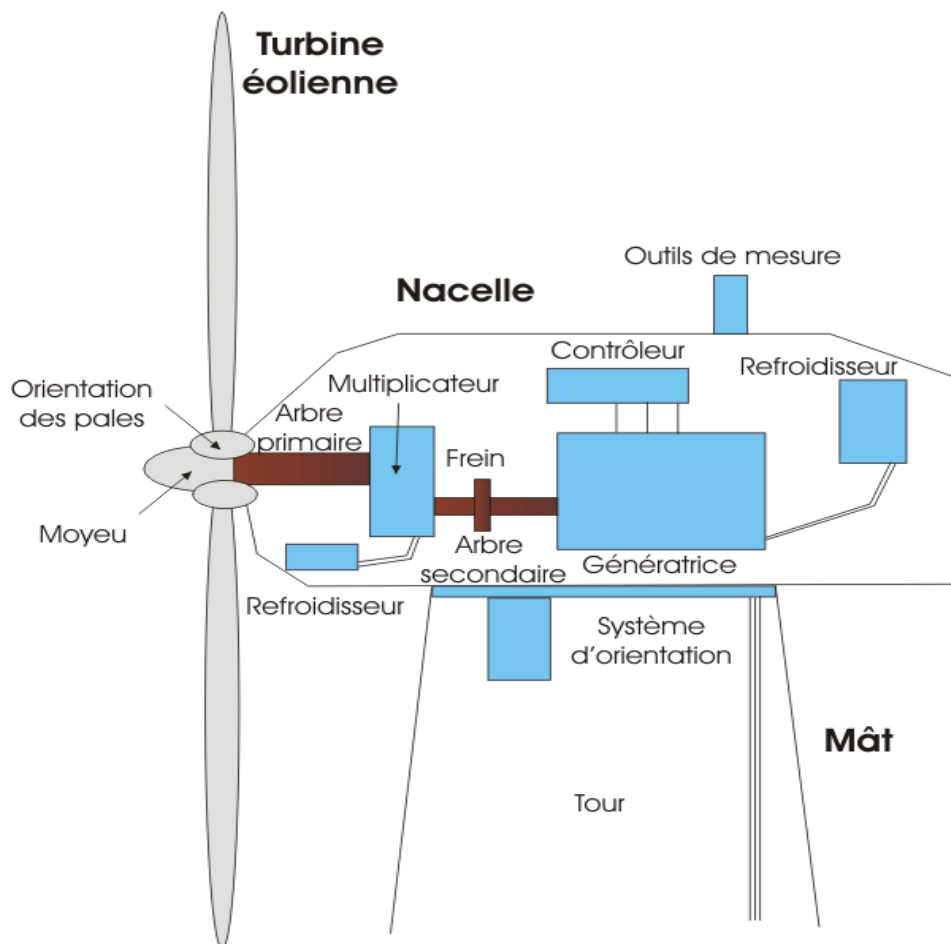


Figure I.6 : les différents composants d'une éolienne

I.5.1. 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 des brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

I.5.2. Les pales ou capteurs d'énergie cinétique du vent :

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.

Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations et le bruit.

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

I.5.3. L'arbre primaire :

C'est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre 20 et 40 tr/min, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur mécanique de vitesse.

I.5.4. Le multiplicateur mécanique de vitesse :

Il adapte la vitesse de rotation de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. 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. La présence de ce multiplicateur engendre des problèmes de vibration, de bruit et de coût de maintenance.

I.5.5. Le système de refroidissement :

Un bon système de refroidissement représente un atout pour un rendement meilleur d'une machine, car si une machine doit fonctionner à une puissance donnée, le système de refroidissement doit pouvoir évacuer la chaleur qu'elle dégage. Une étude thermique est

nécessaire pour dimensionner le système de refroidissement et établir les limites de fonctionnement.

Un système de refroidissement dans une éolienne comprend généralement un ventilateur électrique et un radiateur d'eau ou d'huile destiné au refroidissement du multiplicateur.

I.5.6. L'arbre de la génératrice ou arbre secondaire :

C'est l'arbre du rotor de la génératrice. Il est muni d'un frein à disque mécanique (dispositif de sécurité) qui limite la vitesse de rotation en cas de vent violent.

I.5.7. Les capteurs des caractéristiques du vent ou outils de mesure:

L'éolienne est généralement équipée de deux capteurs qui sont :

- La girouette : détermine la direction du vent et informe le système de commande de l'éolienne afin de placer la nacelle face au vent.
- L'anémomètre : mesure en temps réel la vitesse du vent et envoie un signal au système de contrôle pour régler l'angle de calage des pales selon la vitesse voulue. Pour des raisons de protection, le système de commande arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s.

I.5.8. Le système d'orientation de la nacelle :

Le système d'orientation de la nacelle est constitué d'une couronne dentée équipée d'un moteur. Il permet d'orienter l'éolienne dans l'axe du vent et de la bloquer grâce à un frein, dans sa position.

I.5.9. Les composants du système d'orientation des pales :

Ce système est composé d'un ou plusieurs moteurs électriques placés dans le moyeu, ces moteurs sont commandés selon la vitesse du vent indiquée par l'anémomètre (on trouvera plus d'explication sur les différents systèmes d'orientation dans le paragraphe **I.6.4**).

I.5.10. La tour ou Mât :

La tour (pylône) supporte la nacelle et le rotor de l'éolienne (**Figure I.7**). Il se présente sous forme d'un tronc en cône et renferme une échelle et des câbles qui assurent la liaison électrique. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition souhaitée au vent. En effet, plus le mât est haut,

plus la vitesse du vent, et donc la puissance captée, augmentent mais cela s'accompagne également de l'accroissement du coût de la structure [Idj]. Le mât est de conception différente selon les dimensions de l'éolienne et selon l'impact souhaité sur le paysage.



Figure I.7 : le mât

I.5.11. Le générateur électrique :

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 génératrices: synchrone ou asynchrone. Dans le deuxième chapitre nous développerons plus en détail les caractéristiques et les performances de la génératrice asynchrone.

I.5.12. La fondation :

Pour empêcher l'éolienne de basculer par les vents violents, des études géotechniques permettent de placer les éoliennes dans des endroits à terre solide. De plus, la construction d'une base blindée est nécessaire pour éviter toute secousse pouvant perturber le fonctionnement de l'éolienne.

I.6. Caractéristiques du vent : aérodynamisme

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent varie selon les saisons et les zones géographiques, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au

niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s.

I.6.1. Loi de Betz :

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air m , qui se déplace avec la vitesse V , l'énergie cinétique E_c de cette masse est [Cou]:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (\text{I.1})$$

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (**Figure 1-8**), 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 la surface balayée par les pales est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé avant cette surface V_1 et la vitesse du vent après cette surface V_2 soit: ———

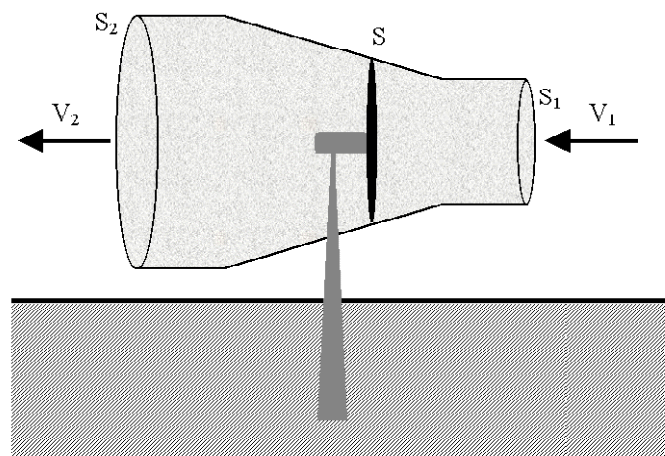


Figure 1-8 : Tube de courant autour d'une éolienne

La masse d'air en mouvement de densité (ρ) traversant la surface S des pales en une seconde est: [Cou], [Sak]

$$m = \frac{(\quad)}{\quad} \quad (I.2)$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S, située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait alors [Poi] :

$$P = \frac{(\quad)}{\quad} \quad (I.3)$$

En remplaçant m par son expression (I.2), on obtient :

$$P = \frac{(\quad)(\quad)}{\quad} \quad (I.4)$$

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

$$P = -\rho S V_1^3 \quad (I.5)$$

Avec :

$\rho = 1,225 \text{ kg.m}^{-3}$: Densité volumique de l'air.

P : Puissance théorique incidente sur le rotor

Autrement dit, les deux puissances P_m et P_t représentent respectivement la puissance réelle et la puissance théorique récupérée par l'hélice.

I.6.2. Coefficient de puissance :

Le rapport de la puissance extraite du vent sur la puissance totale théoriquement disponible est appelé coefficient de puissance.

$$C_p = \frac{P_m}{P_t}$$

La plupart des études réalisées montre que la majorité des éoliennes ont un coefficient de puissance qui ne dépasse pas la valeur de 0.59, c'est-à-dire que théoriquement l'éolienne ne peut recueillir que 59% de l'énergie du vent

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ ($\lambda = R \cdot \Omega / V$) :

$$C = C(\lambda)$$

Avec :

Ω : vitesse de rotation de l'éolienne.

V : vitesse du vent.

R : rayon de l'aérogénérateur.

La (**Figure I.9**) montre l'évolution de C en fonction de λ

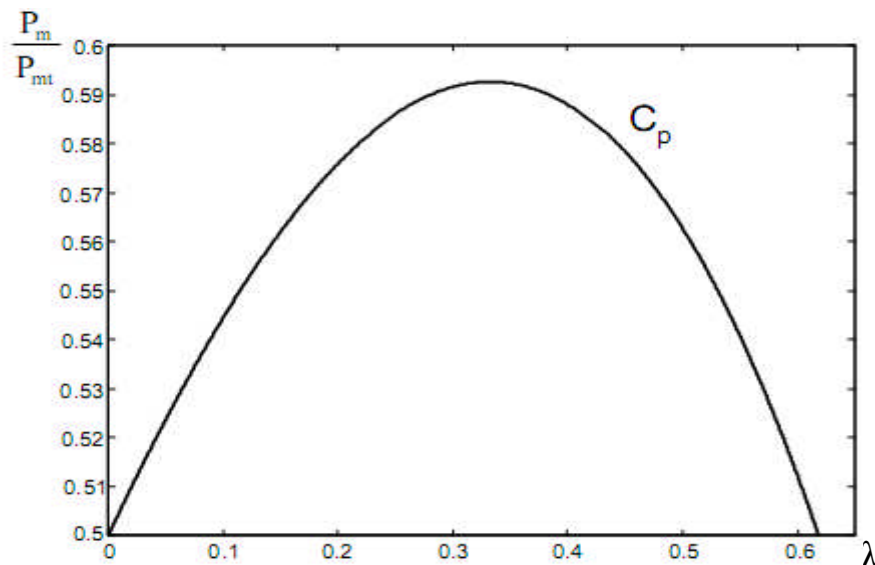


Figure 1-9 : Coefficient de puissance

De là on peut déduire la valeur max du coefficient pour une valeur optimale de la vitesse spécifique. Pour des valeurs différentes de λ on peut classer les éoliennes en deux catégories :

➤ **les éoliennes lentes :**

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 (**Figure I-10**) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

➤ **les éoliennes rapides :**

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et sont pratiquement toutes dédiées à la production de l'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 (**Figure I-10**) 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 [Poi].

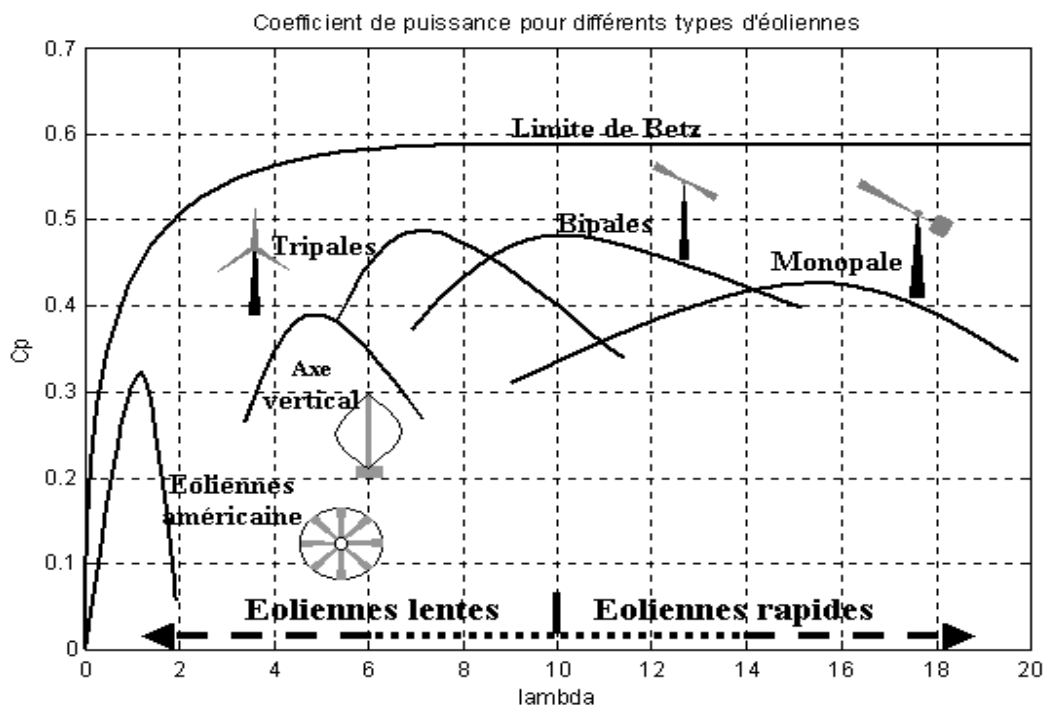


Figure 1-10 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

I.6.3. Classification des turbines selon leurs puissances et leurs dimensions

Une éolienne à diamètre petit extrait une énergie petite du vent, mais elle est moins exposée au danger des vents violents. Contrairement une éolienne à grand diamètre peut extraire une énergie importante du vent, mais les pales vue leur longueur, sont exposées aux dangers des vents violents. Une vrille mécanique dans la construction des pales permet de les protéger, c'est à dire que la surface qui sera exposée au bout de la pale est moins petite que celle exposée au bas de la pale.

La figure ci-dessous présente une classification des turbines éoliennes selon leur puissance délivrée :

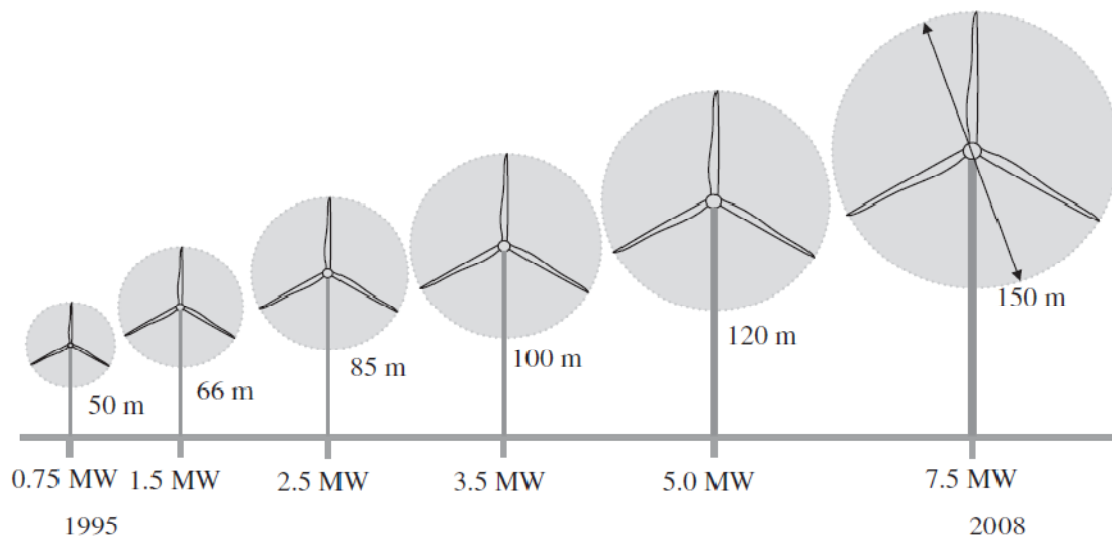


Figure I-11 : Evolution des turbines éoliennes selon leurs dimensions

I.6.4 Le système d'orientation des pales

➤ Système à décrochage aérodynamique "stall"

Le comportement aérodynamique des pales évolue également d'une manière passive selon le rapport entre la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse du vent. En effet les pales peuvent être conçues de façon à ce qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, la turbulence provoquée par le profil des pales entraîne un décrochage aérodynamique et par suite une décroissance du couple capté par chacune des pales. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales. Les pales sont fabriquées avec un pas variant suivant la position le long de la pale, permettant ainsi le décrochage aérodynamique qui se produit progressivement d'abord près du rayon du moyeu puis de plus en plus près du bout de la pale [Mekk], [Poi].

Ce genre de contrôle passif de la puissance captée par les pales est appelé (stall-régulation) ou (régulation par décrochage aérodynamique).

En 2000, environ 60% des aérogénérateurs utilisaient la régulation «stall», mais les grandes machines d'aujourd'hui utilisent presque en exclusivité le contrôle «pitch» [Mekk].

➤ Système d'orientation "pitch"

Ce système de régulation par variation de l'angle de calage « β » permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses (**figure I.12**). C'est la régulation par mise en drapeaux, soit augmenter l'angle de calage, ce qui diminue l'angle d'incidence. Ce système permet également de freiner la turbine si nécessaire [Mekk].

I.6.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n (**Figure I.12**). Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mât et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnant : V_D la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_M la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [Mekk], [Abd].

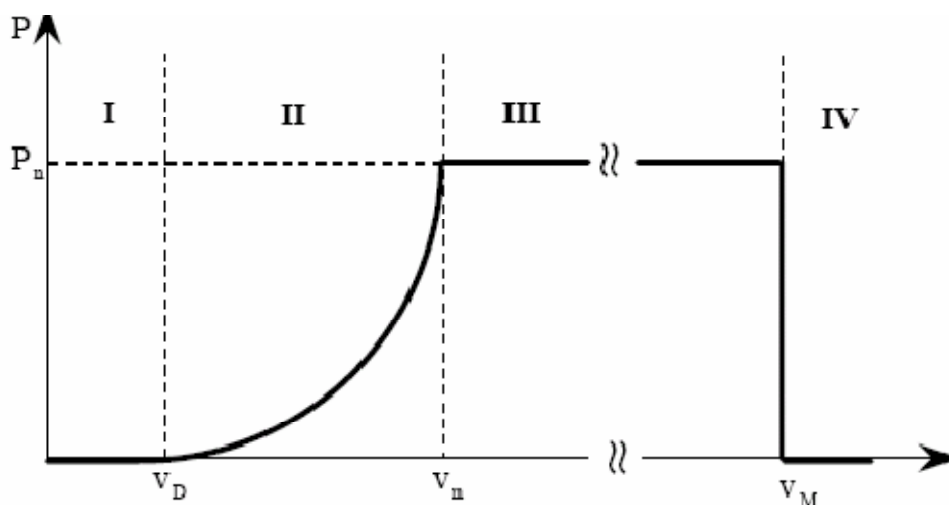


Figure I.12 : Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne

Les vitesses V_D , V_n et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- la zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas),
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V ,
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n .
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

Il existe deux techniques principales pour cette régulation de puissance : le calage variable (les pales peuvent pivoter autour de leur axe longitudinal afin de réduire la portance et donc le couple moteur) et le décrochage aérodynamique (la conception des pales induit ce phénomène qui limite l'action du vent quand la vitesse de celui-ci dépasse sa valeur nominale).

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue générale sur les systèmes éoliens en définissant leur principe de fonctionnement ainsi que leurs principaux composants. Les éoliennes sont classées selon ces deux catégories : à axe vertical ou à axe horizontal. Nous avons cité les différentes caractéristiques de chacune d'elles. Nous avons terminé ce chapitre par une étude aérodynamique en classant les différents types d'éoliennes selon leur coefficient de puissance.

L'étude du système éolien se divise en deux parties, nous venons de voir la partie mécanique, dans ce qui suit nous nous intéresserons à la partie électrique. Nous parlerons des différents générateurs électriques et des convertisseurs qui leurs sont associés.

Chapitre II

II.1.Introduction

Le choix des systèmes électriques insérés dans les éoliennes se base sur plusieurs caractéristiques. L'aspect économique en fonction du rendement d'une éolienne est le principal caractère pris en considération dans la réalisation des parcs éoliens. Les entreprises travaillant dans ce domaine, ne voient pas intéressant d'utiliser : ni des systèmes électriques peu coûteux et produisant peu d'électricité, ni d'autres trop coûteux qui produisant plus d'électricité. Le plus intéressant est d'utiliser des systèmes moins chers qui produisent des puissances électriques satisfaisantes.

Nous commençons ce chapitre par la présentation des éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable, ensuite nous allons étudier les différents systèmes électriques utilisés en citant les avantages et les inconvénients de chacun.

II.2. Les différents types d'éoliennes

Selon la vitesse recueillie à l'arbre secondaire d'une éolienne on peut recenser aujourd'hui deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil auto-excité (**SEIG**) et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone double alimentation (**MADA** ou **DFIG**) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (**MSAP**).

La différence réside dans la présence ou non d'un régulateur de vitesse (réglage par orientation aérodynamique des pales).

II.2.1. Les éolienne à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par le système d'orientation des pales (pitch control). Généralement ces éoliennes reposent sur l'utilisation des génératrices asynchrones à cage directement relié à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50HZ). Pour assurer un fonctionnement en mode générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la machine asynchrone soit au delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales est constitué de machines commandables équipées de régulateurs qui reçoivent leurs consignes d'un anémomètre afin de maintenir la vitesse de rotation de la machine constante.

Cette solution bénéficie des avantages de la simplicité de la connexion et de la robustesse de la machine asynchrone.

Toutefois, la machine asynchrone à cage nécessite de l'énergie réactive pour assurer sa magnétisation, pour cela il est nécessaire d'ajouter un banc de capacités d'où son nom auto-excité comme le montre la **Figure (II.1)**.

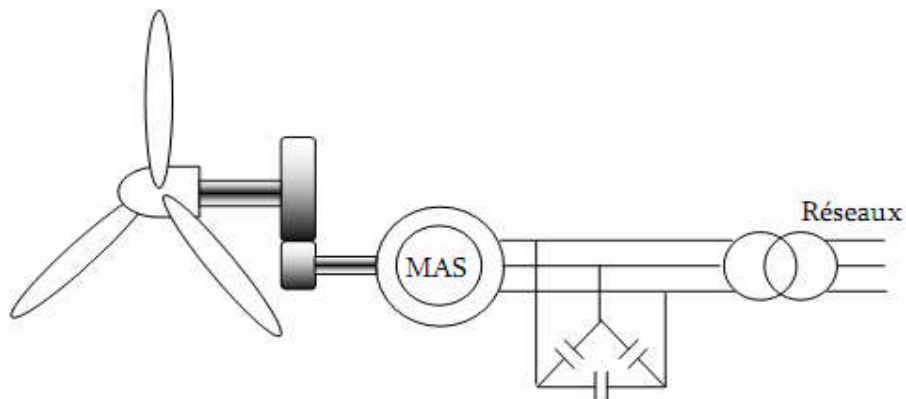


Figure II.1: système éolien basé sur une MAS à cage à vitesse fixe

Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des machines asynchrones à cage d'écureuil peuvent se résumer alors dans les points suivants : [Idj], [Dav]

- Système électrique simple
- Grande fiabilité
- Prix modéré

Leurs inconvénients majeurs sont :

- Ce type d'éolienne n'offrent quasiment pas la possibilité de réglage de la puissance générée.
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : la connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'adjonction de bancs de capacités afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

II.2.2. Les éoliennes à vitesse variable

Les deux inconvénients majeurs de la machine asynchrone à cage peuvent être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des courants statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur connecté par l'intermédiaire d'un étage à tension continue). Voir la **Figure (II.2)**.

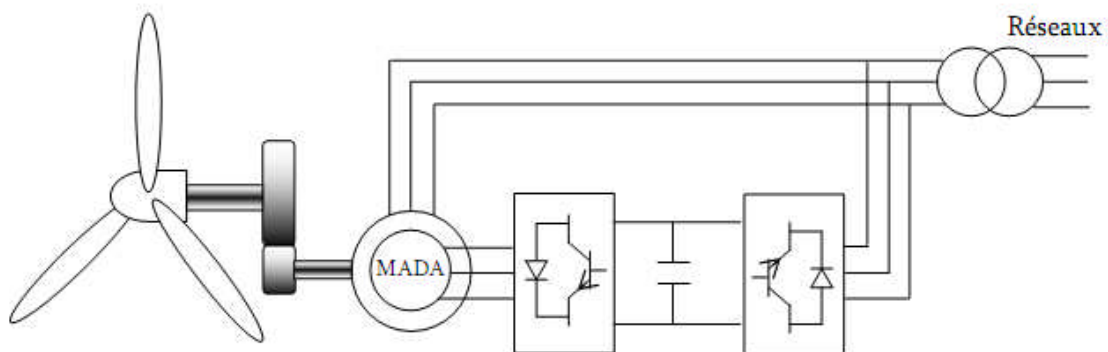


Figure II.2 : système éolien à vitesse variable

Les avantages de cette configuration sont les suivants :

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subits par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques, on peut même se dispenser du système d'orientation des pales.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

L'utilisation des convertisseurs de puissance (complexe) demeure son principal inconvénient.

Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement des génératrices asynchrones à cage, les aérogénérateurs à vitesse variable peuvent mettre en œuvre d'autres convertisseurs électromécaniques.

Dans ce qui suit nous exposons brièvement les quelques structures les plus utilisées dans ce mode de fonctionnement connecté au réseau électrique.

II.3. Les machines électriques et les convertisseurs associés les plus utilisés pour la conversion électromécanique

Un système de conversion performant dépend principalement des dispositifs d'électronique de puissance associés au générateur, dans ce qui suit nous citons brièvement les générateurs et les systèmes associés les plus utilisés.

II.3.1. La génératrice asynchrone à double alimentation (DFIG)

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse [Boy], [Ben].

Une des solutions très intéressante dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau électrique à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un fonctionnant en mode redresseur, l'autre en mode onduleur comme le présente la (**Figure II. 3**).

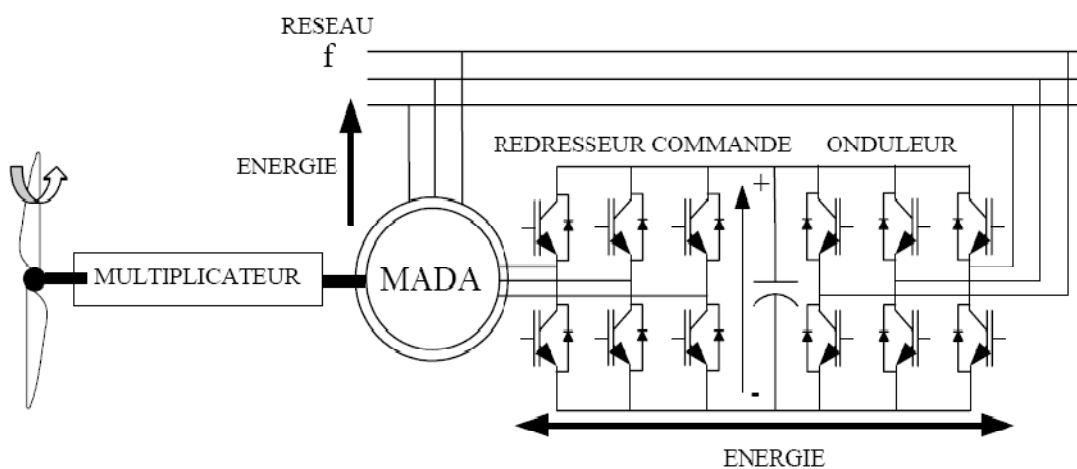


Figure II.3 Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à vitesse Variable

Le surcout engendré par la présence de bobinages au rotor est compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur. En général, le dimensionnement de la chaîne se limite à 30% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse. (C.à.d. que le convertisseur ne peut régler ni la puissance ni la vitesse au delà de 30% de la valeur nominale).

C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau.

II.3.2. Les Machines synchrones

Les machines asynchrones sont bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple limité, insuffisant pour un couplage mécanique directe sur les voilures éoliennes. La présence d'un multiplicateur de vitesse est donc indispensable. En revanche, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles). Dans ce cas leur fonctionnement est nécessairement à vitesse variable et la fréquence des grandeurs statoriques est alors incompatible avec celle du réseau. L'utilisation de convertisseurs statiques s'impose naturellement.

Les éoliennes basées sur une génératrice synchrone à rotor bobiné sont intéressantes dans la mesure où le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utilisé pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit contrôlé au niveau de l'onduleur souvent à MLI. Toutefois, elles requièrent un système de bagues et de balais qui nécessite un entretien régulier, par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles.

Le développement des aimants permanents en terre rares permet de s'affranchir de ces inconvénients et de construire des machines synchrones à des coûts compétitifs, avec plusieurs pôles développant des couples mécaniques considérables.

Comme dans les cas des machines asynchrones à cage, l'interface entre la génératrice et le réseau est généralement constitué d'un redresseur et d'un onduleur, de plus, le redresseur peut-être commandé ou non commandé (à diodes).

La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleur à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre au mode onduleur (et alimenter aussi le rotor avec une interface de pont de diodes et filtre s'il s'agit d'un rotor bobiné), voir **Figure (II .4)**. Dans ce cas, l'interface avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tant dis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et celui du réseau.

Toutes fois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration.

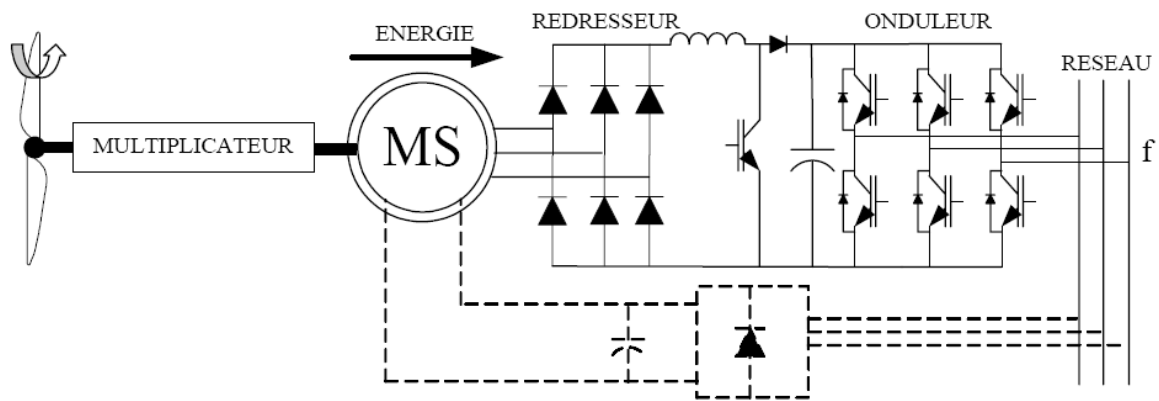
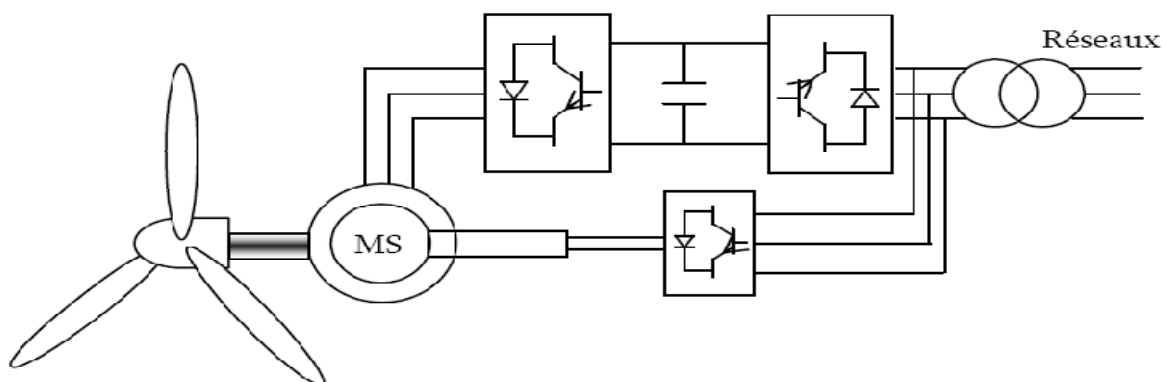


Figure (II.4) Machine synchrone reliée au réseau à travers deux convertisseurs

Enfin, des structures, interposant un hacheur entre le redresseur et l'onduleur sont également utilisées. La présence d'un hacheur permet alors un contrôle indirect de la puissance transitée autorisant ainsi un fonctionnement en commande à poursuite du point de puissance maximale (maximale power point Tracking 'MPPT') [Idj].

II.3.2.1. Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante, voir la **Figure (II.5)**.



Figure(II.5) éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à rotor bobiné

II.3.2.2. Machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages cités précédemment (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation **Figure(II.6)**.

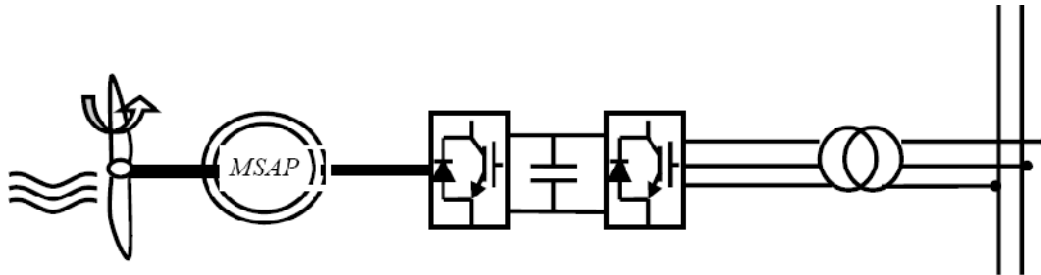


Figure (II.6) : système éolien basé sur la machine synchrone à aimant permanent

Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent. Nous allons en donner une présentation succincte ci-dessous.

A. Structure avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et on trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la **Figure (II.7)**. Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée [Idj].

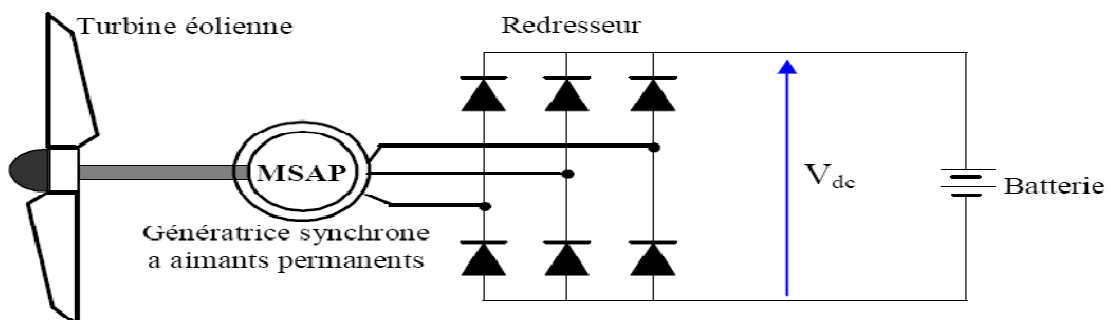


Figure II.7 : machine synchrone avec redresseur à diodes.

B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes **Figure (II.8)** [Idj].

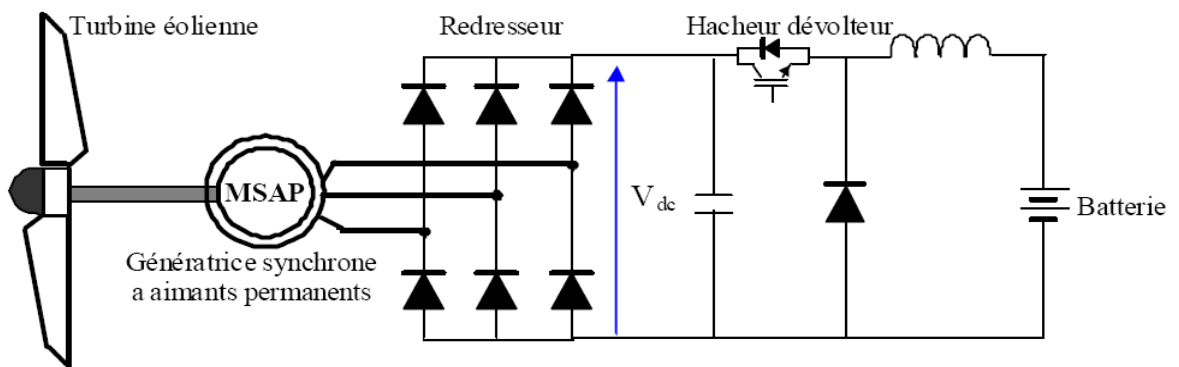


Figure II.8 : machine synchrone connecté à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur

C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0.5 en commandant les deux interrupteurs T_1 et T_2 . Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées (**Figure (II.9)**) [Idj].

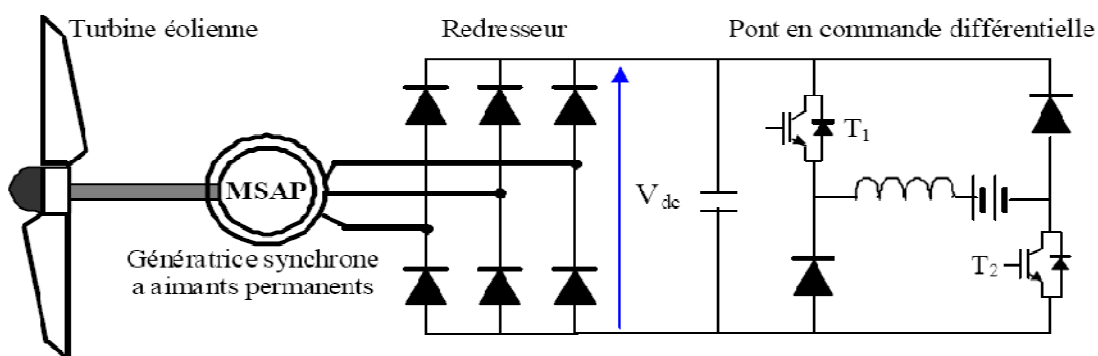


Figure II.9 Machine synchrone avec redresseur à diodes et hacheur en pont.

D. Structure avec redresseur MLI

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le montage de la **Figure (II.10)**, il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse où en couple de la génératrice synchrone, ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation.

Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interruptions, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position (**Figure (II.10)**) [Idj].

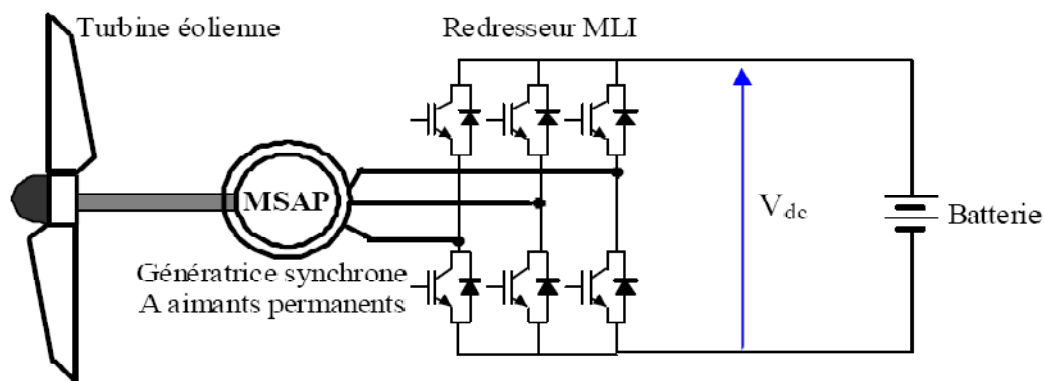


Figure II.10 Machine synchrone connecté à un redresseur MLI

II.3.2.3 Machines à réductance variable

Quelques travaux ont également concerné l'utilisation de la machine synchrone à réductance variable pour des applications en conversion d'énergie éolienne. Cette structure est à rotor saillant et peut être munie d'une cage d'écureuil qui permet d'assurer le démarrage direct sur le réseau et d'améliorer la stabilité de fonctionnement au synchronisme. Comme la machine asynchrone, cette structure absorbe de la puissance réactive pour sa magnétisation et dans sa version classique, son facteur de puissance est relativement faible qui limite son domaine d'application à quelques dizaines de kilowatts. Néanmoins, la cage d'amortisseurs n'étant pas obligatoire, son coût de fabrication peut être très attractif dans une utilisation en éolienne autonome.

Le fonctionnement générateur de cette structure est très proche de celui d'une machine asynchrone à cage. Par conséquent, elle peut être utilisée en autonome débitant sur un banc de capacités en parallèle à la charge (**Figure (II.11)**) ou encore sur un redresseur à MLI [Idj].

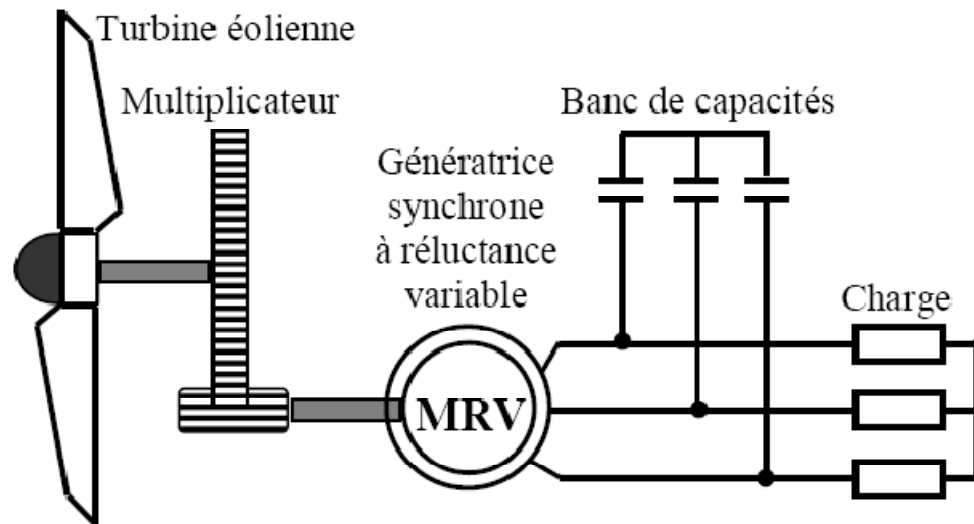


Figure II.11 Machine à reluctance variable.

II.3.3. Machine asynchrone à cage à vitesse variable

La machine asynchrone à cage peut être utilisée en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence comme montré sur la **Figure (II.12)**.

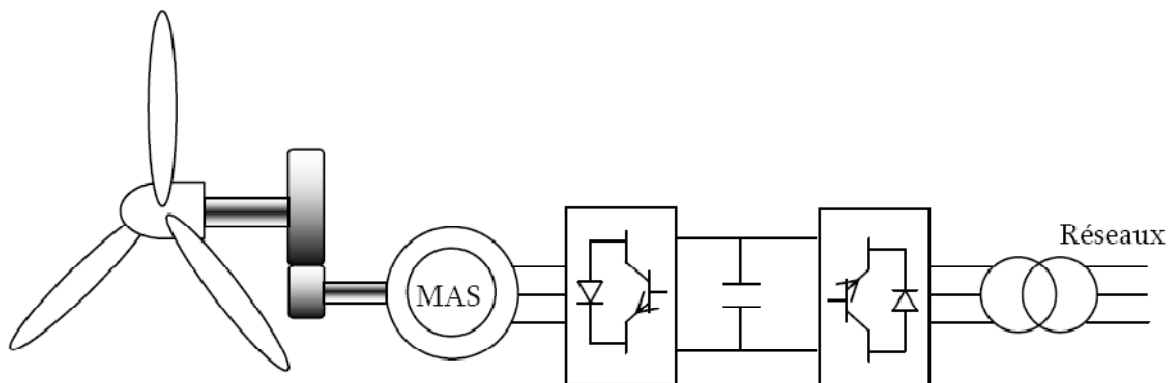


Figure II.12. Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable

Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable, sans limite physique théorique, mais il est globalement coûteux. En effet, le dimensionnement du variateur de fréquence doit être à 100% de la puissance nominale du stator de la machine électrique. Pour ces raisons, cette configuration est rarement exploitée car elle n'est pas concurrentielle avec les autres types de machines et notamment la machine asynchrone à double alimentation.

Maintenant si on s'intéresse à la conversion de l'énergie éolienne dans les sites isolés et autonomes la machine asynchrone à cage d'écureuil auto-excité reste sans conteste celle qui est la plus largement répandue et ce pour des raisons de robustesse et de prix. En effet, cette

structure est démunie de contact électrique par balais-collecteurs et d'aimants permanents ce qui lui confère une robustesse et une longévité sans égal et également un coût d'achat et d'entretien bien inférieur à celui d'un alternateur d'une même puissance. Enfin, elle est très tolérante à des régimes extrêmes de fonctionnement (survitesse, surcharge...etc) [Idj], [Dje].

Le revers de la médaille est constitué d'une tension dont l'amplitude et la fréquence en fonctionnement autonome, sont très sensibles aux variations de vitesses et de charges. Par ailleurs, comme mentionné précédemment, la génératrice asynchrone fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation, ce qui constitue son principal inconvénient. Afin d'éliminer ce dernier vis-à-vis de la machine synchrone, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature. Dans ce qui suit, nous donnons une synthèse de quelques systèmes permettant de fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la génératrice asynchrone et de stabiliser sa tension statorique.

II.3.3.1. Machine asynchrone auto-excitée par condensateur fixe

L'utilisation de la machine asynchrone à cage connectée à des capacités a l'avantage de la simplicité de mise en œuvre et du faible coût dû à l'absence de convertisseurs statiques. Cependant, cette configuration admet des limites de fonctionnement qu'il faut prendre en compte, notamment les variations de l'amplitude et de la fréquence des tensions lors des variations de charge et de vitesse. Par ailleurs, il faut prendre des précautions et éviter de surcharger la machine au risque de la démagnétiser. Cela nécessiterait alors une intervention externe ou une phase de fonctionnement spécifique afin de la remagnétiser.

Il existe plusieurs configurations dans la littérature pour connecter les capacités aux bornes de la machine. Une de ces dernières consiste à utiliser une seule capacité, généralement lorsqu'on alimente des charges monophasées. Dans ce cas, une seule capacité est suffisante pour que la génératrice puisse fournir la puissance nécessaire à la charge, ce qui permet de réduire le coût total du système. Cependant, en cas de défaut dans la phase où le condensateur est connecté, ou encore dans le condensateur lui-même, la machine se démagnétise vu l'absence d'une autre source d'énergie réactive. Par ailleurs, cette configuration induit forcément des courants statorique déséquilibrés.

Une autre solution consiste à utiliser un banc de capacités constitué de trois condensateurs connectés soit en étoile ou en triangle aux bornes de la génératrice. Cela permet d'assurer plus de sûreté de fonctionnement pour le système de production d'énergie éolienne, que la charge soit monophasée ou triphasée. En cas de défaut dans une phase ou dans un condensateur, le système peut fonctionner mais il y aura une chute de tension due à la diminution de la magnétisation de la génératrice. Cette configuration peut aussi induire des

courants statoriques déséquilibrés dans le cas de l'alimentation d'une charge monophasée ou d'une charge triphasée déséquilibrée. Dans ce qui suit, on décrit les différentes configurations [Idj].

A. Machine asynchrone auto excitée par un seul condensateur fixe :

Des travaux ont été effectués dans le cas où la génératrice asynchrone est auto-amorcée par une seule capacité d'excitation. Le bobinage de la machine étant connecté en étoile ou en triangle.

Dans le cas où la machine est connectée en étoile, la capacité d'excitation peut être branchée entre une phase et le neutre comme elle peut être branchée entre deux phases.

B. Machine asynchrone auto excitée par une batterie de condensateurs fixes :

Dans cette configuration, les bobinages statoriques de la machine asynchrone sont connectés à un banc de capacités en parallèle à la charge.

II.3.3.2. Machine asynchrone auto excitée par une batterie de condensateurs fixes avec un système de compensation

L'utilisation d'un banc de capacités fixe (**Figure II.13**) ne permet pas de maîtriser le flux de puissance réactive et par conséquent maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension délivrée constante lors de variation de charge ou de vitesse du vent. Pour surmonter cet inconvénient, tout en gardant un banc de capacités d'auto excitation, plusieurs solutions ont été envisagées.

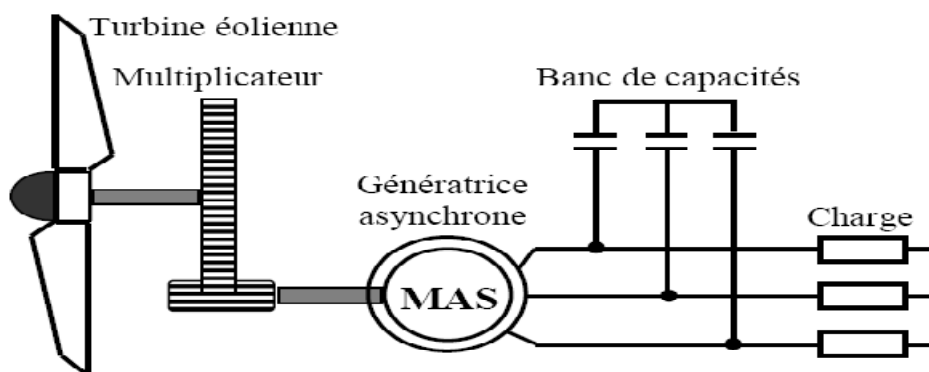


Figure II.13 : machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs.

A. Capacité de compensation en série

La structure la plus couramment utilisée consiste à connecter, en plus des capacités parallèles, d'autres capacités en série avec la charge ou avec le stator de la machine (dénommée en anglais « short-shunt connexion »). Cette approche permet de diminuer la chute de tension en charge mais elle limite les possibilités d'une régulation continue de la tension sur une large gamme de charges et/ou de vitesse. La **Figure (II.14)** présente la machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs et une compensation où les capacités sont en série avec la charge.

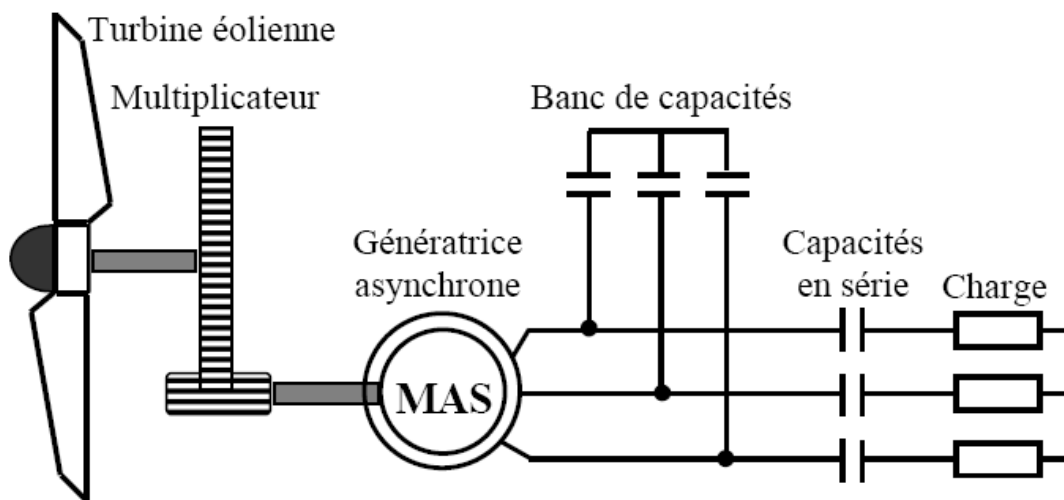


Figure II.14 : machine asynchrone auto-excitée avec compensation en série

B. Batterie de condensateurs commandés

Une autre solution, basée sur le concept de contrôle continu de la capacité d'excitation, a été proposée. Il s'agit d'un dispositif constitué de capacités fixes en parallèle avec des interruptions GTO (Gate Thyristor Off) montés en antiparallèle (en tête bêche) voir (**Figure (II.15)**). La valeur apparente de la capacité peut être alors ajustée périodiquement par le contrôle du temps durant lequel la capacité est connectée au circuit.

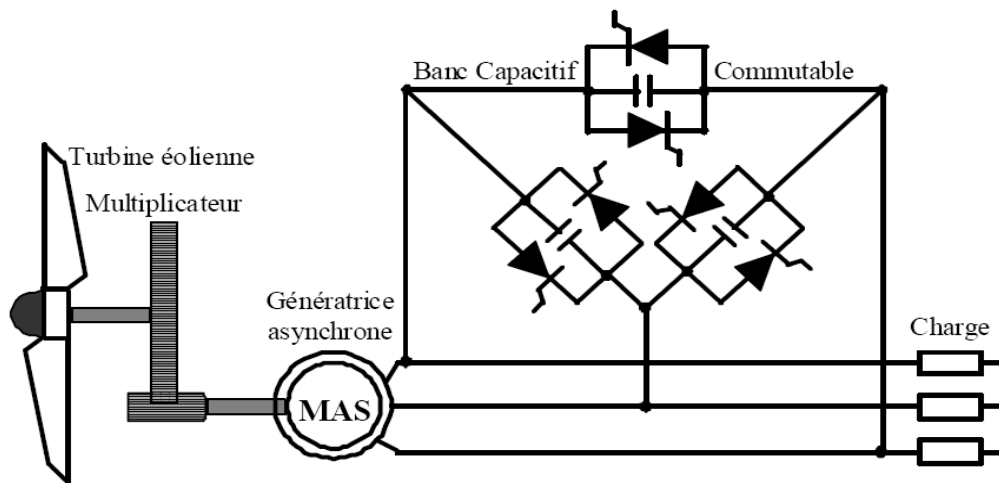


Figure II.15 machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs et gradeur

Ce dispositif se comporte comme un condensateur variable, de façon à créer une source d'énergie réactive variable permettant d'atténuer les variations de tensions lors de perturbations de la vitesse du vent ou de la charge. Cependant, en cas de décharge totale du dispositif de stockage, il ne peut plus y avoir production d'énergie.

C . Configuration avec convertisseur unidirectionnel (redresseur à diodes ou mixte)

Dans cette configuration (**Figure II.16**), les convertisseurs d'énergie sont un redresseur de type PD3 et un hacheur de type survolteur/dévolteur. Cette adaptation a pour but de maintenir la tension à une valeur constante aux bornes de la charge et ceci lorsque le système est placé dans un environnement dynamique où la vitesse, la charge et la capacité changent. La régulation de la tension de sortie à la valeur désirée aux bornes de la charge peut se faire en agissant sur le rapport cyclique α du signal commandant l'interrupteur du convertisseur DC-DC à la valeur adéquate.

Ce montage permet d'asservir la tension de sortie à la valeur souhaitée avec une dynamique satisfaisante et avec une commande caractérisée par sa simplicité de réalisation et son faible coût. Mais il ne permet pas de contrôler la magnétisation de la machine et son coût global reste élevé à cause des capacités introduites pour la magnétisation et l'utilisation de deux convertisseurs et un système de filtrage.

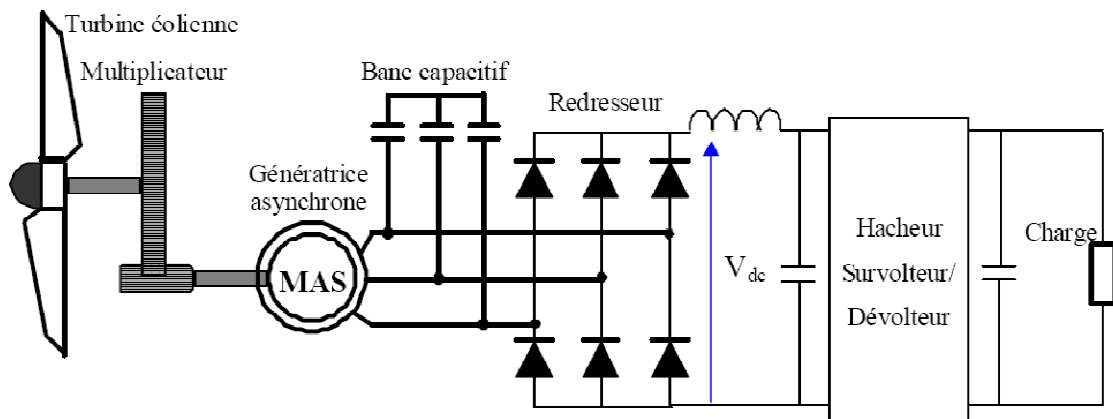


Figure II.16 : structure avec un pont à diodes et hacheur

D. Configuration avec convertisseurs bidirectionnels (convertisseurs à MLI)

La structure représentée sur la (**Figure II.17**) est constituée d'une génératrice asynchrone connectée à un redresseur et un onduleur de tension à MLI. Cette configuration permet le contrôle, par une commande adaptée, de la magnétisation et de la tension à la sortie de la génératrice asynchrone lorsque la vitesse du rotor et la charge électrique sont variables.

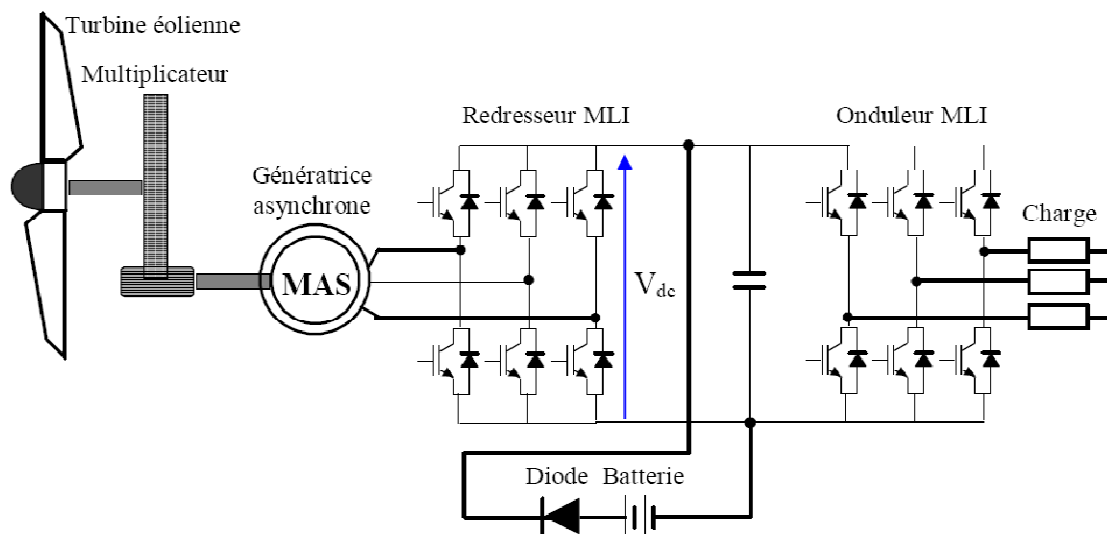


Figure II.17 : configuration à base deux convertisseurs MLI

L'insertion du convertisseur statique entre la génératrice et sa charge, permet d'avoir de nouveaux degrés de liberté. Ces derniers, utilisés dans le cas d'une commande adaptée aboutissent à une meilleure exploitation de l'éolienne qui peut se traduire par les avantages suivants :

- ✓ Un fonctionnement à des vitesses plus basses ;
- ✓ Une diminution du bruit acoustique ;
- ✓ Une optimisation du transfert d'énergie ;
- ✓ Une bonne gestion des transitoires vis-à-vis de la charge.

L'inconvénient majeur de cette architecture demeure le coût élevé et la complexité de la commande.

II.4.Conclusion

Nous avons décrits dans ce chapitre une autre étape de la conversion énergétique, à savoir celle de l'énergie mécanique en énergie électrique. Nous avons donné un aperçu des différents systèmes électriques utilisés, Focalisant sur deux principales familles de machines : les machines à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

Ensuite nous nous sommes intéressés aux systèmes éoliens dédiés aux sites isolés, et d'après la solution exposée, il apparait que la structure la plus intéressante du point de vue caractéristique, performance et prix demeure la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Cette machine est robuste et nécessite peu de maintenance, elle assure sa propre excitation grâce à un banc de capacités placé aux bornes de ses enroulements statoriques, ce qui favorise son utilisation pour l'alimentation des sites isolés et autonomes.

L'objectif de notre travail est d'étudier les caractéristiques et les performances à vide et en charge de cette machine. Pour cela, nous établirons d'abord un modèle mathématique de la génératrice asynchrone à cage auto-excitée, c'est l'objectif du chapitre III de ce mémoire.

Chapitre III

III.1.Introduction

Dans ce chapitre nous travaillons sur le développement du modèle sous Matlab-Simulink d'une génératrice asynchrone à cage [IDJ], notre travail consiste alors à écrire toutes les équations mathématiques qui puissent reproduire fidèlement le comportement de cette machine en régime permanent et transitoire et en prenant en considération le caractère non linéaire des matériaux ferromagnétiques qui la constituent.

Nous commençons ce chapitre par une brève explication du principe de fonctionnement de la machine asynchrone à cage, ensuite nous élaborons un modèle linéaire. Le modèle non linéaire se distingue du modèle linéaire par le fait que les inductances magnétisantes et leurs dérivées varient en fonction du courant magnétisant et donc indirectement du temps. La construction de l'expression analytique de l'inductance magnétisante se fait par approximation polynomiale de sa courbe ($L_m(I_m)$) obtenue par des essais expérimentaux.

III.2.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone auto excitée

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) exprimée par l'équation suivante : $60 \cdot f/p$.

La génératrice asynchrone n'engendre pas sa propre énergie d'excitation contrairement à l'alternateur. Pour cette raison il faudra lui apporter cette énergie et stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence. Dans la génératrice asynchrone auto-excitée fonctionnant à vitesse fixe et couplée directement au réseau, la vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paire de pôles de la génératrice. Entraînée à une vitesse supérieure au synchronisme, cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Par ailleurs le réseau doit lui fournir l'énergie réactive dont elle a besoin pour tous ses régimes de fonctionnement. Cette énergie est nécessaire à la création de son flux magnétique. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la vitesse de la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [Lam].

Pour un fonctionnement à vide on peut prendre un exemple sur une génératrice qui débite sur une capacité. La Figure (III.1.a) représente un condensateur parcouru par un courant dont la valeur efficace est de 7,07 A (10 A crête) quand il est soumis à une tension efficace de 70,7 V. À la lecture d'un ampèremètre et d'un voltmètre affichant ces valeurs, on pourrait croire que la puissance dissipée dans le condensateur est :

$$P=EI=70,7\text{V}\times 7,07\text{A}=500\text{W}$$

Essayons toutefois de vérifier ce résultat à l'aide des courbes de la (**Figure.III.1. b**). L'une de ces courbes (E_{ab}) représente la tension appliquée au condensateur, l'autre (I) indique les valeurs successives du courant qui le parcourt. Comme dans le cas des circuits résistifs, nous avons tracé la courbe (P) de la puissance en multipliant les valeurs instantanées de la tension par les valeurs correspondantes du courant. Par exemple, à 150° :

$$E_{ab} = +50 \text{ V}, I = -8,66 \text{ A}$$

$$\text{D'où } P = (+50 \text{ V}) \times (-8,66 \text{ A}) = -433 \text{ W}$$

En examinant cette courbe en pointillés, on se rend compte que durant le premier quart de cycle, entre 0° et 90° , la puissance est positive, c'est-à-dire qu'une certaine quantité d'énergie est fournie par la source et emmagasinée dans le condensateur. Durant le quart de cycle suivant, entre 90° et 180° , la puissance est négative: le condensateur restitue maintenant à la source l'énergie qu'il avait absorbée. On voit donc qu'il y a un échange continu d'énergie entre la source et le condensateur, de sorte que la valeur moyenne de la puissance fournie par la source est nulle [wil].

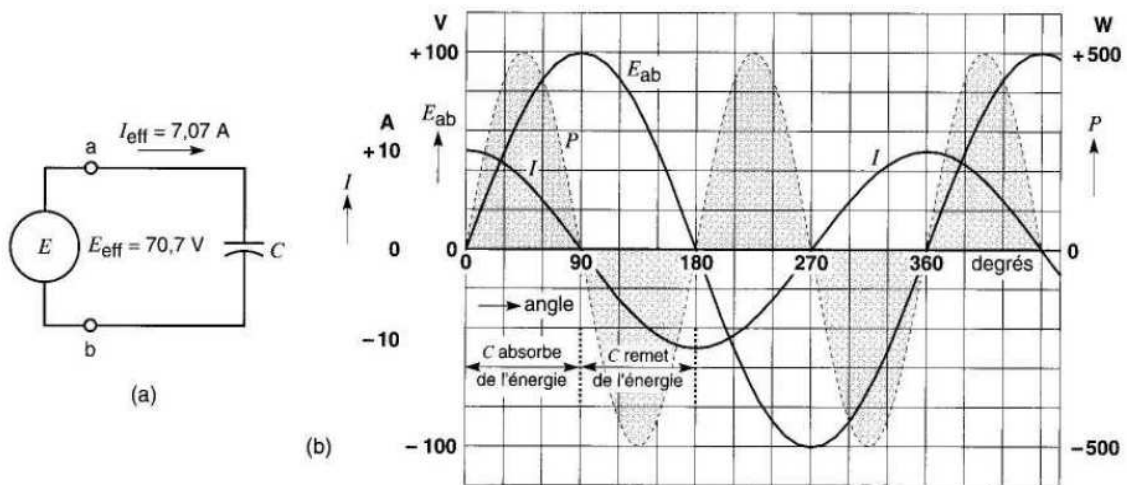


Figure.III.1 : Courbes de tension, courant et puissance instantanés aux bornes de la capacité.

III.3. Modélisation de la machine

La machine asynchrone fonctionne en génératrice lorsque son glissement change de signe (glissement négatif en convention moteur). La pulsation électrique du rotor est alors supérieure à celle des grandeurs statoriques, c'est-à-dire que le rotor tourne à une vitesse plus élevée que celle du champ tournant statorique.

Contrairement à la machine synchrone, la génératrice asynchrone ne possède pas d'inducteur séparé. Par conséquent, elle nécessite un apport de puissance réactive pour sa magnétisation. Lorsqu'elle est reliée au réseau, ce dernier fournit la puissance réactive requise. Par contre, en fonctionnement autonome, il faut lui apporter cette énergie soit par une batterie de condensateurs, soit par un convertisseur statique commandé.

La présence d'une induction magnétique rémanente dans la machine est indispensable pour l'auto-amorçage de la génératrice. Lorsque le rotor est entraîné à une vitesse donnée, des forces électromotrices (fems) triphasées, de très faible amplitude, sont induites aux bornes du stator. Le courant débité sur les condensateurs ou redresseur à MLI, magnétisant, permet d'amplifier la valeur de ces fems. Le niveau de tension se stabilise alors lorsqu'il y a égalité entre les puissances réactives fournies et consommées. Cela implique qu'il existe une valeur nominale de capacité à connecter au stator pour obtenir un 'enclenchement' de la génératrice.

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone, en moteur comme en génératrice, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter une modélisation analytique, d'abord en négligeant l'effet de la saturation des matériaux puis, dans un deuxième temps, en introduisant cet effet dans le modèle.

III.3.1. Modèle linéaire :

La modélisation analytique classique de la machine asynchrone se fait sous les hypothèses simplificatrices résumées ci-dessous :

- ✓ L'entrefer est supposé à épaisseur constante ;
- ✓ L'effet des encoches est négligé ;
- ✓ L'induction dans l'entrefer est supposée à répartition sinusoïdale ;
- ✓ La distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est supposée sinusoïdale ;
- ✓ Les pertes ferromagnétiques sont négligées (pas de courant de FAUCOULT ni d'hystérésis) ;
- ✓ Les pertes mécaniques sont négligées ;
- ✓ L'influence de l'effet de peau est négligée ;

- ✓ Les variations des caractéristiques dues à l'échauffement ne sont pas prises en compte ;
- ✓ La cage d'écurueil est remplacée par un bobinage triphasé rotorique équivalent.

Dans un premier temps, le modèle analytique classique que nous développerons, négligera également l'effet de la saturation.

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on peut écrire, pour chacun des six enroulements statoriques et rotoriques, l'équation électrique suivante :

$$v = R \cdot i + \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Où R est la résistance du bobinage, i , v et φ représentent respectivement le courant dans le bobinage, la tension à ses bornes et le flux le traversant.

Les équations matricielles pour les bobinages statoriques et rotoriques s'écrivent alors sous la forme suivante :

$$[v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (\text{III.2})$$

$$[v_r] = [R_r] \cdot [i_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad (\text{III.3})$$

Avec:

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_s \\ v_s \\ v_s \end{bmatrix} \quad [v_r] = \begin{bmatrix} v_r \\ v_r \\ v_r \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_s \\ i_s \\ i_s \end{bmatrix} \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_r \\ i_r \\ i_r \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi \\ \varphi \end{bmatrix} \quad [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi \\ \varphi \\ \varphi \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

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

Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (III.3) devient :

$$[v] = 0 = [R] \cdot [i] + \frac{\varphi}{\theta} \quad (\text{III.4})$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique qui s'écrit :

$$T = -[i_s, i_r] \cdot \left(\frac{\partial \varphi_s, \varphi_r}{\partial \theta} \right) \quad (\text{III.5})$$

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante :

$$\begin{aligned} [\varphi_s] &= [L_s] \cdot [i_s] + [M(\theta)] \cdot [i_r] \\ [\varphi_r] &= [L_r] \cdot [i_r] + [M(\theta)] \cdot [i_s] \end{aligned}$$

Où seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont fonction de la position rotorique

θ , l'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$T = [i_s] \cdot \left(- \frac{\partial [M(\theta)]}{\partial \theta} \right) \cdot [i_r]$$

Pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations triphasées de la machine asynchrone dans un repère diphasé tournant « dq0 ». Dans ce cas, on utilise la transformation de Park. Cette dernière, normée, assure l'invariance de la puissance instantanée entre les repères triphasés et « dq0 ».

En choisissant un repère dq0 diphasé, l'axe d peut être repéré par :

θ : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator ;

θ_r : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor.

A chaque instant, ces deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = p \cdot \Theta = \theta_r - \theta_s \quad (\text{III.6})$$

Où Θ est la position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique,

p : nombre de paires de pôles ;

θ_s étant l'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

Les différents axes sont illustrés sur la **Figure (III.2)** :

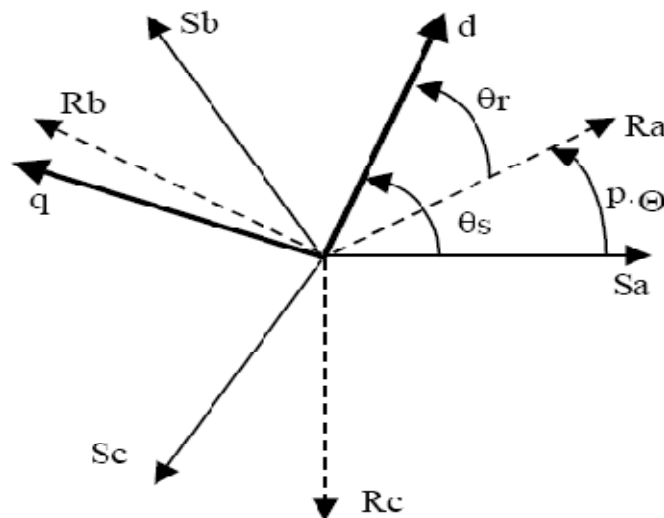


Figure III.2 : les différents systèmes d'axes utilisés

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques avec un angle de rotation θ_s , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq :

$$v = R \cdot i - \frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{III.7})$$

$$V = R \cdot i + \frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{III.8})$$

$$v = R \cdot i + \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{III.9})$$

De même, en appliquant aux équations rotoriques avec un angle de rotation θ_r , on obtient les expressions suivantes dans le repère dq :

$$v = 0 = R \cdot i - \frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{III.10})$$

$$v = 0 = R \cdot i + \frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{III.11})$$

$$v = R \cdot i + \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{III.12})$$

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (III.9) et (III.12) qui correspondent aux composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotorique s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \varphi \\ \varphi \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l & 0 & M & 0 \\ 0 & l & 0 & M \\ M & 0 & l & 0 \\ 0 & M & 0 & l \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{pmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

l : Inductance cyclique statorique.

l : Inductance cyclique rotorique.

M : Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor.

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère « dq » par rapport aux repères triphasés. Si les axes d et q sont solidaires du champ tournant de la machine.

Lors d'une alimentation sinusoïdale, il est possible d'écrire :

— = ω : pulsation des grandeurs statoriques.

— = ω : pulsation des grandeurs rotorique.

Par la suite, l'expression (III.6) peut se transformer, en régime permanent, sous la forme suivante : $\omega - \omega = p \cdot \Omega = \omega$ (III.14)

Avec:

Ω : est la vitesse mécanique.

ω : la vitesse électrique du rotor.

Ainsi, en partant des équations (III.7), (III.8), (III.10), (III.11), et en utilisant la relation (III.13) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère dq :

$$\begin{pmatrix} v \\ v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & -\omega \cdot L & 0 & -\omega \cdot M \\ \omega \cdot L & R & \omega \cdot M & 0 \\ 0 & \omega \cdot M & R & -\omega \cdot l \\ \omega \cdot M & 0 & \omega \cdot l & R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{pmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} 1 & 0 & M & 0 \\ 0 & 1 & 0 & M \\ M & 0 & 1 & 0 \\ 0 & M & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{—} \\ \text{—} \\ \text{—} \\ \text{—} \end{pmatrix}$$

(III.15)

La transformation de Park, appliqué à l'expression du couple électromagnétique, permet alors de réécrire ce dernier sous la forme suivante :

$$T = p.M. (i_{\alpha} i_{\beta} - i_{\beta} i_{\alpha}) \quad (\text{III.16})$$

Le modèle de la machine asynchrone développé ci-dessus, basé entre autres sur l'hypothèse de la linéarité de la caractéristique magnétique des matériaux, utilise des inductances constantes. Largement connu et utilisé, il est suffisamment simple pour que les temps de simulation ne soient pas prohibitifs tout en permettant d'obtenir des résultats relativement précis lorsque le point de fonctionnement étudié est proche des conditions d'identification des paramètres du modèle. Ceci est souvent le cas lors de fonctionnement moteur à niveau de saturation nominale (fonctionnement à tension nominale ou encore en commande vectorielle à flux fixe nominal). Par ailleurs, ce modèle est, dans la plupart des cas, suffisant pour obtenir de bons résultats dans l'analyse des régimes transitoires (démarrage, impact de charge...). Il est valable pour l'étude du fonctionnement de la machine dans le cas d'un fonctionnement moteur ou générateur sur réseau.

Cependant, l'entrefer des machines asynchrone est généralement faible ce qui induit un effet de saturation non négligeable. Différents travaux ont montré que cet effet doit être pris en compte pour aboutir à des modèles et commandes performantes en fonctionnement générateur autonome. La prise en compte de cet effet et celui de la non linéarité magnétique des matériaux ferromagnétiques est plus cruciale dans l'étude de la machine asynchrone quant à son fonctionnement en génératrice.

III.3.2.Modèle saturé :

Dans ce modèle et contrairement au modèle précédent il faut bien préciser que les inductances cycliques ne seront plus considérées comme constantes mais plutôt variables. Nous allons prendre en considération la variation de l'inductance mutuelle à travers la variation de l'inductance magnétisante notée L_m .

$$\varphi = L_{\alpha} i_{\alpha} + \varphi \quad (\text{III.17})$$

$$\varphi = L_{\beta} i_{\beta} + \varphi \quad (\text{III.18})$$

$$\varphi = L_{\alpha} i_{\alpha} + \varphi \quad (\text{III.19})$$

$$\varphi = L_{\beta} i_{\beta} + \varphi \quad (\text{III.20})$$

En définissant les courants magnétisants de la machine à partir des composantes des courants statoriques et rotoriques suivant les deux axes d et q comme suit :

$$i_d = i_{d1} + i_{d2} \quad (\text{III.21})$$

$$i_q = i_{q1} + i_{q2} \quad (\text{III.22})$$

Nous pouvons exprimer chacun des deux flux magnétisants par :

$$\varphi_d = L_m \cdot i_d \quad (\text{III.23})$$

$$\varphi_q = L_m \cdot i_q \quad (\text{III.24})$$

L_m est appelée inductance magnétisante statique. L'épaisseur de l'entrefer étant supposée constante, L_m , en fonction des courants, est identique suivant les deux axes d et q.

En partant des relations (III.17) à (III.20) et en utilisant les relations (III.21) à (III.24), on obtient, pour les flux statoriques et rotoriques suivant les deux axes, les expressions suivantes :

$$\varphi_{d1} = L_m \cdot i_{d1} + L_m \cdot i_{d2}$$

$$\varphi_{d2} = L_m \cdot i_{d1} + L_m \cdot i_{d2}$$

$$\varphi_{q1} = L_m \cdot i_{q1} + L_m \cdot i_{q2}$$

$$\varphi_{q2} = L_m \cdot i_{q1} + L_m \cdot i_{q2}$$

Sachant que : $L = l + L_m$

$$L = l + L_m$$

$$i_{d1} = i_d + i_{d2} \Rightarrow i_{d1} = i_d - i_{d2}$$

$$i_{d2} = i_d + i_{d1} \Rightarrow i_{d2} = i_d - i_{d1}$$

Les équations du flux statorique deviendront :

$$\varphi_{d1} = l \cdot i_{d1} + L_m (i_{d1} + i_{d2}) = l \cdot i_{d1} + L_m \cdot i_d \quad (\text{III.25})$$

$$\varphi_{d2} = l \cdot i_{d2} + L_m (i_{d1} + i_{d2}) = l \cdot i_{d2} + L_m \cdot i_d \quad (\text{III.26})$$

Et celles du flux rotorique deviendront :

$$\begin{aligned} \varphi_{q1} &= l \cdot i_{q1} + L_m \cdot i_{q1} + L_m \cdot i_{q2} \\ &= l \cdot i_{q1} - l \cdot i_{q2} + L_m (i_{q1} + i_{q2}) \\ &= -l \cdot i_{q2} + (L_m + l) \cdot i_{q1} \end{aligned} \quad (\text{III.27})$$

$$\begin{aligned}
 \varphi &= l \cdot i + L \cdot i + L \cdot i \\
 &= l \cdot i - l \cdot i + L \cdot i + i \\
 &= -l \cdot i + (L + l) \cdot i
 \end{aligned} \tag{III.28}$$

Le niveau de saturation de la machine est une fonction des ampères-tours globaux de la machine. Par conséquent, on définit le module de courant magnétisant global sous la forme suivante :

$$|i| = i + i \tag{III.29}$$

Dans ce cas, L_m , qui caractérise la magnétisation de la machine, peut être exprimée comme étant le rapport de $|\varphi|$, flux total magnétisant de la machine par $|i|$:

$$L = \frac{|\varphi|}{|i|} \tag{III.30}$$

Cette inductance de magnétisation est, bien évidemment, fonction du courant $|i|$,

$L = f(|i|)$. Pour une machine donnée, son identification s'obtient expérimentalement au travers de la caractéristique interne de la machine (nous allons l'expliciter plus loin).

Dans le cas d'un prototype virtuel, il est possible d'obtenir cette caractéristique à partir d'une modélisation numérique tenant compte de la non linéarité des matériaux constituant la machine.

Les équations (III.7), (III.8), (III.10) et (III.11) font toutes apparaître une dérivée d'un flux par rapport au temps. Nous allons chercher à exprimer l'une de ces dérivées.

Soit $\frac{d\varphi}{dt}$:

$$D'après l'expression (III.25), cette dérivée s'écrit $\frac{d\varphi}{dt} = -(l \cdot \frac{di}{dt} + L \cdot \frac{di}{dt})$$$

Les inductances de fuites étant supposées constantes, on aboutit à :

$$\frac{d\varphi}{dt} = l \cdot \frac{di}{dt} + L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{dt}$$

Comme L_m varie avec le module de $|i|$, l'équation précédente peut se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{d\varphi}{dt} = l \cdot \frac{di}{dt} + L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot L' \cdot \frac{|i|}{|i|}$$

L_d et L_q représentent les inductances magnétisantes dynamiques suivant les axes direct et en quadrature respectivement. Dans le cas d'une caractéristique linéaire des matériaux $L_d = L_q = L_m = \text{constante}$. L_{dq} , inductance d'effet croisé, exprime la variation de L_m en fonction de i_d et i_q . Elle quantifie le couplage croisé entre bobinages des axes d et q.

Dans notre modèle final en négligeant l'effet croisé, $L_{dq} = 0$.

En conclusion, la connaissance des évolutions de $L_m = f(|i_d|)$ permet de calculer toutes les inductances qui interviennent dans le modèle en présence de la saturation. C'est ce principe de base qui est appliqué dans le modèle analytique élaboré.

Les équations électriques de la machine asynchrone s'écrivent alors, sous forme matricielle, comme suit :

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & -\omega_r L_m & 0 & -\omega_r L_m \\ \omega_r L_m & R_s & \omega_r L_m & 0 \\ - & \omega_r l & R_r & -\omega_r (l + L_m) \\ -\omega_r l & - & \omega_r (l + L_m) & R_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_r \\ i_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l & 0 & L_m & L_m \\ 0 & l & L_m & L_m \\ -l & 0 & l + L_m & L_m \\ 0 & -l & L_m & l + L_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_r \\ \dot{i}_r \end{pmatrix} \quad (\text{III.34})$$

Dans le modèle développé ci-dessus, les courants rotoriques ne sont plus explicites mais sont 'inclus' implicitement dans les expressions des courants magnétisants i_d et i_q .

En reprenant la relation (III.5) et en appliquant la transformation de Park aux différents flux et courants, on aboutit à l'expression suivante du couple électromagnétique :

$$T_e = p \cdot L_m \cdot (i_d \cdot i_q - i_q \cdot i_d)$$

III.4. Elaboration du modèle de la machine asynchrone pour l'étude en génératrice autonome

Le modèle développé ci-dessus est évidemment valable pour l'étude du régime moteur autant que générateur sur réseau. Dans le cas d'un fonctionnement générateur autonome débitant sur un banc de capacités, le modèle doit être adapté pour tenir compte des contraintes de ce point de fonctionnement ainsi que des équations de charges. Partant du schéma monophasé étoile équivalent, la (Figure III.3) montre le schéma du dispositif étudié dans le repère de Park où chaque grandeur électrique est mise sous forme de ses composantes directe et en quadrature.

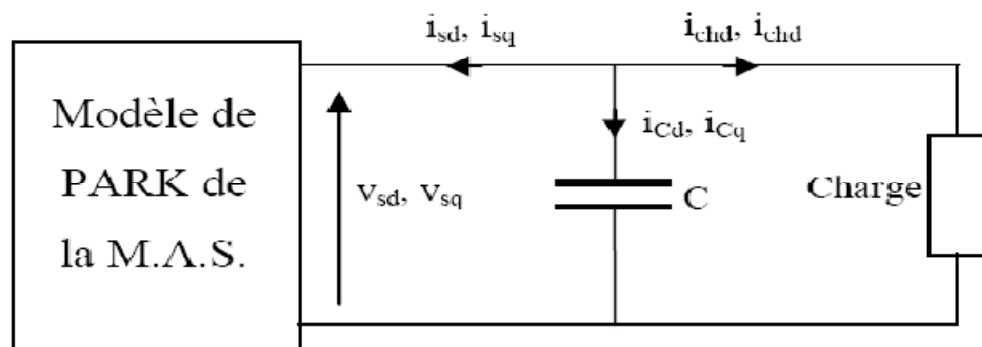


Figure III.3 Génératrice asynchrone auto-excitée alimentant une charge.

L'étude de l'auto-amorçage de la machine en fonctionnement génératrice à vide est possible en résolvant le système d'équations en tension. On rappelle que l'auto-amorçage de la génératrice n'est possible qu'en présence de feds rémanente aux bornes des bobinages statoriques. Afin prendre en considération ces feds, nous nous affectons aux flux crée par la machine des valeurs initiales non nulles mais très faibles.

Par ailleurs, la fréquence des grandeurs statoriques étant inconnue, le système d'équations de la génératrice est mieux conditionné lorsqu'il est exprimé dans le référentiel (d,q) lié au rotor. En effet, dans ce repère, seule la valeur de la vitesse de rotation mécanique est nécessaire. Dans ce cas, le système d'équations du modèle linéaire (l'équation (III.14)) dans ce repère est donné par l'expression matricielle suivante :

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} v \\ v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} R & -p.\Omega.L & 0 & -p.\Omega.M \\ p.\Omega.L & R & p.\Omega.L & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{pmatrix} \\
 &+ \begin{pmatrix} L & 0 & M & 0 \\ 0 & L & 0 & M \\ M & 0 & L & 0 \\ 0 & M & 0 & L \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{III.35}$$

Et le même système d'équations, en tenant compte de la saturation, s'écrira comme suit dans le référentiel (d,q) lié au rotor (dédit de l'équation (II.34)) avec et sans Lm' :

III.4.1.En prenant en considération Lm'

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} v \\ v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} R & -p.\Omega.L & 0 & -p.\Omega.M \\ p.\Omega.L & R & p.\Omega.L & 0 \\ - & 0 & R & 0 \\ 0 & - & 0 & R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{pmatrix} \\
 &+ \begin{pmatrix} 1 & 0 & L & L \\ 0 & 1 & L & L \\ -1 & 0 & 1+L & L \\ 0 & -1 & L & 1+L \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{III.36}$$

III.4.2. En négligeant L_m'

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} v \\ v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} R & -p.\Omega.L & 0 & -p.\Omega.M \\ p.\Omega.L & R & p.\Omega.L & 0 \\ - & 0 & R & 0 \\ 0 & - & 0 & R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{pmatrix} \\
 &+ \begin{pmatrix} 1 & 0 & L & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L \\ -1 & 0 & 1+L & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1+L \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} - \\ - \\ - \\ - \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{III.37}$$

Pour la simulation nous devons écrire notre système sous la forme suivante :

$$- = [B] - [A] \cdot [i]$$

On a notre système comme suit :

$$[v] = R \cdot [i] + [L] \cdot - \Rightarrow - = [L] \cdot [v] - [L] \cdot [R] \cdot [i]$$

Pour intégrer numériquement ce système d'équations, il faut calculer la matrice L^{-1} , cette dernière se présente comme suit:

$$\underline{\underline{\quad}} \cdot \begin{pmatrix} L & 0 & -L & 0 \\ 0 & L & 0 & -L \\ L & 0 & L & 0 \\ 0 & L & 0 & L \end{pmatrix}$$

Avec : $L = L + L$

L'équation électrique devient maintenant :

$$- \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{pmatrix} = \underline{\underline{\quad}} \cdot \begin{pmatrix} L & 0 & -L & 0 \\ 0 & L & 0 & -L \\ L & 0 & L & 0 \\ 0 & L & 0 & L \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v \\ v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$- \underline{\underline{\quad}} \cdot \begin{pmatrix} L & 0 & -L & 0 \\ 0 & L & 0 & -L \\ L & 0 & L & 0 \\ 0 & L & 0 & L \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R & -P\Omega L & 0 & -P\Omega L \\ P\Omega L & R & P\Omega L & 0 \\ -R & 0 & R & 0 \\ 0 & -R & 0 & R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{pmatrix}$$

Le système d'équations électriques final devient :

$$\begin{matrix} - \\ \vdots \\ - \end{matrix} \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{pmatrix} = \begin{matrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{matrix} \cdot \left\{ \begin{matrix} \begin{pmatrix} L & v \\ L & v \\ L & v \\ L & v \end{pmatrix} \\ - \end{matrix} \right.$$

$$\left[\begin{matrix} L & R & +L & R & -P\Omega L & L & -R & L & -P\Omega L & L \\ P\Omega L & & & & R & L & P\Omega L & L & -R & L \\ R & L & -R & L & -P\Omega L & L & L & R & -P\Omega L & L \\ P\Omega L & & & & R & L & -R & L & P\Omega L & L & L & R \end{matrix} \right] \begin{pmatrix} i \\ i \\ i \\ i \end{pmatrix} \quad (III.38)$$

C'est à partir de ce système d'équations auquel nous ajoutons les équations d'auto-amorçage que nous allons construire notre schéma simulink.

III.5. Système d'auto-amorçage

III.5.1. Auto-amorçage à vide :

Les tensions statoriques étant des inconnues, il faut par conséquent les calculer en tenant compte des équations du circuit électrique extérieur (banc de capacités).

L'équation de la maille extérieure dans les axes abc stipule que :

$$v = - \int i \, dt \Rightarrow -v = - \int i \, dt$$

Pour écrire ces mêmes équations dans le repère de Park, il suffit d'appliquer la transformation de Park aux courants et tensions :

$$\underline{v} = \frac{\underline{v}}{\underline{v}} = P(\theta) \rightarrow \underline{v} = P(\theta) \cdot \frac{\underline{v}}{\underline{v}}$$

$$- \underline{P}(\theta) \cdot \underline{i} = - (P(\theta) \cdot \underline{v})$$

$$-P(\theta) \cdot \underline{i} = P(\theta) \cdot - (P(\theta) \cdot \underline{v})$$

$$-P(\theta) = -P(\theta) \cdot - = - \cdot P(\theta) \cdot \omega$$

$$\Rightarrow -P(\theta) \cdot \underline{i} = P(\theta) \cdot - \cdot \underline{v} + - \cdot P(\theta) \cdot \omega \cdot \underline{v}$$

On multiplie à gauche par $P(\theta)$:

$$\Rightarrow - \underline{i} = - \cdot \underline{v} + P(\theta) \cdot - \cdot P(\theta) \cdot \omega \cdot \underline{v}$$

Sachant que :

$$P(\theta) \cdot - \cdot P(\theta) = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow - \underline{i} = - \cdot \frac{\underline{v}}{\underline{v}} + \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \omega \cdot \frac{\underline{v}}{\underline{v}}$$

Si l'on ne tient pas compte de la composante homopolaire (indice o)

$$\Rightarrow -\frac{i}{i} = -\frac{v}{v} + \frac{0}{1} \frac{-1}{0} \cdot \frac{v}{v} \cdot \omega$$

$$\Rightarrow -\frac{v}{v} = -\frac{i}{i} - \frac{0}{1} \frac{-1}{0} \cdot \frac{v}{v} \cdot \omega$$

$$\Rightarrow -\frac{v}{v} = -\frac{i}{i} + \frac{0}{-1} \frac{1}{0} \cdot \frac{v}{v} \cdot \omega$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} -v &= -i + \omega \cdot v \\ -v &= -i - \omega \cdot v \end{aligned} \tag{III.39}$$

III.5.2 Fonctionnement en charge

III.5.2.1. charge équilibrée

Dans les équations d'auto-amorçage du système III.39, il suffit d'ajouter les courants de charge aux courants statoriques :

$$-\begin{bmatrix} v \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - & 0 \\ 0 & - \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} - & - \\ - & - \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \Omega \\ -\Omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ v \end{bmatrix} \tag{III.40}$$

Dans le cas d'une charge résistive, on déduit les courants de charge i et i par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} v &= R \cdot i \\ v &= R \cdot i \end{aligned} \tag{III.41}$$

III.5.2.2. Charge déséquilibrée :

L'utilisation d'une génératrice asynchrone pour la génération de l'électricité dans un site isolé implique que la charge peut être déséquilibrée. Pour étudier ce cas de figure, on peut utiliser le même modèle de Park de la machine proposé dans le cas des charges équilibrées. Toutefois, concernant les équations du circuit électrique extérieur, on adoptera l'écriture triphasée de ces dernières. Ainsi, les tensions aux bornes des condensateurs sont données par l'équation matricielle suivante :

$$- \begin{bmatrix} v \\ v \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - & 0 & 0 \\ 0 & - & 0 \\ 0 & 0 & - \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i & -i \\ -i & -i \\ -i & -i \end{bmatrix} \quad (\text{III.42})$$

i , i et i étant les courants dans la charge triphasée et C la capacité d'auto-amorçage.

On doit ajouter à cette équation celles concernant la charge. Dans nos travaux, nous nous sommes intéressés à un seul type de charges déséquilibrées (RL) réparties sur les trois phases comme suit :

Phase a : R , Phase b : R et L , Phase c : R et L .

$$\begin{cases} v = R \cdot i \\ v = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \\ v = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

Où :

R , R , R : sont respectivement les résistances de charge dans les trois phases,

L , L : sont respectivement les inductances de charge dans les phases b et c.

III.6. Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la modélisation de la machine asynchrone à cage fonctionnant en génératrice autonome.

Nous avons d'abord construit à partir du modèle de Park lié au rotor, les équations du modèle linéaire de notre génératrice, celui-ci fait appel à des matrices inductances constantes. Ce modèle ne reflète pas la réalité, puisque dans le cas du fonctionnement en génératrice de la machine asynchrone, c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement, autrement la tension d'alimentation augmenterait indéfiniment (théoriquement). Le modèle non linéaire est donc construit en introduisant dans le modèle linéaire une inductance magnétisante variable en fonction du courant magnétisant.

L'exploitation de ses modèles, l'interprétation des résultats et l'établissement des caractéristiques de la génératrice asynchrone auto-excitée en fonctionnement à vide et en charge fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV

IV.1 Introduction

L'objet du présent chapitre est la mise en oeuvre et l'exploitation du modèle diphasé de la machine asynchrone fonctionnant en génératrice autonome. La présence des condensateurs d'auto-amorçage et la prise en compte de la non-linéarité (saturation) des matériaux magnétiques (inductance magnétisante variable en fonction du courant magnétisant) sont ici indispensables. Les condensateurs offrent l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation et la saturation fixe quant à elle le point de fonctionnement de la machine

C'est ainsi que nous nous intéresserons en premier lieu à la caractérisation de la saturation magnétique, c'est à dire à la courbe de variation de l'inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant ($L_m(I_m)$) puis à sa représentation par une fonction polynomiale. Cette fonction s'obtient normalement par identification d'une courbe expérimentale d'une machine réelle. Dans notre cas, nous utiliserons des résultats (paramètres et courbe de saturation) issus de la littérature technique [Idj].

Dans une seconde étape nous effectuerons des simulations du fonctionnement à vide de la génératrice asynchrone pour mettre en relief l'inadéquation du modèle linéaire dans ce cas de figure (résultats divergents), puis pour montrer en utilisant le modèle non linéaire l'influence de la vitesse de rotation et de la capacité des condensateurs d'auto-amorçage sur la dynamique et l'amplitude de la tension statorique. Une étude analytique du phénomène d'auto-amorçage est effectuée afin de déterminer les paramètres dont il dépend et par conséquent de dimensionner correctement la capacité des condensateurs.

Une étude du fonctionnement en charge de cette génératrice viendra clôturer ce chapitre. Plusieurs tests par simulation seront effectués pour étudier l'influence de la charge (sa nature et son niveau) sur les performances en charge de la génératrice asynchrone auto excitée fonctionnant en autonome (non reliée au réseau). Dans ce cas de fonctionnement, le réseau étant absent, la fréquence et la tension statorique ne sont plus imposées mais elles sont libres de toute variation. Les tests en question concernent précisément le fonctionnement sur charge équilibrée résistive en faisant varier la valeur de la résistance, puis sur des charges déséquilibrées de différentes natures et différentes valeurs.

IV.2 Identification de l'inductance magnétisante (L_m)

En considérant le schéma de la figure VI.1, si la génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme, le glissement étant nul la branche rotorique est d'impédance infinie et le schéma équivalent se réduit donc à celui de la figure IV.2 où ne figure que la résistance et la réactance de fuites statorique en série la réactance magnétisante.

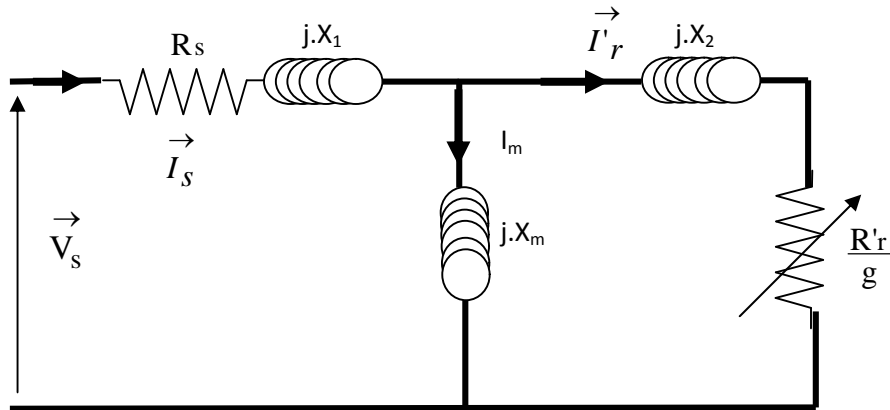


Figure IV.1 Schéma équivalent de la génératrice asynchrone

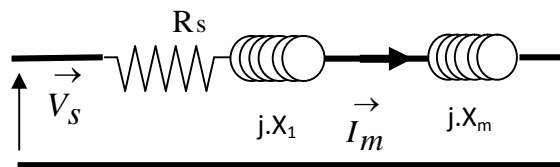


Figure IV.2 Schéma équivalent de la génératrice asynchrone tournant à la vitesse de synchronisme.

La résistance R_s et la réactance de fuites ($X_1 = N_s \cdot \omega$) statoriques peuvent être mesurées respectivement par la méthode voltampère métrique et par l'essai à rotor bloqué. La réactance magnétisante peut donc être identifiée par un essai à vide à tension variable et à la vitesse de synchronisme.

$$V_s = Z_m \cdot I_s = \sqrt{R_s^2 + (N_s + L_m)^2 \cdot \omega^2} \cdot I_s$$

$$L_m = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_s}{I_s}\right)^2 - R_s^2 - N_s^2} \quad (\text{IV.1})$$

Sachant que :

$$X_m = L_m \cdot \omega \quad \text{et} \quad X_1 = N_s \cdot \omega$$

La courbe $X_m(I_m)$ doit être construite expérimentalement point par point et l'ensemble des points permettent de synthétiser une approximation polynomiale.

Plusieurs formes de cette approximation sont proposées dans la littérature et la plus connue est l'approche linéaire par morceaux. Nous avons choisi d'adopter dans notre cas la forme polynomiale donnée par l'équation IV.2, parce qu'elle est de forme simple, se prête très facilement à la programmation et la précision peut être améliorée par le degré (j) de cette fonction.

$$L_m = f(|i_m|) = \sum_{j=0}^n a_j \cdot |i_m|^j \quad (\text{IV.2})$$

Il apparaît d'après les différents essais effectués dans [Idj] que la fonction de degré 12 (représentée dans la figure IV.3) est celle qui reproduit le plus fidèlement la courbe expérimentale. La forme complète de cette fonction est donnée dans l'annexe.

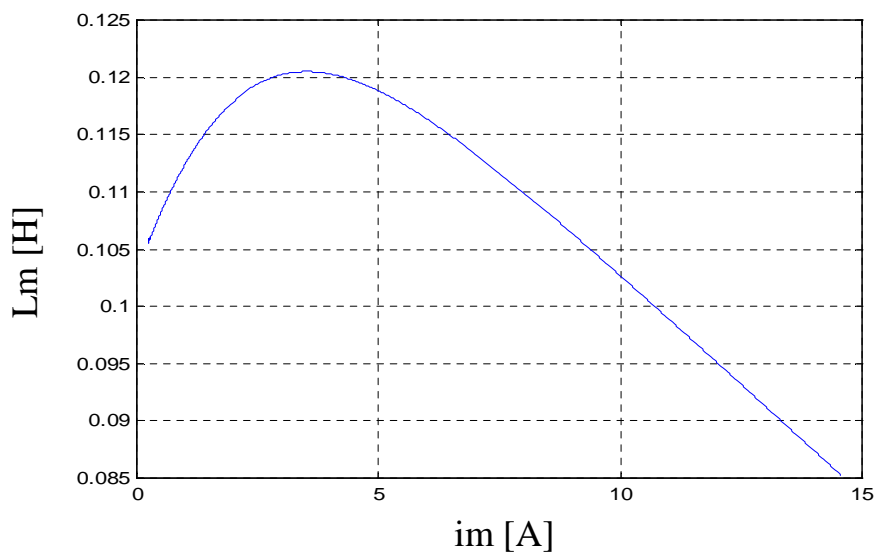


Figure IV.3 : La caractéristique $L_m = f(|i_m|)$ obtenue par simulation

IV.3. Etude de la génératrice asynchrone à cage

IV.3.1 Fonctionnement à vide :

Dans cette première partie de l'étude nous nous intéressons aux caractéristiques de la machine qui débite uniquement sur un banc de capacités, nous présentons d'abord le schéma implanté sous Matlab Simulink, ensuite nous exposons les résultats obtenus avec leurs interprétations.

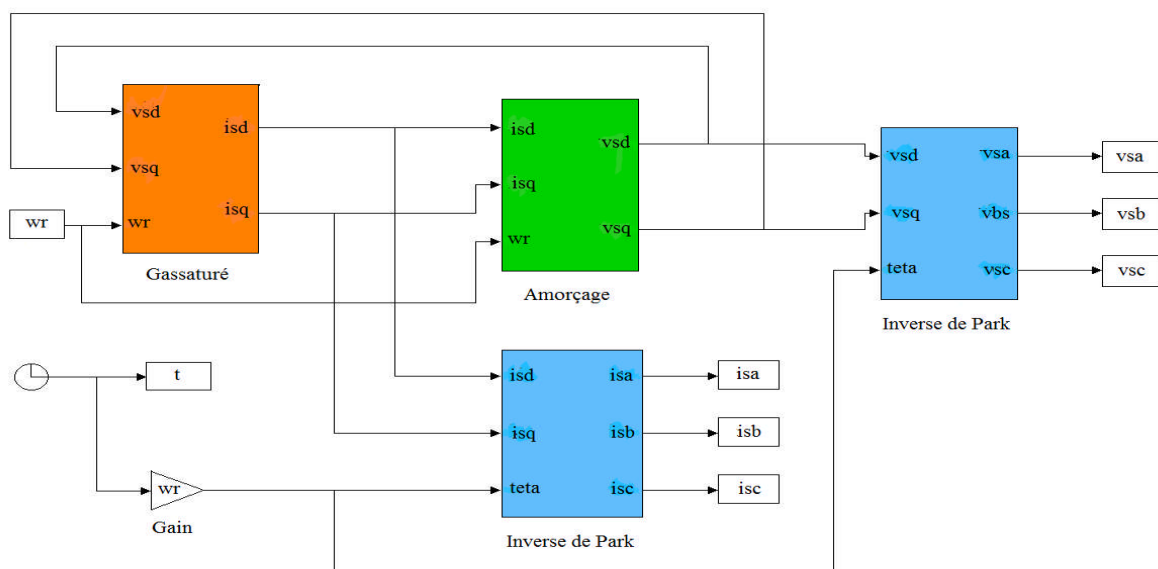
Nous avons fixé dans un premier temps, la vitesse de rotation du rotor à $N_r = 780 \text{ tr/min}$, et les valeurs des trois capacités d'auto-amorçage à $100\mu\text{F}$ chacune, ces dernières sont branchées en étoile au bornes du stator. Nous nous proposons d'étudier l'influence de la vitesse de rotation et de la capacité de magnétisation sur l'amplitude de la tension statorique. Afin de montrer les limites du modèle linéaire nous commençons par le mettre en œuvre, son schéma Matlab/simulink est le même que celui utilisé dans le modèle non linéaire, il suffit de garder L_m constante.

➤ Schéma Simulink de la génératrice asynchrone auto excitée fonctionnant à vide :

Comme le montre la figure ci-dessous, le schéma matlab-simulink de la génératrice asynchrone auto-excitée fonctionnant à vide est décomposé en deux principaux blocs :

- Le modèle en dq non linéaire (saturé) de la génératrice
- Le modèle en dq de l'auto-amorçage

Les deux autres blocs représentent les transformées inverses de Park, servant à visualiser les grandeurs réelles en abc de la machine.



A. Résultats du modèle linéaire

Ces résultats sont obtenus en négligeant le phénomène de saturation du matériau magnétique, les figures (IV.4) et (IV.5) donnent l'évolution des tensions et des courants statoriques.

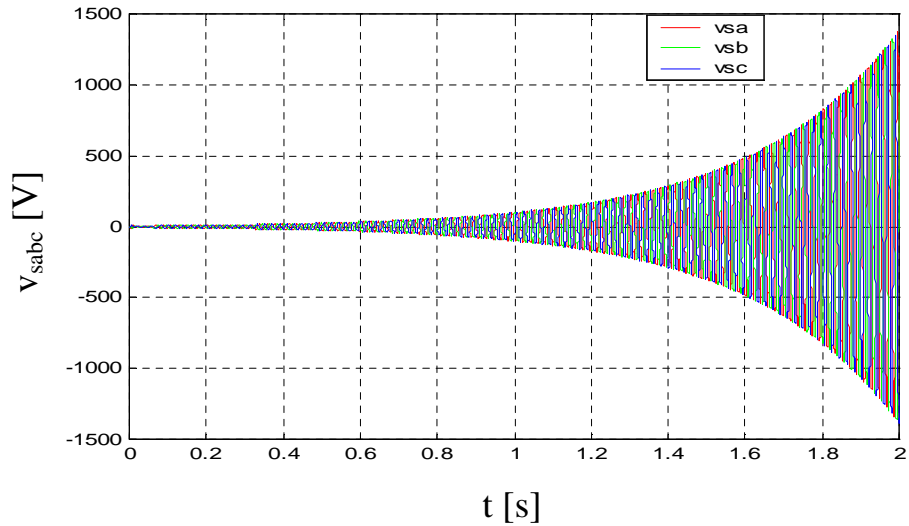


Figure IV.4 : Evolutions des tensions statoriques à vide et en régime non saturé.

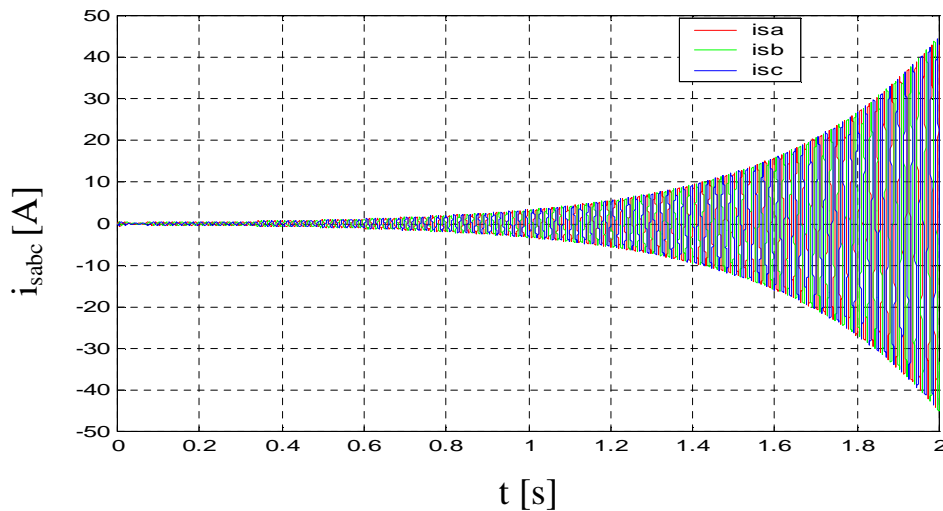


Figure IV.5 : Evolutions des courants statoriques à vide et en régime non saturé.

A partir des figures ci dessus on constate que les grandeurs statoriques (V_s et I_s) évoluent d'une façon exponentielle et indéfinie. Car la caractéristique de magnétisation ne présente pas de coude de saturation et donc il ne peut y avoir d'intersection avec la caractéristique externe du condensateur. Cela est dû essentiellement à l'hypothèse de la non saturation du circuit magnétique. Le phénomène de saturation étant négligé, le point de

fonctionnement en régime permanent ne peut être atteint. La tension aux bornes de la machine sera dans la réalité limitée par un phénomène non linéaire de la saturation de la machine dont il faudrait en tenir compte.

Ces résultats montrent, sans équivoque, les limites d'utilisation du modèle analytique linéaire dans le cas du fonctionnement de la machine asynchrone en génératrice, contrairement au fonctionnement en moteur où le modèle linéaire marche bien et où la non linéarité n'apporte que de la précision.

B. Résultats du modèle saturé

Le même schéma Simulink donné précédemment est utilisé en remplaçant L_m par son expression polynomiale. Les résultats de simulation obtenus sont illustrés dans les figures (IV.6), (IV.7) et (IV.8) :

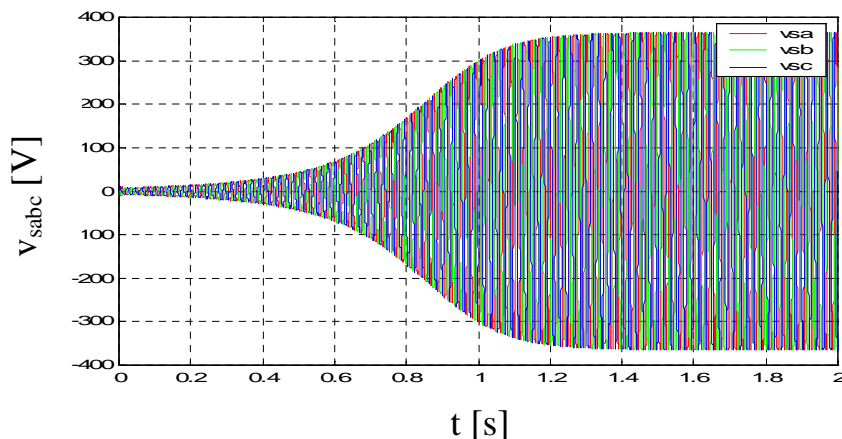


Figure IV.6 : Tensions des phases statoriques à vide.

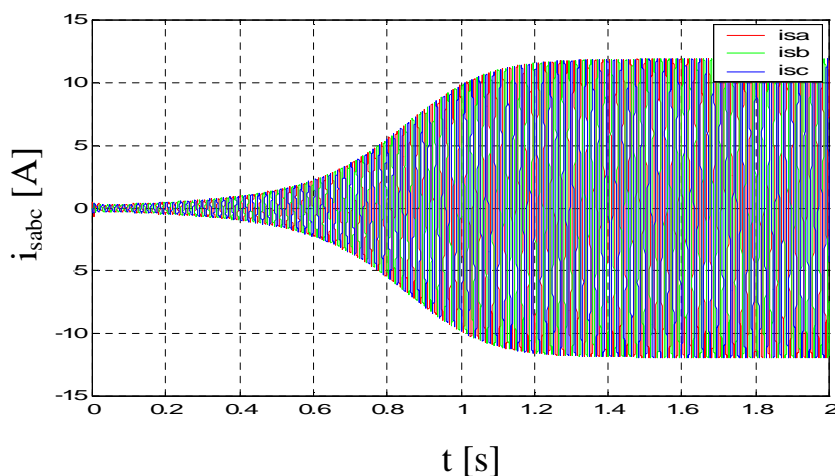


Figure IV.7 : Courant statoriques à vide et en régime saturé.

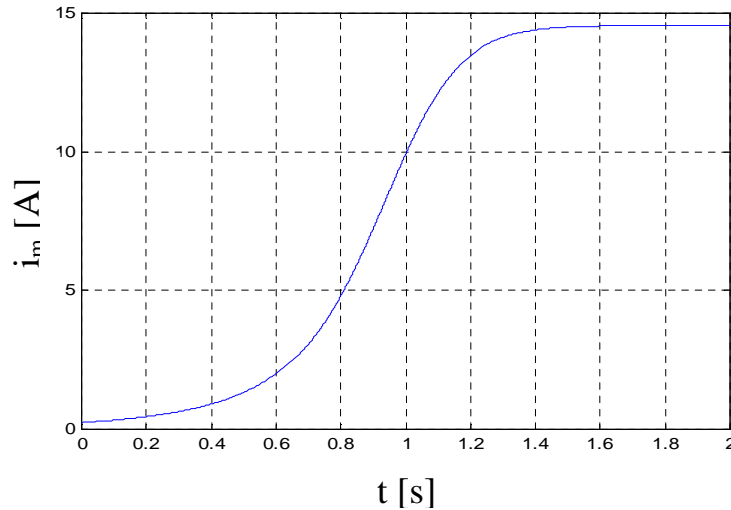


Figure IV.8 : Evolution du courant magnétisant (i_m).

Au début de l'amorçage la tension croît d'une façon exponentielle comme dans le cas linéaire, puis elle s'incurve pour se stabiliser (à cause de la saturation de la machine) à une valeur correspondant à un point de fonctionnement dépendant du condensateur, de la vitesse de rotation et des paramètres de la machine. La tension dans son évolution suit la courbe d'aimantation voir le courant de magnétisation. Le courant de ligne reste semblable à la tension. La valeur maximale du courant statorique est légèrement inférieure à la valeur du courant de magnétisation car le courant rotorique est négligeable à vide.

Les courbes IV.6 à IV.8 symbolisent le phénomène d'auto-amorçage de la génératrice dont nous donnons une analyse dans ce qui suit. Initialement le magnétisme résiduel du fer rotorique (provenant des fonctionnements précédents) produit avec la rotation une fem rémanente dans les enroulements statoriques, cette fem appliquée aux bornes de la machine et du condensateur d'auto-amorçage (formant un circuit RLC) produit dans chaque phase un courant magnétisant, ce dernier à son tour produit un flux d'entrefer. Ce flux s'additionne au flux rémanent pour produire une plus grand fem (Le condensateur fournit le courant d'excitation requis par la génératrice et cette dernière charge le condensateur pour augmenter la tension de sortie), ce processus se répète jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Figure(IV.9)

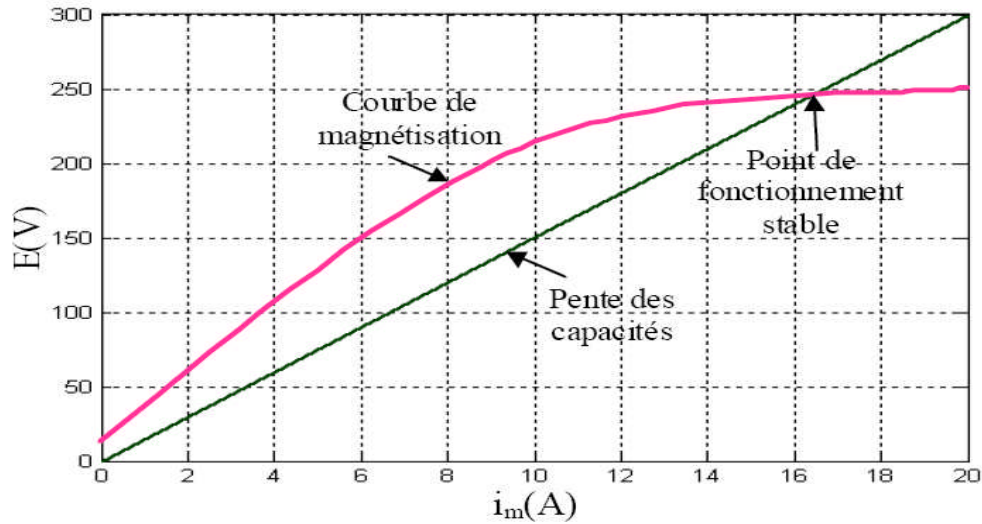


Figure IV.9 : Phénomène d'auto amorçage.

Etant donné que la machine fonctionne à vide la fréquence statorique est prise égale à la fréquence rotorique ($g \approx 0$), contrairement au cas du fonctionnement en charge que nous allons voir par la suite où la fréquence des grandeurs statoriques dépend de la charge insérée.

Nous avons représenté dans la figure IV.10 la courbe de l'inductance de magnétisation en fonction du temps.

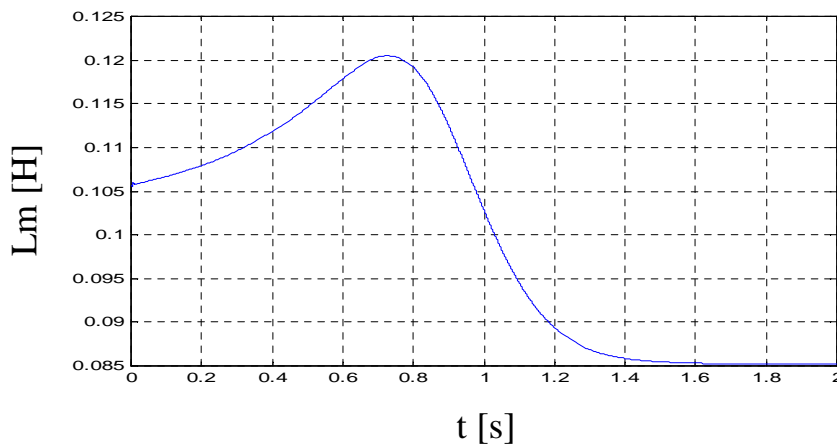


Figure IV.10 : Evolution de l'inductance de magnétisation en fonction du temps.

- Influence de la capacité sur la tension d'auto-amorçage de la machine

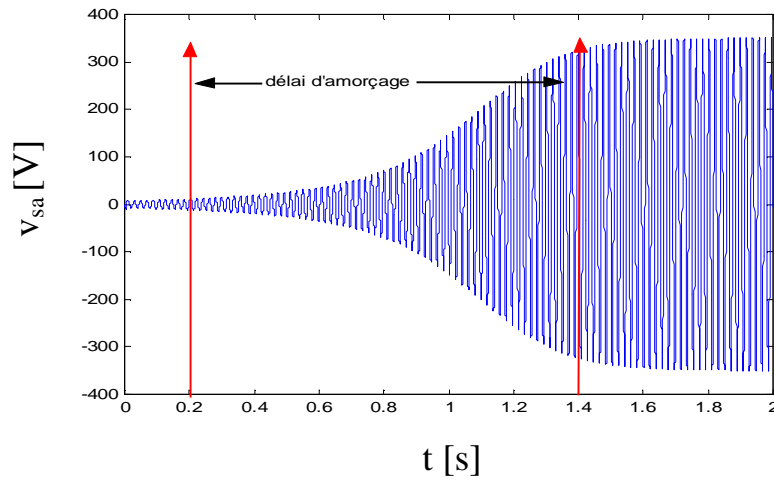


Figure IV.11 –a Tension de la phase statorique a en fonction du temps (avec $C=95\mu\text{F}$)

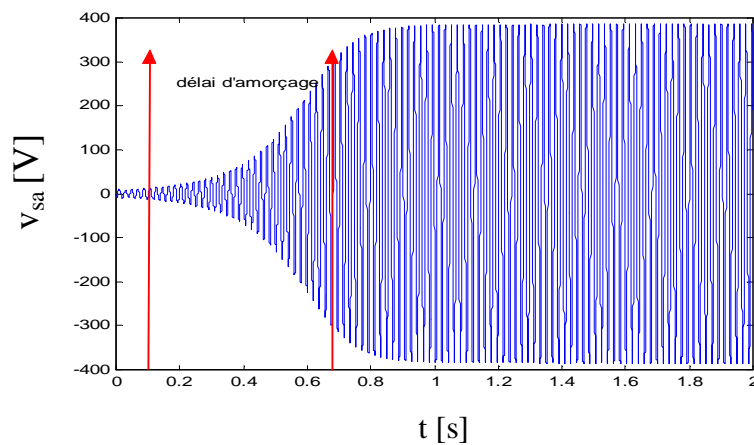


Figure IV.11 –b Tension de la phase statorique a en fonction du temps (avec $C=110\mu\text{F}$)

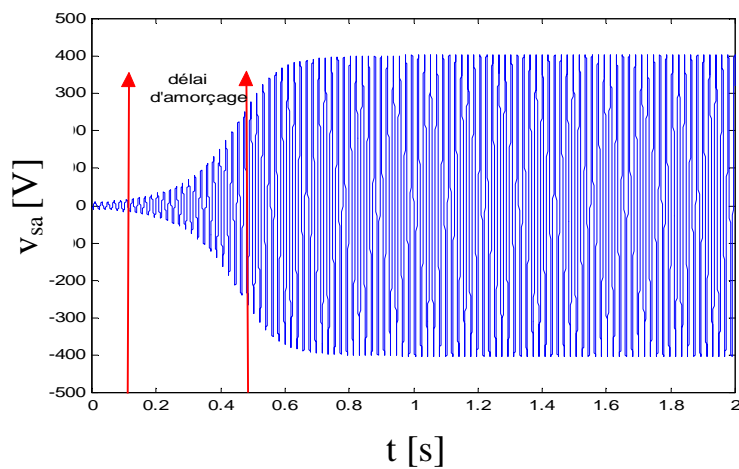


Figure IV.11 –c Tension de la phase statorique a en fonction du temps (avec $C=120\mu\text{F}$)

Les résultats de simulation illustrée dans les figures ci-dessus représentent l'évolution de la tension statorique lorsque la capacité des condensateurs l'auto-amorçage varie. On constate que la valeur de la capacité influe sur l'amplitude et le régime transitoire (délai d'amorçage) de la tension statorique. Il existe une valeur minimale C_{\min} de la capacité, au dessous de laquelle l'amorçage ne peut pas avoir lieu, et une valeur maximale C_{\max} au delà de laquelle la tension statorique n'augmente plus à cause de la saturation.

Par contre la variation de la capacité n'a pas beaucoup d'effet sur la fréquence de la tension, s'est plutôt la vitesse de rotation qui a une influence directe.

- **Influence de la vitesse de rotation sur la tension d'auto-amorçage de la machine**

La vitesse de rotation à une influence directe sur la tension pour un même courant magnétisant. Lorsque la vitesse de rotation augmente la tension augmente également et elle n'est pas limitée par la forte saturation comme dans le cas du condensateur. **La Figure (IV.12)** montre les tensions statoriques maximales obtenues pour chaque vitesse de rotation donnée.

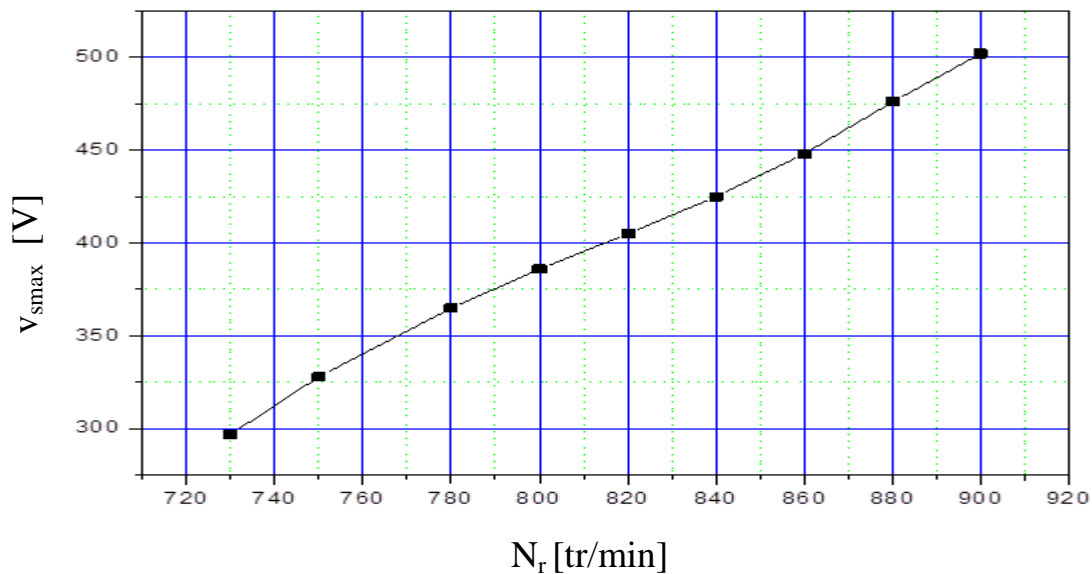


Figure IV.12 : Evolution de la tension maximale en fonction de la vitesse pour une capacité fixe ($C=100\mu F$)

On voit bien que pour une capacité d'auto excitation donnée ($100\mu f$) la tension induite augmente d'une façon linéaire en fonction de la vitesse, Il est alors possible d'aboutir à une tension induite constante, quelle que soit la vitesse de rotation en adaptant la puissance réactive fournie. Cela passe par l'adaptation de la valeur de la capacité en fonction de la vitesse de rotation. Pour une vitesse donnée, il existe une capacité minimale permettant

l'auto-amorçage. Celle-ci se déduit du schéma électrique monophasé équivalent de la machine débitant sur un banc de capacités. L'égalisation des parties réelle et imaginaire de l'impédance résultante du schéma équivalent permet d'aboutir à l'expression suivante [poi] :

$$C_{\min} = \frac{1}{L_m * \omega_r^2} \quad (\text{IV.3})$$

Où (L_m) est l'inductance magnétisante de la zone linéaire, dans notre cas $L_m = 0.1028\text{H}$ et (ω_r) est la vitesse électrique rotorique.

D'autre part et étant donné que la machine fonctionne à vide, la fréquence statorique (f_s) est sensiblement égale à la fréquence de rotation du rotor, l'équation ci-dessous montre la relation linéaire liant la fréquence statorique à la vitesse d'entraînement de l'arbre du rotor:

$$f_s = \frac{N_r * P}{60} \quad (\text{IV.4})$$

IV.3.2 Fonctionnement en charge

Dans cette deuxième partie nous nous intéressons aux caractéristiques de la génératrice connectée à une charge. Il suffit de reprendre le schéma-simulink du fonctionnement à vide et d'y adjoindre la charge. Les courants de sortie de la génératrice ne dépendent plus uniquement des capacités d'excitation mais aussi de la charge insérée.

Vu que le courant de magnétisation dépend principalement de l'énergie réactive fournie par les capacités d'auto-excitation, ce courant est très petit au démarrage de la machine, il augmente graduellement jusqu'à atteindre sa valeur au régime permanent.

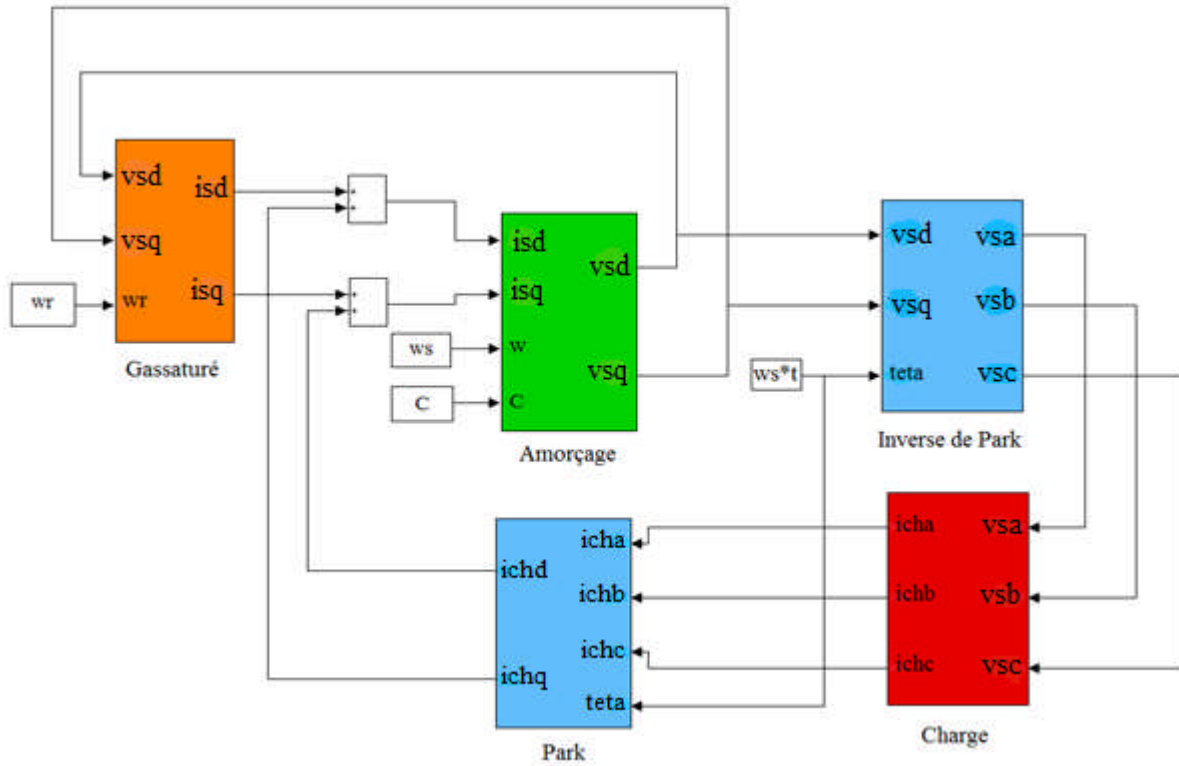
Pour monter l'influence de la charge, nous l'avons introduite après établissement du régime permanent à vide, soit à $t = 1,5$ s (après établissement de l'auto-amorçage).

Nous traiterons dans un premier temps l'introduction une charge équilibrée, nous étudierons ensuite le cas d'une charge déséquilibrée.

A- Charge équilibrée

La charge considérée est équilibrée et purement résistive, les paramètres sont les suivants :

- La charge connectée est équilibrée de valeur $R_{ch} = 50\Omega$.
- La vitesse d'entraînement de la machine est de $N_r = 780$ tr/min.
- La capacité d'auto excitation est de valeur $C = 100\mu\text{F}$.



Les figures (IV.13) à (IV.17), représentent respectivement l'évolution des tensions, courants statoriques, des courants de charges, courants dans les condensateurs et du courant magnétisant en fonction du temps.

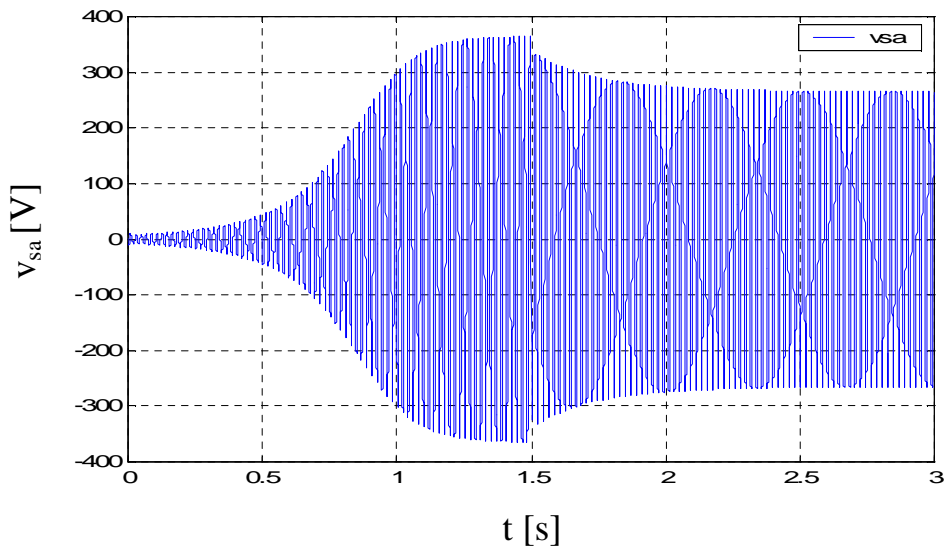


Figure IV.13 : Evolution de la tension d'une phase statorique

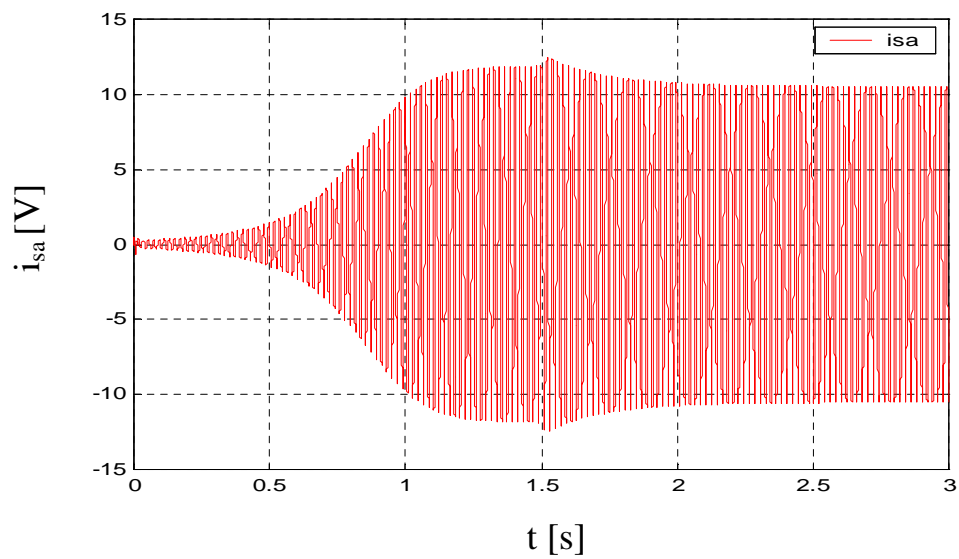
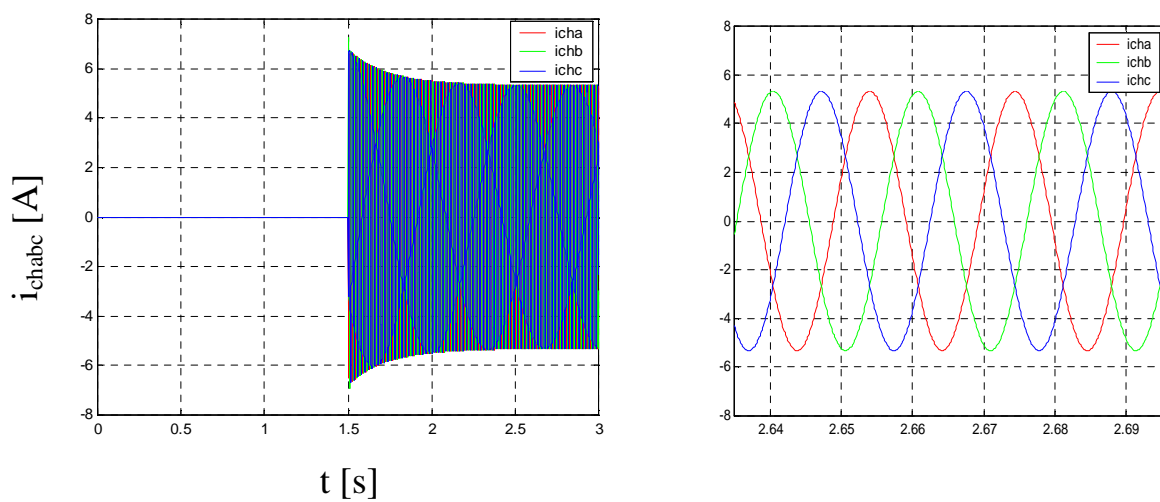


Figure IV.14 : Evolution du courant d'une phase statorique.



a). Evolution des courants de charge

b) Zoom sur les courants de charge

Figure IV.15 : Evolution des courants de charge.

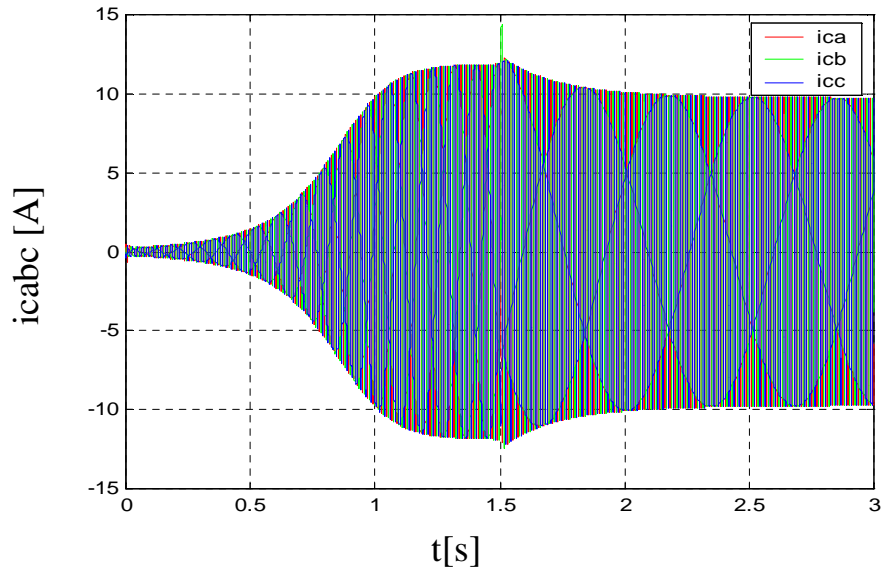


Figure IV.16 : Evolution des courants dans les capacités des trois phases statoriques.

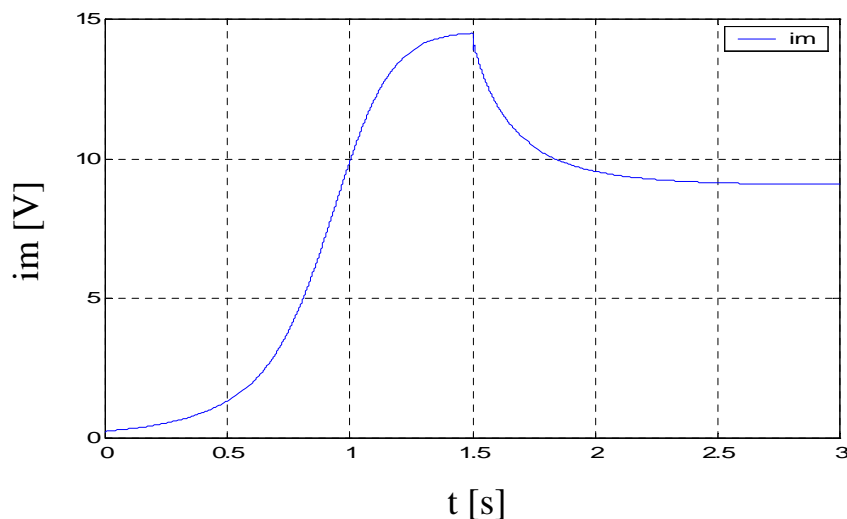


Figure IV.17 : Evolution du courant de magnétisation

A l'instant ($t = 1.5$ s) on branche une charge résistive équilibrée aux bornes de la génératrice auto-excitée. La tension diminue en fonction de la charge insérée à l'instant d'introduction de la charge (**Fig. IV. 13**). Le courant de charge (**Fig. IV.14**) initialement nul, s'instaure et évolue d'une manière sinusoïdale dès l'application de la charge (à $t=1.5$ s) ce qui fait diminuer systématiquement le courant statorique (**Fig. IV.15**) et le courant dans la capacité (**Fig. IV.16**). Le courant magnétisant diminue de la même façon que la tension (**Fig. IV.17**).

Cette diminution de la tension statorique au fur et à mesure que la charge augmente, peut s'expliquer de la manière suivante : pendant le fonctionnement à vide, tout le courant statorique passait par le condensateur, ce qui assurait une magnétisation (puissance réactive)

suffisante au maintien de la tension statorique. A l'introduction de la charge, le courant de charge s'établit et le courant statorique se divise maintenant dans la branche capacitive et la charge. Le courant dans la branche capacitive est nécessairement plus faible qu'en fonctionnement à vide, ce qui diminue l'apport en puissance réactive responsable du maintien de la tension. Cette diminution de la tension statorique fait à son tour chuter le courant statorique et le processus se répète jusqu'à ce qu'un autre point d'équilibre soit trouvé.

Contrairement au fonctionnement à vide, en charge on ne peut pas négliger le glissement, à partir du schéma équivalent on peut déduire l'équation qui lie le glissement et la charge [Mekk] :

$$g = -\frac{R_r}{R_s + R_{ch}} \quad (\text{IV.5})$$

Afin de mettre en évidence l'influence de la charge sur la fréquence des tensions statoriques, nous avons visualisé dans la figure IV.17 des zooms de la tension statorique à vide ensuite à l'introduction d'une charge résistive de 50Ω puis de 35Ω . La fréquence des tensions statoriques est calculée en vertu de la relation IV.6 qui la lie au glissement et à la vitesse de

$$\text{rotation. } \omega_s = \frac{\omega_r}{1 - g} \quad (\text{IV.6})$$

En comparant les figures IV.18-a,b,c, nous remarquons une légère diminution de la fréquence quand la charge augmente (quand la résistance de la charge diminue). Cependant l'influence de la charge sur la fréquence n'est pas très grande par rapport à celle de la vitesse.

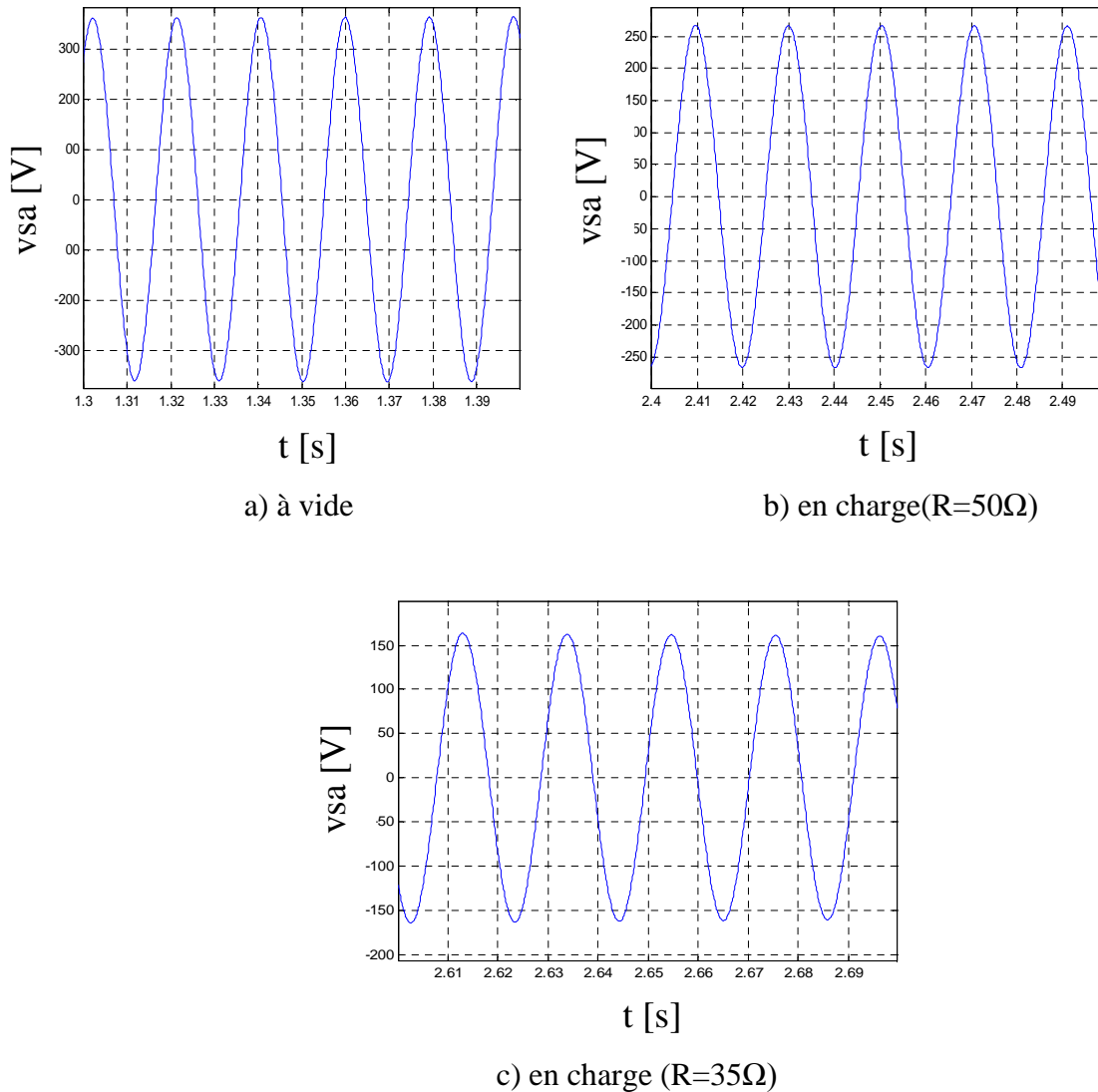


Figure IV.18 : Régime permanent de la tension statorique pour différentes valeurs de la charge

- **Le système de compensation (compound)**

Plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature afin de pallier aux problèmes engendrés par l'insertion de la charge aux bornes de la génératrice, à savoir la démagnétisation et la chute de tension.

Une solution paraissant simple et efficace est celle de l'insertion d'une capacité supplémentaire afin d'ajouter au circuit une puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine en prenant en considération la charge, l'identification de cette capacité supplémentaire dépend de plusieurs paramètres, elle se déduit à partir du schéma équivalent.

Dans notre cas nous avons pris la valeur de la capacité supplémentaire $C_s=20\mu\text{F}$. [IJD].

Nous avons étudié par simulation l'apport de l'insertion d'une capacité supplémentaire à l'instant $t=2,5$ s suivant l'introduction de la charge qui a fait chuter la tension statorique.

Les figures IV.19, IV.20 et IV.21 montrent justement l'évolution respectivement de la tension statorique, du courant statorique et du courant magnétisant en fonction du temps. Nous y remarquons dans le même graphe, l'effet négatif de la charge et l'apport des capacités supplémentaires.

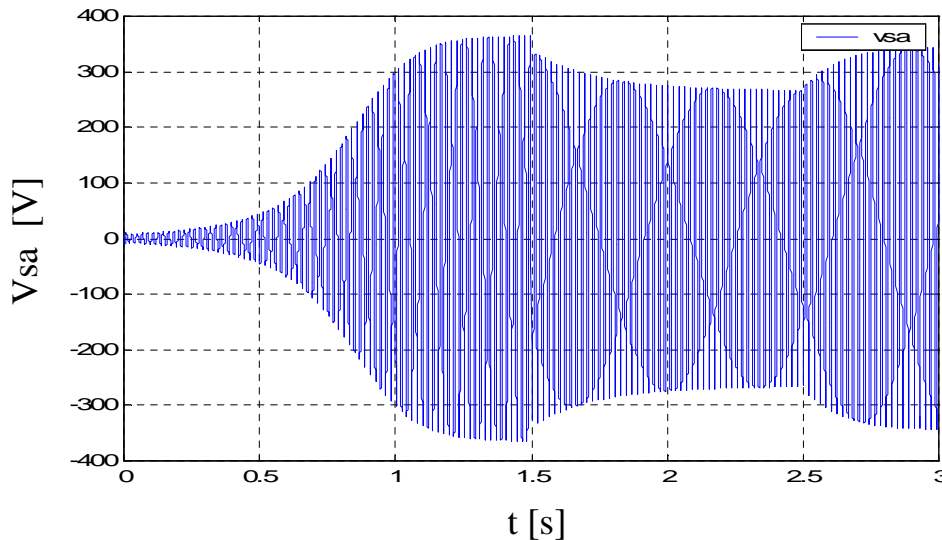


Figure. IV.19. Evolution de la tension d'une phase statorique avec l'introduction du système de compensation à ($t=2.5$ s).

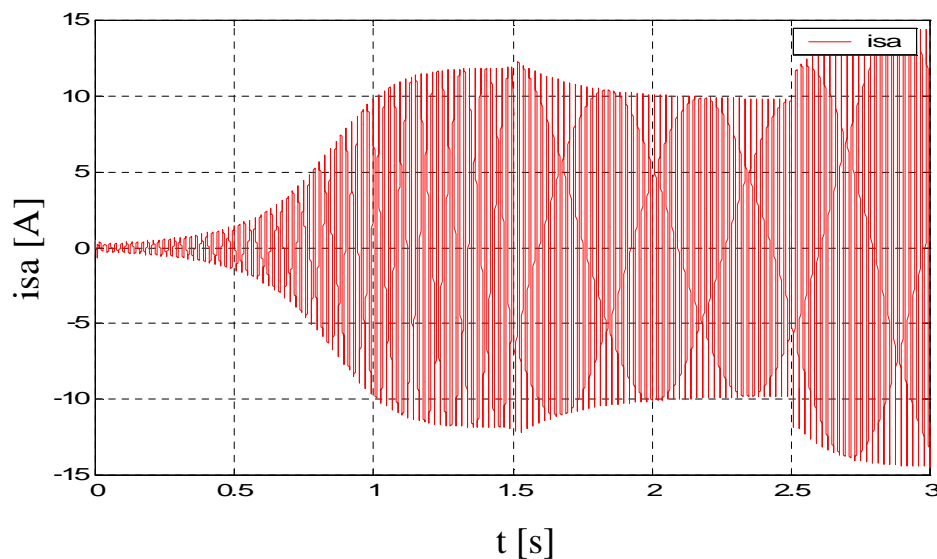


Figure. IV.20. Evolution du courant d'une phase statorique avec l'introduction du système de compensation à ($t=2.5$ s).

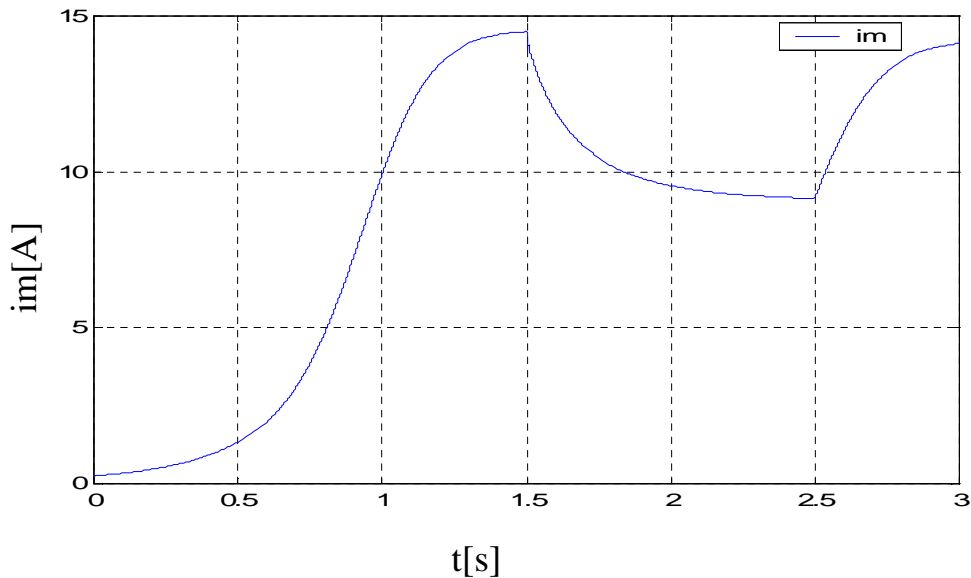


Figure. IV.21. Evolution du courant magnétisant avec l'introduction du système de compensation à ($t=2.5s$).

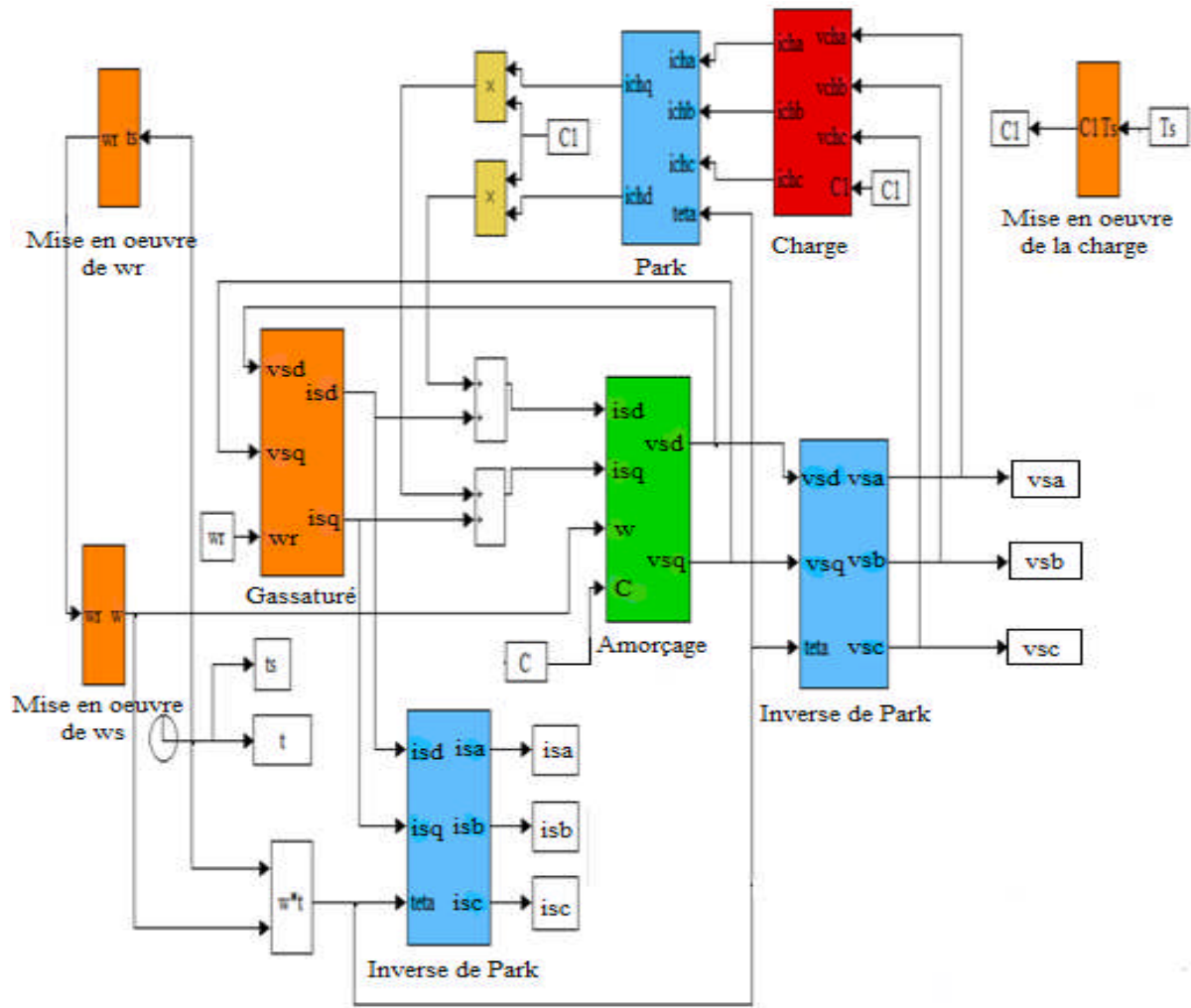
B- Charge déséquilibrée

Le schéma Matlab-Simulink que nous avons adopté est construit de manière à tenir compte du déséquilibre de la charge sans pour autant être obligé de passer par les composantes symétriques (directe, inverse et homopolaire). Cela provient du fait que nous introduisons la charge dans le système abc ou le déséquilibre est automatiquement pris en compte.

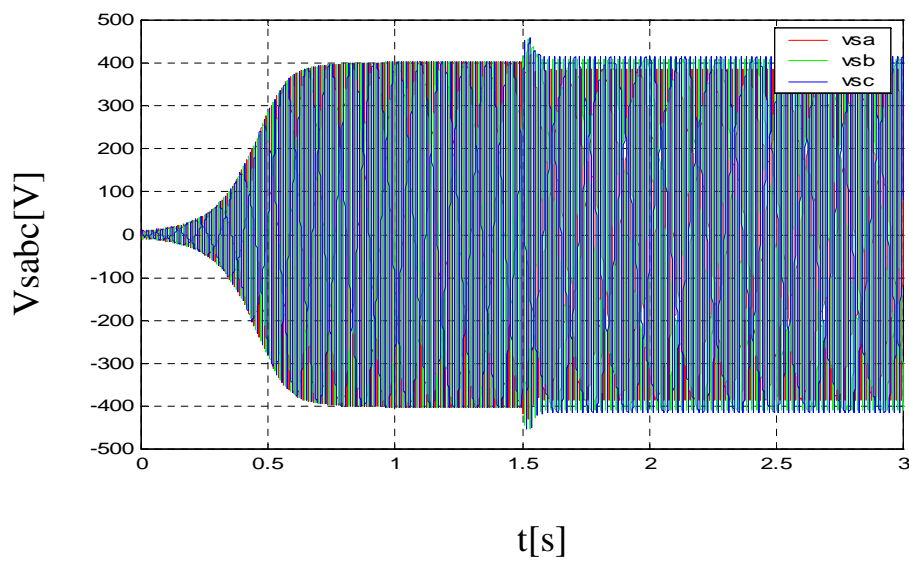
Des tests par simulation seront effectués en considérant une charge déséquilibrée en nature et en niveau, les paramètres adoptés sont les suivants:

- Phase (a) : une résistance $R_{cha} = 38.5\Omega$;
- Phase (b): une résistance $R_{chb} = 50\Omega$ et une inductance $L_{chb} = 24mH$;
- Phase (c): une résistance $R_{chc} = 260\Omega$ et une inductance $L_{chc} = 50mH$.

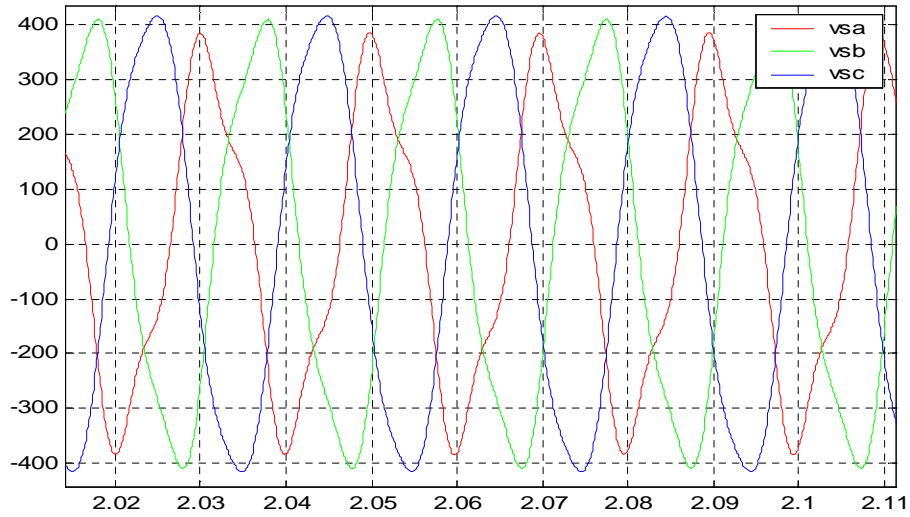
La vitesse de rotation est fixé pour $N_r = 780 \text{ tr/min}$ et la capacité d'auto-excitation $C=120\mu F$.



Les figures IV.22, IV.23 et IV.24 caractérisent le fonctionnement sur charge déséquilibrée de la génératrice asynchrone auto-excitée.

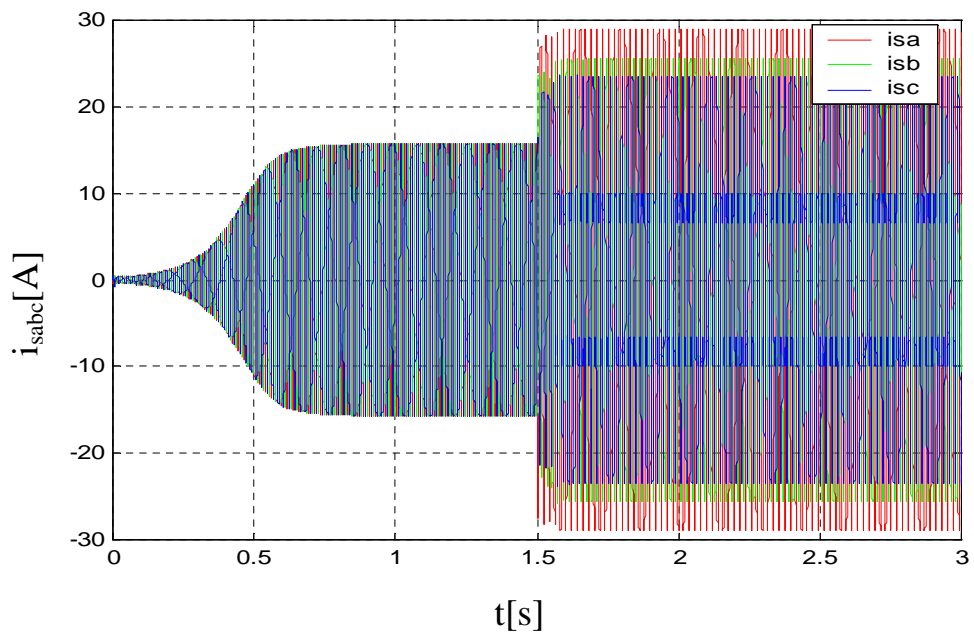


a) Tensions statoriques

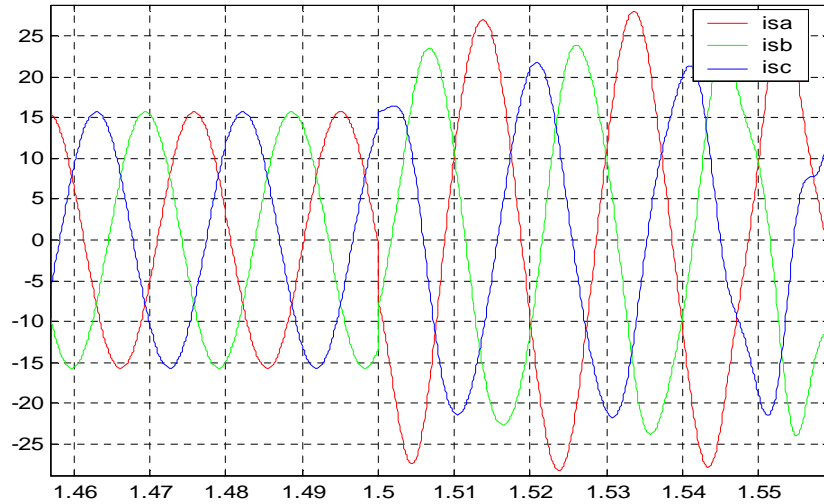


b) Zoom sur les tensions statoriques

Figure IV.22 : Evolution des tensions statoriques

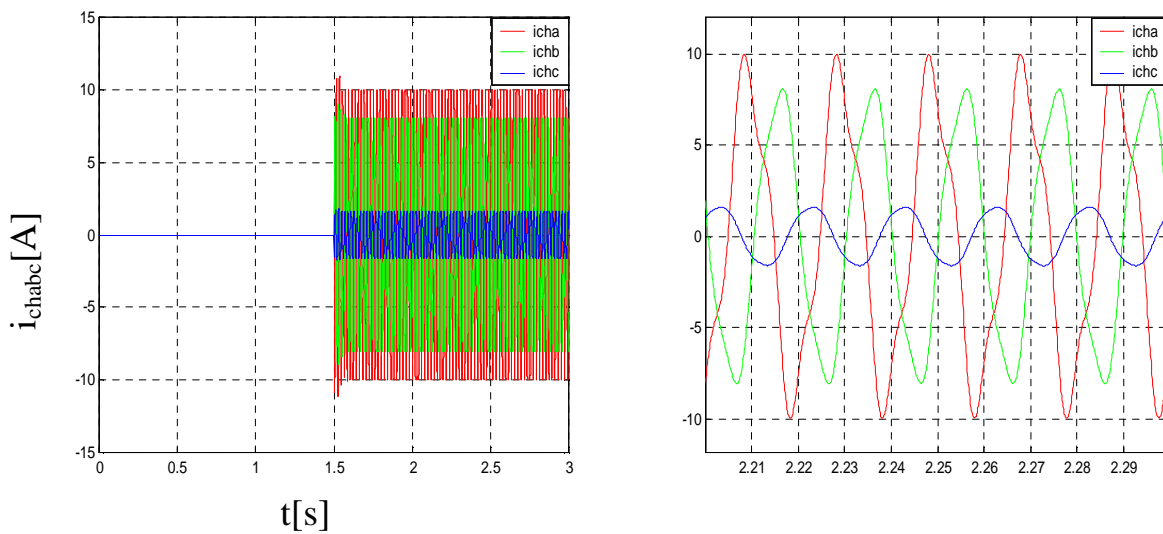


a) Courants statoriques



b) Zoom sur les courants statoriques aux alentours de $t=1,5$ s.

Figure IV.23 : Evolution des courants statoriques



e) Evolution des courants de charge

f) Zoom sur les courants de charge

Figure IV.24 : Evolution des courants de charge.

La figure IV.22 montre l'évolution de la tension statorique. Les trois tensions ont la même forme avant l'introduction de la charge. A l'introduction de la charge déséquilibrée à $t=1,5$ s chaque tension évolue selon la charge branchée ses bornes. Le zoom de la figure IV.22-b

montre cette différence. La même remarque peut être signalée sur les courants statoriques de la figure IV.23.

Les courants de la charge de la figure IV.24 sont initialement nuls, avant de prendre des valeurs en régime permanent en fonction de la nature (R ou RL) et de la valeur de la charge.

IV.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la mise en œuvre des modèles présentés dans le chapitre précédent dans le but de la simulation des deux régimes de fonctionnement (à vide et en charge) de la génératrice auto excitée. Deux types de charges ont été prises en compte : équilibrée et déséquilibrée, charge résistive puis charge résistive-inductive.

Nous avons avant tout mis en relief le phénomène d'auto-amorçage et le rôle joué par la saturation dans le modèle de la génératrice. Les résultats du modèle linéaire ont montré clairement l'impossibilité de son utilisation. Nous avons ainsi pris en compte la saturation par une approximation polynomiale adéquate.

Les tests par simulation du fonctionnement à vide ont montré l'influence de la capacité d'auto-amorçage sur le maintien de la tension statorique. Une capacité minimale des condensateurs est donc nécessaire pour réaliser l'auto-amorçage. Nous avons également montré que la vitesse de rotation a une influence directe sur la tension statorique et nous avons montré la relation permettant de dimensionner la capacité minimale d'auto-amorçage en fonction de la vitesse de rotation de la machine et de la réactance de magnétisation.

L'essai sur charge résistive équilibrée a montré principalement que l'amplitude et la fréquence de la tension statorique chutent à l'introduction de la charge. La chute de tension est d'autant plus grave que la charge est importante (la résistance de charge est faible). L'introduction de capacités supplémentaires (système compound) en série peut pallier à cet inconvénient. Des essais par simulation ont été réalisés dans ce sens.

Les tests par simulation sur des charges déséquilibrées ont confirmé les résultats obtenus sur charge équilibrée et ont montré l'influence de la nature et du niveau de la charge sur l'amplitude et la fréquence des tensions et des courants statoriques.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire était d'étudier la génératrice asynchrone auto-excitée utilisée dans les sites isolés et autonomes, l'étude des différentes caractéristiques de la machine passe par l'élaboration du modèle analytique de cette dernière dans ces deux modèles linéaire et saturé.

Dans le premier chapitre nous avons donné une vue générale sur les systèmes éoliens, en commençant par présenter la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent et donner quelques notions sur ce dernier, ensuite et après avoir cité les différents types d'éoliennes nous avons donné une description générale sur les principaux composants qui constituent cette dernière. Dans une seconde partie de ce chapitre nous avons montré l'intérêt de l'étude aérodynamique pour déterminer l'énergie cinétique du vent recueillie par les pâles de l'éolienne, cette partie nous a permis de déterminer le coefficient qui relie l'énergie du vent est celle transmise à l'arbre de l'éolienne dit coefficient de puissance. Nous avons conclu ce chapitre en classant les différents types d'éoliennes selon leur vitesse et leur coefficient de puissance.

Dans le second chapitre nous avons décrit les différents types d'éoliennes connectées au réseau ainsi que les diverses machines électriques et systèmes associés utilisés pour chaque type d'éolienne, pour des raisons de fiabilité robustesse et prix de revient, nous avons retenu le système utilisant la machine asynchrone à cage pour effectuer son étude dans le cas d'un système éolien isolé.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone auto-excitée en tenant compte du phénomène de saturation, nous avons commencé par donner le principe de fonctionnement de la machine ensuite nous avons donné toutes les étapes qui nous ont permis d'élaborer le modèle final de la génératrice dans le repère de Park. Il nous a fallu prendre en considération la variation de l'inductance de magnétisation en fonction du courant de magnétisation pour pouvoir faire une étude réelle sur la machine.

Afin d'étudier le fonctionnement en charge de la machine nous avons conclu ce chapitre par établir les modèles prenant en considération la charge avec ses deux natures (équilibrée et déséquilibrée).

La mise en oeuvre du modèle de la machine, la simulation du fonctionnement en génératrice, l'obtention et l'interprétation des résultats ont fait l'objet du quatrième chapitre.

Nous avons étudié l'influence de la capacité d'auto-amorçage et de la vitesse de la machine sur son auto-amorçage, nous avons également analysé l'influence de l'insertion brusque de la

charge et nous avons proposé la solution de compensation (compound) en donnant les résultats de simulation de cette dernière.

Certaines remarques relatives au fonctionnement de la génératrice asynchrone auto-excitée méritent d'être citées, en l'occurrence :

- La prise en compte de la saturation dans le modèle de la génératrice asynchrone auto-excitée est une nécessité, le modèle linéaire ne marche pas.
- Les capacités des condensateurs d'auto-amorçage et la vitesse de rotation ont une influence notable sur l'amplitude en régime permanent et sur la durée du régime transitoire de la tension statorique.
- Il existe une valeur minimale de la capacité des condensateurs d'auto-amorçage au dessous de laquelle l'amorçage ne peut avoir lieu. Cette limite inférieure est inversement proportionnelle au carré de la vitesse de rotation et à l'inductance magnétisante de la machine.
- La charge fait chuter la tension statorique et il existe une charge critique au delà de laquelle la machine se désamorce.
- La fréquence des grandeurs statoriques diminue quand la charge augmente, cette diminution n'est pas très prononcée, par contre elle est fortement liée à la vitesse de rotation. Cette dernière doit donc être maintenue constante.
- L'étude analytique des caractéristiques du fonctionnement en charge de la génératrice asynchrone auto-excitée fonctionnant en site isolé est presque impossible et les solutions ne peuvent être que numériques. En effet, les équations régissant le fonctionnement en charge de cette génératrice sont au minimum du troisième ordre.

Comme suite à notre travail, nous pouvons citer :

- L'identification des paramètres d'une machine asynchrone à cage dans le but de son utilisation en génératrice auto-excitée.
- Tracé des caractéristiques en charge expérimentales d'une génératrice asynchrone auto-excitée réelle et comparaison avec les caractéristiques à obtenir numériquement.

- Simulation et réalisation expérimentale de la commande par convertisseur statique d'une génératrice asynchrone auto-excitée. Cette commande aura pour rôle d'adapter automatiquement les capacités d'auto-amorçage en fonction de la charge insérée pour assurer une tension statorique stable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [Abd] A. Abdelli « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de Toulouse, France 2007.
- [Ben] A. Benahcene et M. Boumezber « Régulation de la Puissance Active et Réactive d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Sétif, Algérie 2010.
- [Bou] A. Bouhedda « Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne », Mémoire de Mgister en électrotechnique de l'université de Tizi-Ouzou, Algérie 2011.
- [Boy] A. Boyette « Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec Système de Stockage pour la Production Eolienne », Thèse de Doctorat de l'Université de Henry Poincaré Nancy 1, France 2006.
- [Cou] V. Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multi-source à base d'éolienne et de stockage d'énergie connecté au réseau électrique », Thèse de doctorat de l'université d'Arts et Métiers Paris, « N° : 2008-ENAM-0027 ».
- [Dav] A. Davigny « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat de l'université de Lille 1, France 2007.
- [Dje] Dj. Djemai, H .Djebrani et S. Driche « Modélisation et Simulation d'un Générateur Eolien Connecté au Réseau » ; Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Tizi-Ouzou, Algérie 2008.
- [EgE] Energie Eolienne « <http://fr.wikipedia.org/w/index.php>».
- [Fox] B. Fox et Coll « Energie Eolienne et Intégration au Réseau » ; « Elt 191 » Livre disponible au niveau de la bibliothèque de la faculté Génie Electrique de l'Université de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [Idj] K. Idjdarene « Contribution à l'Etudes et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes » ; Thèse de doctorat à l'université de Béjaia (Algérie) en collaboration avec l'université de Lille1 (France).

- [Lam] L. Lamri « Production Décentralisée de l'Energie Electrique : Modélisation et Contrôle d'une Génératrice Asynchrone Auto Excitée » ; Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie 2010.
- [Mekk] N. Mekkaoui « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » ; Mémoire de Magister de l'Université de Batna, Algérie 2004.
- [Poi] F. Poitiers « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne :
-Machine asynchrone à cage autonome
-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France 2003.
- [Sak] A. Saki et M. Belaidi « Etude d'un Générateur Asynchrone dans la Production d'Energie Electrique par Eolienne », Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'El-Harrach, Algérie 2006.
- [Wil] T. Wildi, G. Sybille, « Électrotechnique », 4^{ème} édition.
- [Yac] Y. Nait Mohend et Y. Ghezali « Etude de la Conversion de l'Energie Eolienne à base de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) ; Mémoire de Master en Electrotechnique de l'Université de Tizi-Ouzou, Algérie 2011.

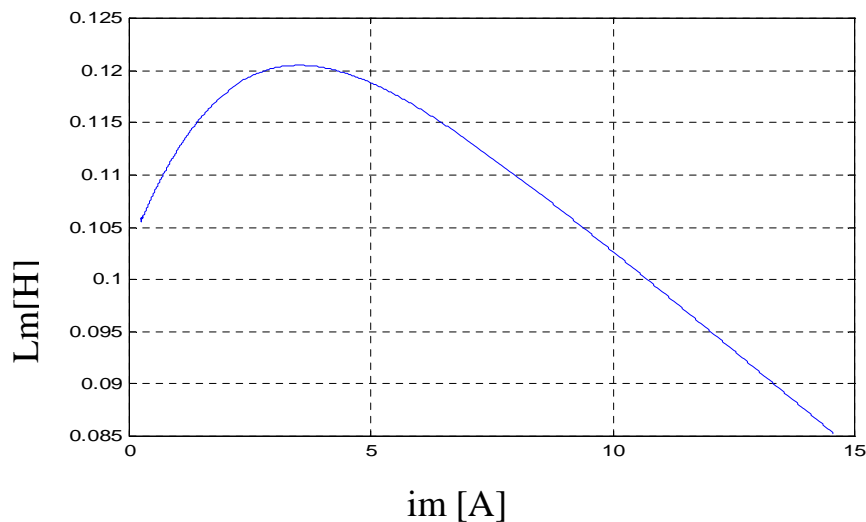
Annexes

❖ Paramètres de la machine asynchrone modélisée

- Rotor de type de cage d'écureuil
- 4 paires de pôles
- 230/400 V – 23,8/13,7 – 5,5 kW – 50 Hz – 690 tr/mn
- $R_s = 1,07131 \Omega$
- $R_r = 1,29511 \Omega$
- $l_s = 8,9382 \text{ mH}$
- $l_r = 4,8613 \text{ mH}$

❖ Approximation polynomiale de la mutuelle inductance en fonction du courant de Magnétisation

Afin d'avoir une meilleure approximation polynomiale de la mutuelle inductance en fonction du courant de magnétisation, Nous avons opté pour le polynôme de degré 12. Dans ce qui suit, nous présentons la caractéristique $L_m(i_m)$



$$\begin{aligned}
 L_m = & 0.11183340 \cdot 10^{-15} \cdot I^{12} - 0.82136391 \cdot 10^{-14} \cdot I^{11} + 0.25898579 \cdot 10^{-12} \cdot I^{10} - \\
 & 0.45793988 \cdot 10^{-11} \cdot I^9 + 0.49706029 \cdot 10^{-10} \cdot I^8 - 0.10761433 \cdot 10^{-7} \cdot I^7 + 0.31209005 \cdot 10^{-6} \cdot I^6 - \\
 & 0.64246433 \cdot 10^{-6} \cdot I^5 - 0.75989080 \cdot 10^{-4} \cdot I^4 + 0.11982646 \cdot 10^{-2} \cdot I^3 - 0.81825872 \cdot 10^{-2} \cdot I^2 + \\
 & 0.20977397 \cdot 10^{-1} \cdot I + 0.10289827.
 \end{aligned}$$

Avec :

$$I = \sqrt{\quad}$$

I : est le courant efficace et i_m est le courant de magnétisation
