

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de master académique en électrotechnique

Option: Machines Electriques

Réalisé par :

BRAHMI Fairouz

OULD BELKACEM Nadia

Thème

**Modélisation, identification et régulation de
tension d'une génératrice asynchrone
auto-excitée**

Membres de jury :

M^{me} F.MEGHERBI-BITAM

Professeur, UMMTO, présidente

M S.HADDAD

Professeur, UMMTO, promoteur

M^{elle} R.KACHENOURA

Maitre de Conférence Classe B, UMMTO, examinatrice

M M.SI BRAHIM

Maitre de Conférence Classe B, UMMTO, examinateur

Promotion 2016/2017

Remerciements

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à Mr. HADDAD Salah, professeur au département d'électrotechnique, qui nous a proposé ce sujet, nous a orientées le long de la réalisation de ce mémoire, nous à prodigué les précieux conseils, qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous tenons également à remercier vivement Mr SI BRAHIM Madjid et Mr ROUAS Rabah et toute personne qui nous a aidées à élaborer et à réaliser ce mémoire.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation, nos sincères remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis pour leur soutien de près ou de loin.

Dédicaces

A mes très chers parents

A mes sœurs Dyhia et Ouiouiz

A mon frère Nadjib

A toi « yema Zineb »

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de « vava Djafer »

A mes tantes et oncles Kahina , Dalila , Myassa, Sabrina ,

Faroudja , Hacen et Abd El Rahman

Leurs mari(e)s et enfants surtout

Yasmin , Ikram , Abd El Raouf , Rayan , Nabil , Salim ,

Sofiane , Adel , Youva , Meriem , Djafer , Zineb , Amar ,

Farid et Abd Allah

Et surtout « Nabil » mon mari pour son aide et patience

A ma belle famille

A tous mes amis : Malika, Nadia , Saida, Lydia , Djoudjou ,

Fazia , koukou , Cylia , Lynda , Mhand et Juba.

Brahmi Fairouz .

Dédicaces

A mes chers parents

A mes sœurs et frères

A toute ma famille

A mes amis

Ould Belekacem Nadia

Modélisation, identification et régulation de tension d'une génératrice asynchrone auto-excitée

Mots-clés : Energie éolienne, Turbine éolienne, génératrice asynchrone, Auto-excitation, Banc de condensateurs, Modélisation, Identification, Simulation.

Résumé :

La recherche de systèmes de conversion des énergies renouvelables est le thème d'actualité par excellence ces dernières années. En effet face à la perspective d'épuisement des énergies fossiles, le monde industriel et de la recherche se divise en deux grandes écoles : la première propose d'orienter la recherche vers le tout renouvelable (énergie par essence inépuisable), tandis que la seconde prône l'utilisation optimale des systèmes existants et maîtrisés de production d'énergie. Le travail que nous nous proposons de développer se situe parmi la première école et se fixe comme objectif l'étude d'une chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique en utilisant la machine asynchrone fonctionnant en génératrice.

Dans le cadre de ce mémoire de Master, nous allons modéliser un ensemble composé d'un générateur asynchrone auto-excité GAAE, d'un pont redresseur à diodes, d'un hacheur et d'un régulateur de tension. Cet ensemble est destiné à alimenter un site isolé.

Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens	
I. Introduction	03
II. Constitution et différents types d'éolienne	03
II.1. Constitution d'une éolienne	03
II.2. Accouplement mécanique de l'éolienne	06
II.3 Différents types d'éoliennes	06
III. Chaines de conversion de l'énergie éolienne	08
IV. Systèmes éoliens à base d'une génératrice asynchrone auto-excitée	10
IV.1 Les éoliennes connectées au réseau électrique	10
IV.2 Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome	15
V. Conclusion	22
Chapitre II : Modélisation d'une machine asynchrone auto excitée	
II.1 Introduction	23
II.2 Description	23
II.2.1 Définition des angles	24
II.2.2 Equations électriques (dans les axes a,b,c)	24
II.2.3 Ecriture matricielle des équations électriques	24
II.2.4 Transformation de Park	24
II.2.5 Equations magnétiques dans les axes a,b,c	25
II.2.6 Equations magnétiques dans les axes d et q	26
II.2.7 Equations électriques dans les axes d et q	26
II.3 Equations électriques dans les axes d et q dans les trois référentiels	27
II.3.1 Référentiel immobile par rapport au stator	27
II.3.2 Référentiel immobile par rapport au rotor	27
II.3.3 Référentiel immobile par rapport au champ tournant	27
II.4 Modèle dynamique de la machine asynchrone en tenant compte de la saturation	28
II.4.1 Equations électriques	28
II.4.2 Equations des flux	29
II.5 Construction du schéma Matlab Simulink	32
II.6 Le processus d'auto-amorçage	35
II.6.1 Description du phénomène d'auto-amorçage	35
II.6.2 Modélisation du phénomène d'auto-amorçage	35

Sommaire

II.7	Résultats de simulation	36
II.8	Conclusion	37

Chapitre III : Identification des paramètres d'une machine asynchrone auto excitée

III.1	Introduction	38
III.2	Identification des paramètres de la machine asynchrone à cage	38
III.2.1	Le schéma équivalent	38
III.2.2	Mesure de la résistance statorique	38
III.2.3	Essai à rotor bloqué	39
III.2.4	Essai à vide	40
III.2.5	Essai au synchronisme	41
III.2.5.1	Identification de l'inductance magnétisante (L_m)	41
III.3	Conclusion	43

Chapitre IV : Simulation de la chaine de conversion

IV.1	Introduction	44
IV.2	Modèles du redresseur à diodes et du hacheur	44
IV.2.1	Description de l'ensemble GAAE_Redresseur_Hacheur_Charge	44
IV.2.2	Redresseur à diodes	44
IV.2.3	Hacheur série	45
IV.3	Simulation et interprétation des résultats de l'ensemble GAAE_Red_charge	47
IV.3.1	Fonctionnement à vide	48
IV.3.2	Effet de branchement de charge	48
IV.3.3	Effet de variation de la vitesse de rotation	49
IV.4	Résultats de l'ensemble Générateur Asynchrone_redresseur_Hacheur	49
IV.4.1	Vitesse Variable	50
IV.4.2	Charge Variable	51
IV.5	Conclusion	52

Chapitre V : Régulation de tension de la chaine de conversion

V.1	Introduction	52
V.2	Régulation proportionnelle et intégrale (PI)	52
V.2.1	Description du système de régulation	52
V.3	Simulation et interprétation des résultats	56
V.4	Conclusion	57

Sommaire

Conclusion générale

Références

Annexe A

Annexe B

Introduction générale

Introduction générale

La limite en termes de durabilité des énergies fossiles, leur impact indéniable sur le climat et leur cout qui augmentera en corrélation avec leur épuisement progressif, a poussé le monde industriel et celui de la recherche à s'adapter d'une manière urgente face aux nouvelles règles dictées par cette limite. L'alternative nucléaire pourrait être envisagée pour se substituer aux centrales thermiques, vu ses nombreux avantages par rapport à ces dernières, mais la question environnementale, le risque d'accident nucléaire et le traitement et l'enfouissement des déchets, rendent cette solution très problématique.

Les énergies renouvelables sous toutes leurs formes ont l'avantage d'être inépuisables, respectent l'environnement et ne présentent pas de risque. Elles seront à long terme incontournables. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire et l'énergie éolienne occupent une place prépondérante. Exploitées d'une manière optimale, elles répondraient aux exigences sans cesse croissantes en énergie du monde actuel. Par exploitation optimale, nous entendons la recherche de moyens d'extraire le maximum de puissance du soleil et du vent et le développement de dispositifs de stockage d'énergie.

Le travail que nous nous proposons de développer fait partie d'un système hybride combinant deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent (voir figure 1).

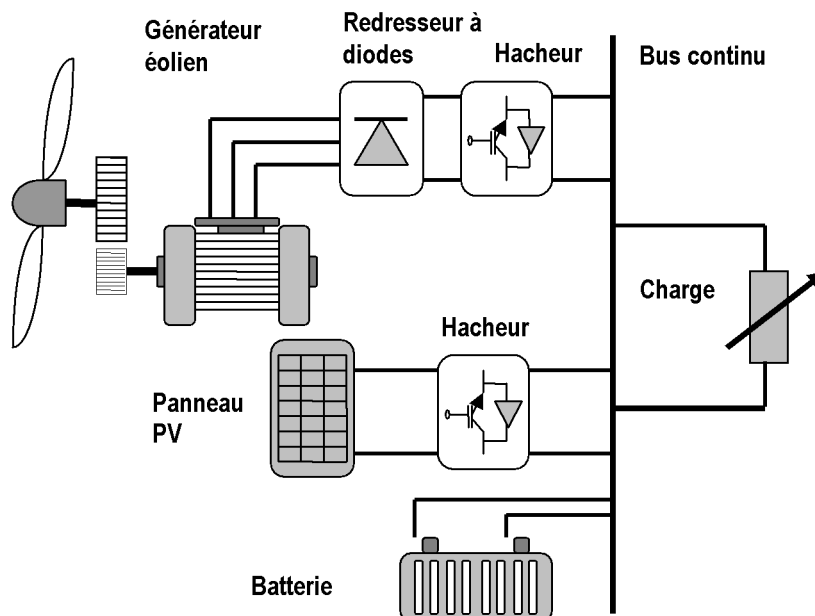


Figure 1 : Schéma du système global à énergies renouvelables

Ce système hybride éolien-photovoltaïque sert à alimenter en énergie électrique les zones isolées dont le raccordement au réseau est très coûteux et non rentable. En cas d'absence de soleil et de vent, des batteries de stockage et en dernier recours un groupe électrogène serviront d'alimentation de secours.

Nous nous occuperons exclusivement du système éolien à base d'un générateur asynchrone auto-excité (GAAE), en anglais Self Excited Induction Generator (SEIG).

Le système complet que nous nous proposons d'étudier est composé :

- D'un générateur asynchrone auto-excité par un banc triphasé de condensateurs.
- D'un redresseur triphasé à diodes, muni d'un filtre de tension.
- D'un hacheur muni d'un filtre de tension.
- D'un régulateur de tension.

Nous avons structuré notre mémoire en cinq chapitres dont nous énumérons respectivement les contenus dans ce qui suit.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

Nous présenterons dans le deuxième chapitre, le modèle dynamique de la SEIG en tenant compte de la saturation. L'effet de la saturation sur l'auto-amorçage à vide de la SEIG sera expliqué à travers quelques tests par simulation.

La prise en compte de la saturation nécessite une identification précise des paramètres électriques de la SEIG, en particulier la caractéristique de magnétisation ou l'évolution de l'inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant. Le troisième chapitre sera donc consacré à l'identification des paramètres électriques de la SEIG.

Le quatrième chapitre sera dédié à la modélisation de l'ensemble redresseur à diodes – hacheur série – charge RL. Nous présenterons les résultats de quelques tests par simulation de cet ensemble soumis à des variations de la charge et la vitesse de rotation.

Les variations de la charge et de la vitesse de rotation engendrent de fortes variations de l'amplitude et de la fréquence des tensions générées par la SEIG. Ce système ne peut donc pas être utilisé en tant que générateur autonome. L'objet du cinquième chapitre est de pallier à cet inconvénient par l'adjonction d'un régulateur de tension au hacheur. Des résultats de tests par simulation montreront l'apport de ce régulateur vis-à-vis des variations de la charge et de la vitesse de rotation.

Nous clôturons notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

I. Introduction

L'échauffement différentiel de la surface terrestre par le soleil entraîne le déplacement d'importantes masses d'air sur la terre, c'est-à-dire le vent. Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en électricité ou en d'autres formes d'énergie.

L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique puis électrique, en tout lieu suffisamment venté. Les applications de l'énergie éolienne sont variées mais la plus importante consiste à fournir de l'électricité.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux éoliennes à base de la machine asynchrone auto-excitée. Nous présenterons les éléments constituant une éolienne, les différents types d'éoliennes pour terminer par quelques structures d'éoliennes utilisant exclusivement la génératrice asynchrone auto-excitée. [1]

II. Constitution et différents types d'éoliennes

II.1. Constitution d'une éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif électromécanique qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.[2]

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux :

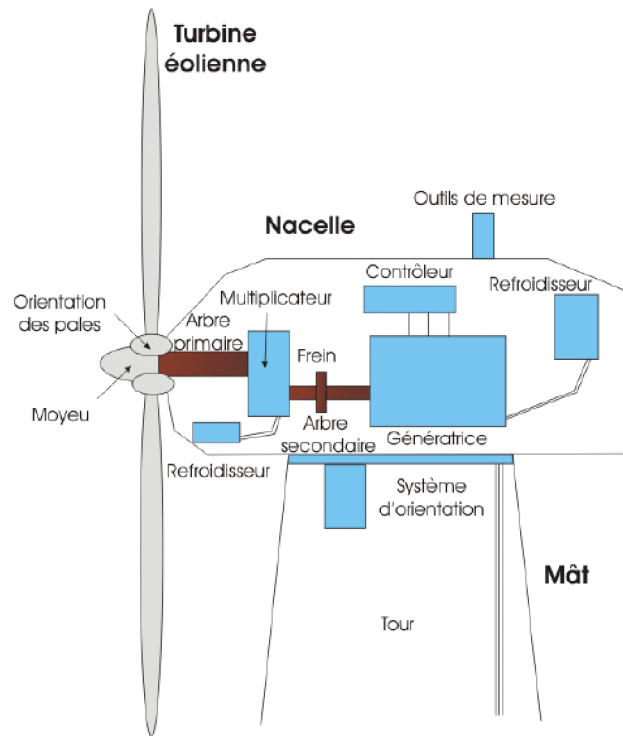


Figure .I.1 Constitution d'une éolienne à axe horizontal [3]

II.1.1. Le mât

Le mât est généralement un tube en acier, son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi il permet de placer le rotor à une hauteur élevée au-dessus du sol, où la vitesse du vent est supérieure et les effets des obstacles locaux sont moindres, améliorant ainsi le captage de l'énergie[3], de plus il permet d'accéder à la nacelle pour des opérations d'entretiens et d'inspections. Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât peut mesurer entre 10 et 80 m de haut et ceci dépend du type d'éolienne et du site d'implantation. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres de haut, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages.[4] Trois grands types de tour peuvent se rencontrer, mât haubané, tour en treillis et tour tubulaire. La tour a une forme légèrement conique ou, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.

II.1.2. Le rotor

Le rotor est un ensemble constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Son rôle est de capter l'énergie du vent et la transformer en énergie mécanique. Les pales doivent être légères, solides et durables, pour résister à l'action des éléments. On les construit habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, en plastique renforcé ou en bois [3]. Le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 et plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite [4]. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour, des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. A ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation des pales permettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Par contre pour les rotors à vitesse variable le dispositif d'orientation des pales est simplifié et une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

II.1.3. La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique :

- Arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur.
- Le frein à disque, qui est différent du frein aérodynamique et qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
- Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone.
- Les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [2].

II.2. Accouplement mécanique de l'éolienne

II.2.1. Eolienne à attaque directe

Le principe de l'attaque directe est de coupler la génératrice directement sur l'hélice. Cette dernière fonctionne à la vitesse basse du rotor, ce qui permet de supprimer le multiplicateur, qui est le siège de perte de puissance et source de bruit. Ce type de génératrice doit tourner à des vitesses comprises entre 18 et 50 tr/min. Pour produire de l'électricité avec ce type de machines, il faut que la génératrice possède un grand nombre de pôles permettant d'obtenir une fréquence de l'ordre de 50Hz.[5]

II.2.2. Eolienne à attaque indirecte

Dans ce type d'éoliennes, la vitesse de rotation de la turbine est relativement faible, et le couple mécanique est élevé en sortie d'arbre de la turbine. Les machines électriques sont dimensionnées en couple, et on cherche à les faire tourner rapidement pour atteindre des puissances massiques satisfaisantes.

C'est pourquoi on intercale un multiplicateur mécanique à engrenages entre la turbine et la génératrice ; cette dernière est souvent une machine asynchrone à cage ou alors une machine à double alimentation pour un fonctionnement à vitesse variable économique.[6]

II.3. Différents types d'éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal.

II.3.1. Eolienne à axe vertical

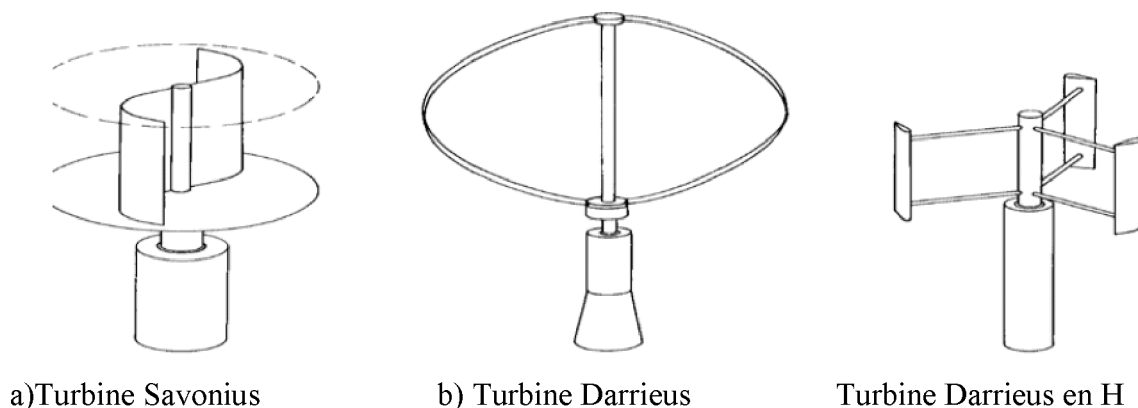


Figure. I.2 Différentes formes d'éoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au

stade de l'industrialisation ; le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent les avantages et les inconvénients suivants :

II.3.1.A. Avantages de la structure à axe vertical [5]

- ✓ La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- ✓ Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- ✓ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

II.3.1.B. Inconvénients de la structure à axe vertical [5]

- ✓ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- ✓ La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par les reliefs.
- ✓ Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

II.3.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.[7]

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important. Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal :

II.3.2.A. Structure «Amont »

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

II.3.2.B. Structure « Aval »

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

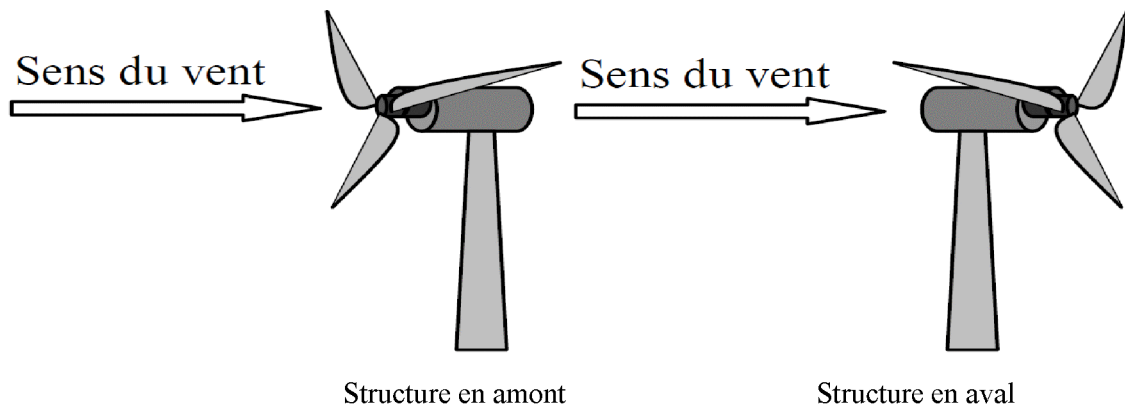


Figure. I.3 Différentes structures d'éoliennes à axe horizontal

III. Chaîne de conversion de l'énergie éolienne

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir :

- ✓ Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique
- ✓ Une transmission mécanique
- ✓ Une génératrice
- ✓ Un système de liaison électrique

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes :

- ✓ Les éoliennes raccordées au réseau.
- ✓ Les éoliennes autonomes.

III.1. Principe de conversion de l'énergie éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 paires de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par le générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât.

Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public.

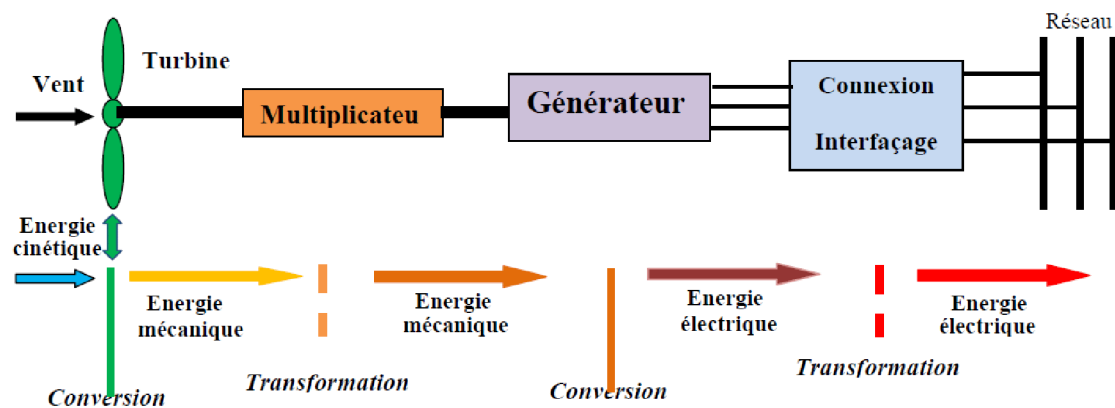


Figure. I.4 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

III.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

III.2.1. Avantages [8]

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimales.

III.2.2. Inconvénients [8]

- ✓ La nature aléatoire du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- ✓ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

IV. Systèmes éoliens à base d'une génératrice asynchrone auto-excitée

Dans cette partie, nous monterons quelques systèmes éoliens utilisant la génératrice asynchrone auto-excitée.

IV.1. Les éoliennes connectées au réseau électrique

IV.1.1. Fonctionnement à vitesse fixe

IV.1.1.A Machine asynchrone à cage

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique (figure II.5). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales.[7]

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme ($g=0$). Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure I.5).

La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure I.5 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

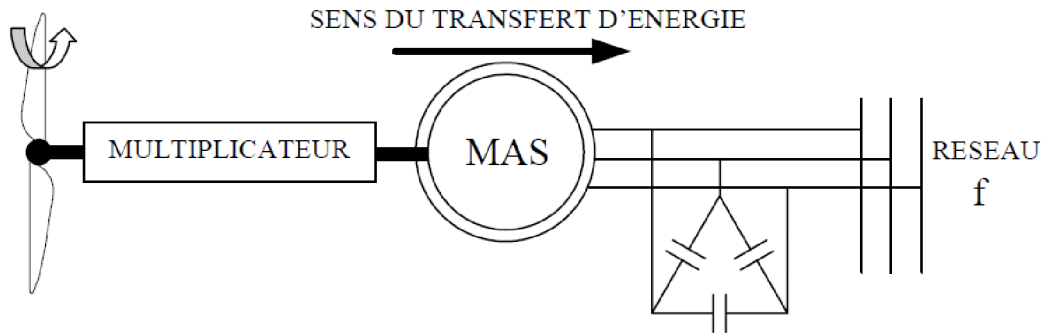


Figure. I.5 : Eolienne à base d'une MAS connectée au réseau

Parmi ses avantages [8] :

- Elles possèdent un système électrique simple, car elles n'ont pas besoin de système électronique de commande.
- Elles ont une très grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Moins chères

Ses inconvénients sont :

- Puissance extraite non optimisée.
- Maintenance de la boîte à vitesse.
- Pas de contrôle de l'énergie réactive.
- Magnétisation de la machine imposée par le réseau.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. La machine est naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier aux variations de vitesse du vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

IV.1.1.B Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif utilisant la machine asynchrone à cage, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I-6).

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses du vent.

Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses du vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

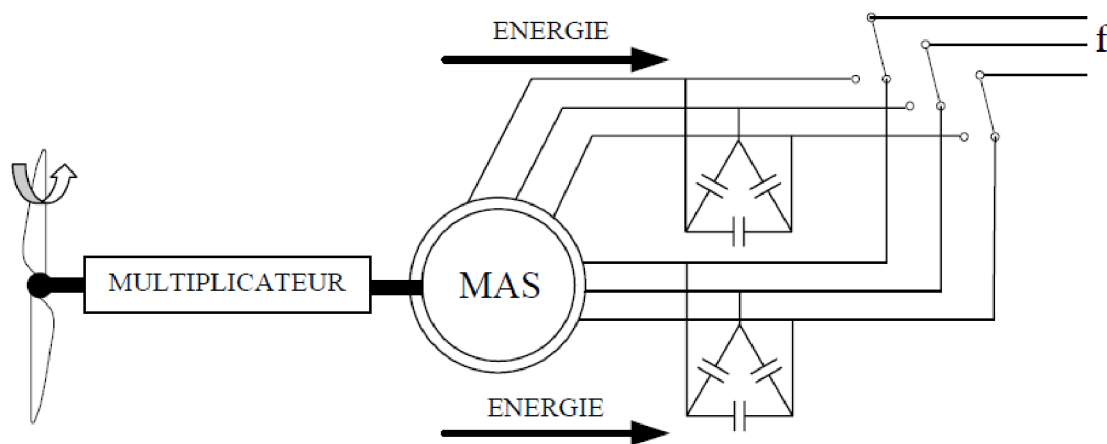


Figure .I.6 : Machine asynchrone à double stator

IV.1.2. Fonctionnement à vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, d'un multiplicateur, d'un générateur et d'un convertisseur électronique de puissance.

Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants :[8]

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité.

- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent (augmentation du rendement énergétique).
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesses de vent élevées. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- Elles réduisent le bruit lors du fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente.
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien.

Ses inconvénients sont :[8]

- Utilisation de machines spéciales.
- Convertisseur de puissance « complexe ».
- Nécessité d'utiliser un convertisseur de fréquence.
- Gestion du transfert de puissance entre le redresseur à MLI et l'onduleur (régulation du bus continu) et le placement au point de puissance optimale de l'éolienne.

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent à vitesse variable.

IV.1.2.A Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

La structure représentée sur la figure I.8 autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée en tension continue. L'onduleur permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la

magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur montré par la figure (I.8).

Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire leur durée de vie. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif.

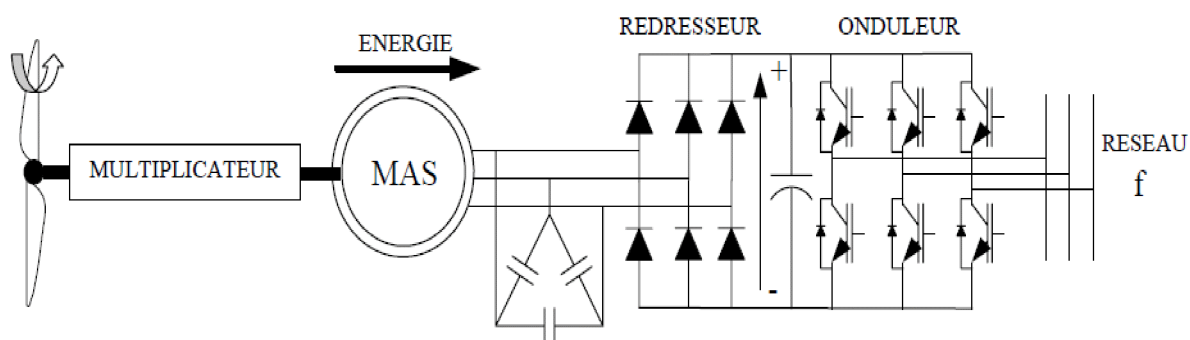


Figure I.7 : Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble Redresseur – Onduleur à fréquence fixe

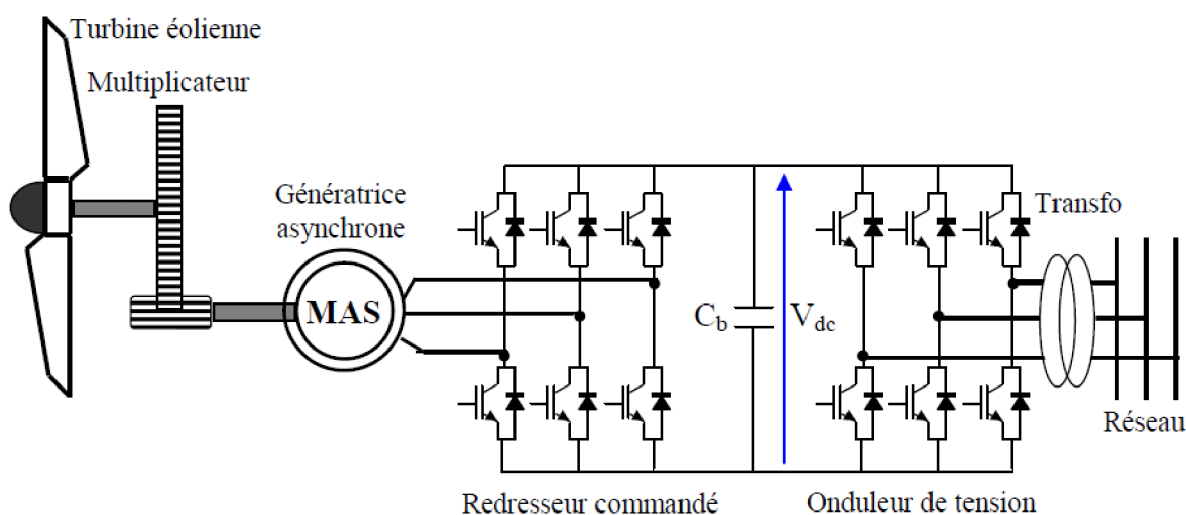


Figure I.8 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable

IV.2. Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, constituent encore des limitations à une exploitation plus large.[9]

La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible. De ce fait, la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de générateurs asynchrones à cage de part leur faible coût, leur robustesse et leur standardisation. Ces derniers sont souvent associés à une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation.

Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages. Dans cette partie, nous présenterons les différentes solutions de conversion d'énergie éolienne utilisées dans ces applications de petites puissances pour les deux systèmes isolés et autonomes.[10]

IV.2.1 Machine asynchrone auto-excitée par condensateurs fixes

L'utilisation de la machine asynchrone à cage connectée à des capacités a l'avantage de la simplicité de mise en œuvre et le faible coût dû à l'absence de convertisseurs statiques. [11]

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 [12]. 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 magnétiser.

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 statoriques déséquilibrés.

Une autre solution consiste à utiliser un banc de capacités constitué de 3 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.

IV.2.1.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.

Plusieurs manières de branchement de la charge existent : [13], [14], [15]

- La charge est en parallèle avec la capacité d'excitation (Figure I.9.a)
- La charge est entre les deux autres phases où la capacité n'est pas branchée(Figure I.9.b)

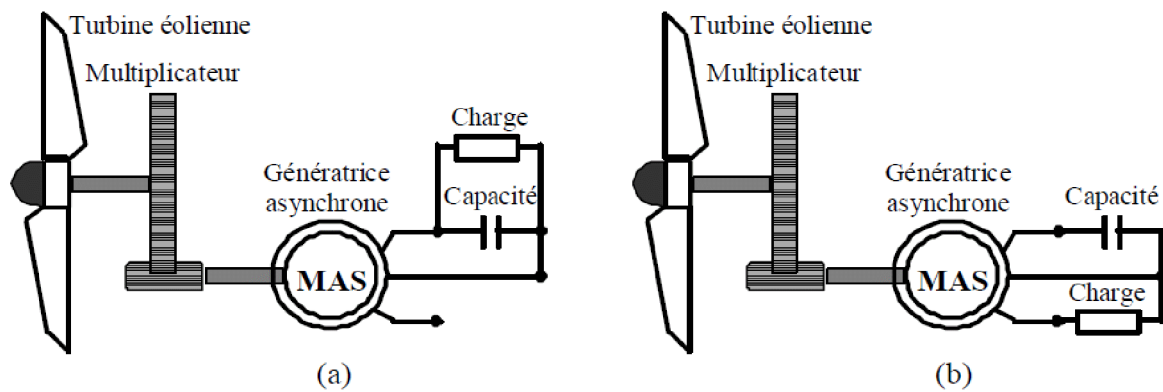


Fig. I.9 : Machine asynchrone auto-excitée avec un seul condensateur

IV.2.1.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.

Beaucoup de travaux ont été consacrés à l'étude de la structure présentée dans la figure I.10, Dans d'autres travaux la connexion des condensateurs est en triangle. [16]

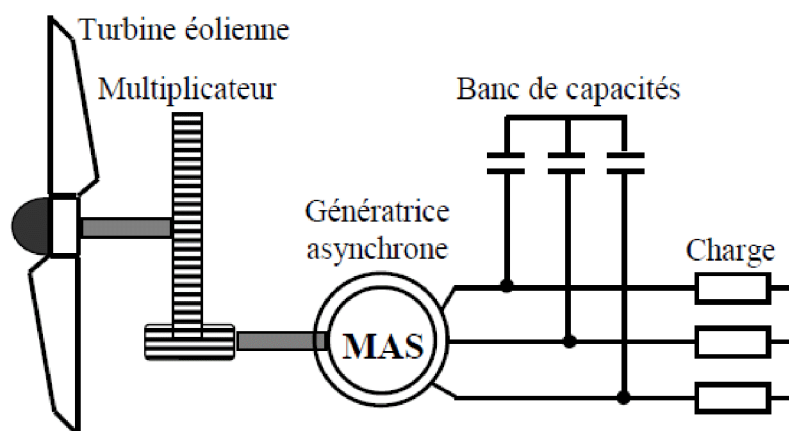


Fig. I.10 : Machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs.

IV.2.1.C Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs fixes avec un système de compensation

L'utilisation d'un banc de capacités fixes ne permet pas de maîtriser le flux de puissance réactive et par conséquent maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension délivrée constantes lors de variations de charge ou de vitesse du vent. Pour surmonter cet

inconvenient, tout en gardant un banc de capacités d'auto excitation, plusieurs solutions ont été envisagées.

IV.2.2 Capacités 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 vitesses [17]. La figure I.11 présente la machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs et une compensation où les capacités sont en série avec la charge.

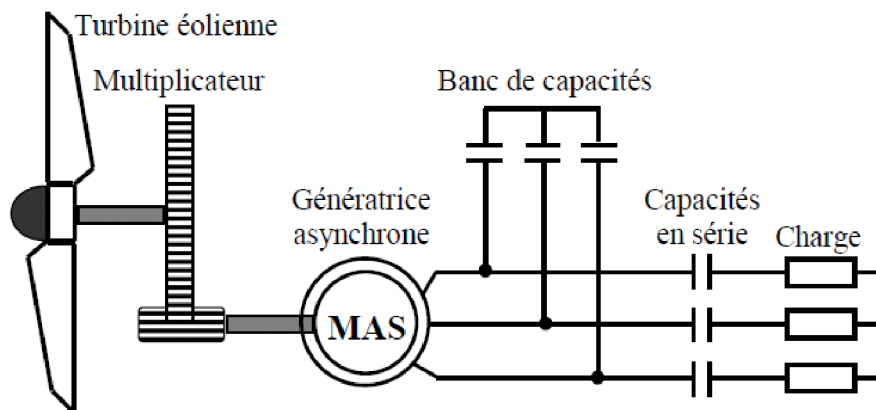


Fig. I.12 Machine asynchrone auto-excitée avec compensation série

IV.2.3 Batterie de condensateurs commandés

Une autre solution, basée sur le concept de contrôle continu de la capacité d'excitation, a été proposée dans [18]. Il s'agit d'un dispositif constitué de capacités fixes en parallèle avec des interrupteurs GTO (*Gate turn Off*) montés en antiparallèle (en tête bêche) (voir figure I.12). La valeur apparente de la capacité peut être alors ajustée périodiquement par le contrôle du temps durant lequel la capacité est connectée au circuit.

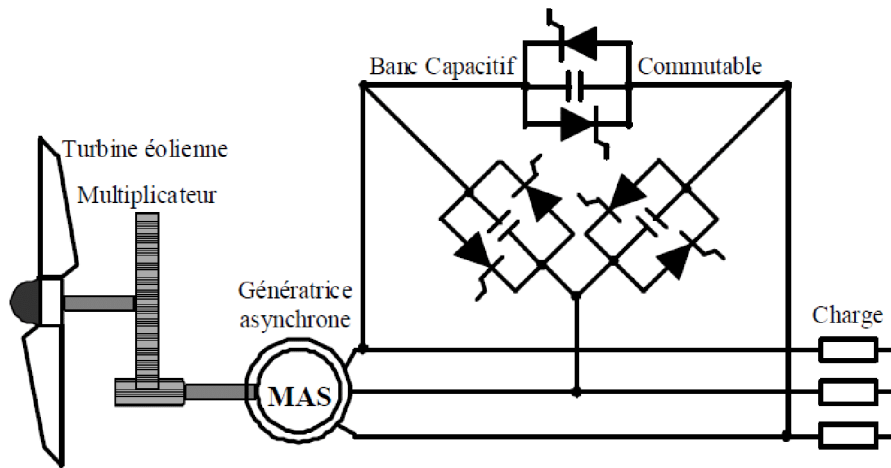


Fig. I.12 : Machine asynchrone auto-excitée avec une batterie de condensateurs et Gradateur

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.

IV.2.3.A Batterie de condensateurs fixes associée à un onduleur en parallèle avec la charge

Dans une structure constituée d'un circuit d'excitation qui comprend une batterie de condensateurs fixes connectée en permanence avec la machine asynchrone, assurant un minimum d'excitation associée à un onduleur avec une capacité à son entrée, jouant le rôle d'une source de tension (*VSI : Voltage Source Inverter*) connectée en parallèle au stator de la machine (Voir figure I.13). L'objectif est de maintenir la tension aux bornes de la machine avec une amplitude et une fréquence fixes en fonction des variations de la charge et de la vitesse.[19]

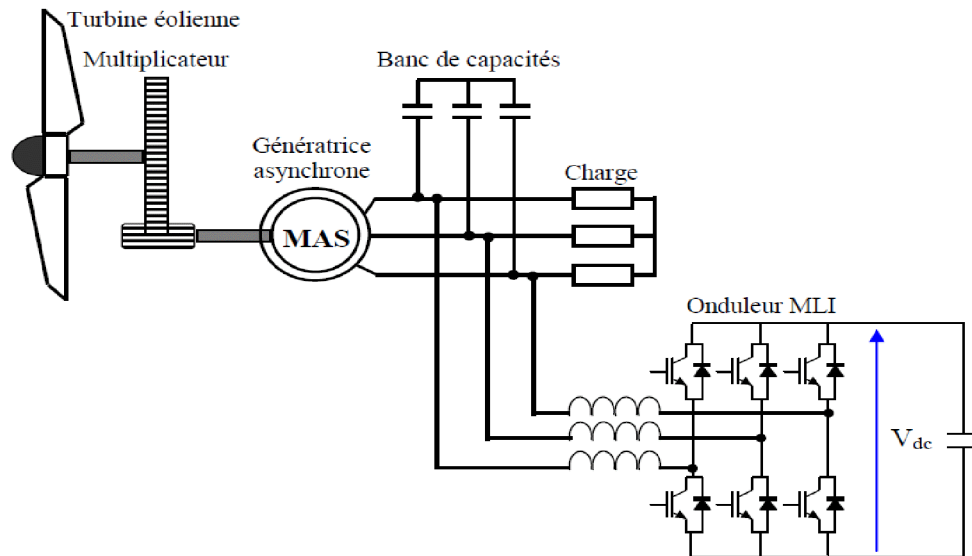


Fig. I.13 : Structure avec convertisseur MLI en parallèle avec la charge

IV.2.3.B Configuration avec convertisseur unidirectionnel (redresseur à diodes ou mixte)

Dans cette configuration (figure I.14), 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 [20].

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. [20]

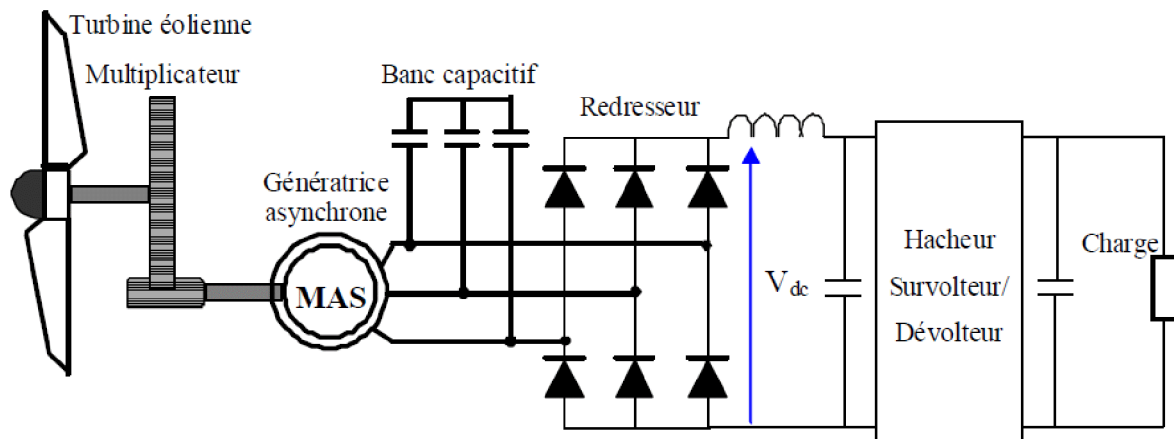


Fig. I.14 : Structure avec pont à diodes et hacheur

IV.2.3.C Configuration avec convertisseurs bidirectionnels (convertisseurs à MLI)

La structure représentée dans la figure I.16 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.

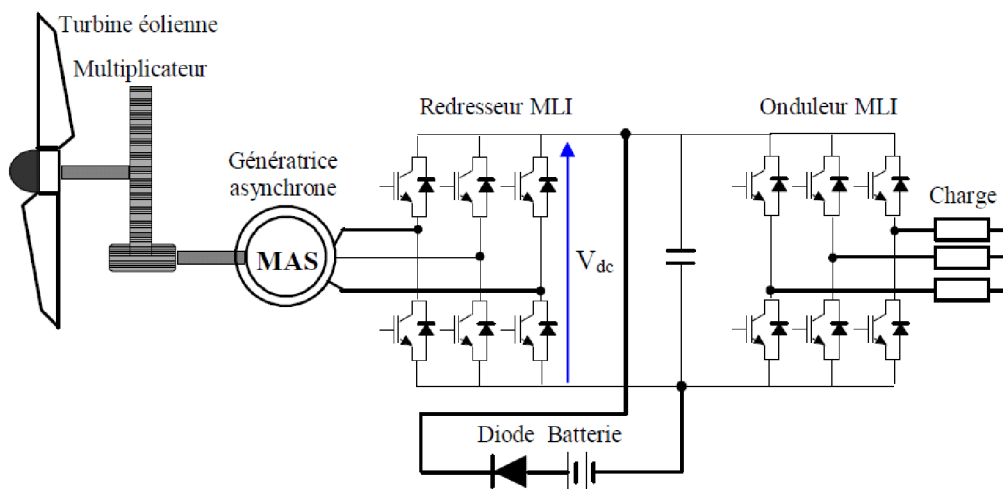


Fig. I.15 : Structure à base de deux convertisseurs MLI

L'insertion de convertisseurs statiques, 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 [16] :

- Un fonctionnement à des vitesses plus basses.
- Une diminution du bruit acoustique.
- Une optimisation du transfert de l'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.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés à une étude descriptive de l'ensemble de la chaîne de conversion. La première partie nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale et nous a donné une idée sur ses différentes structures. La seconde partie du chapitre présente la génératrice asynchrone auto-excitée et ses convertisseurs associés, adaptables à un système éolien fonctionnant en site isolé ainsi que ceux raccordés au réseau.

Compte tenu des deux principaux modes de fonctionnement d'une éolienne, à savoir : génération d'énergie électrique de façon autonome sur des charges isolées ou raccordement sur un réseau déjà existant, il nous a paru intéressant de pouvoir étudier chaque mode de fonctionnement.

Nous avons décidé de traiter le système de conversion composé d'une génératrice asynchrone auto-excitée associée à un redresseur à diodes et un hacheur. Ce système est simple et permet le fonctionnement en site isolé. Dans ce chapitre, nous avons situé notre travail parmi les systèmes existant dans la littérature technique.

Chapitre II

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons développer le modèle dynamique de la génératrice asynchrone auto-excitée. Ce modèle est construit à partir des équations électriques et magnétiques de la machine dans le repère naturel a,b,c, auxquelles on applique la transformation de Park.

Nous expliquerons brièvement le processus d'auto-amorçage de la génératrice asynchrone par un banc triphasé de condensateurs. Nous présenterons le modèle du phénomène d'auto-amorçage et nous donnerons les conditions nécessaires à son enclenchement.

Le modèle de la génératrice asynchrone auto-excitée doit obligatoirement tenir compte de la saturation, nous expliquerons dans ce chapitre comment le faire et nous fournirons le détail des calculs. Nous comparerons les résultats du modèle linéaire et celui du modèle saturé pour mieux expliquer l'indispensable prise en compte de la saturation.

II.2 Description

Les armatures du stator et du rotor sont toutes deux cylindriques (entrefer constant) ; munies chacune d'un enroulement triphasé.

Les enroulements statoriques et rotoriques sont représentés aux droits de leurs axes magnétiques.

La machine est représentée dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation (figure II.1)

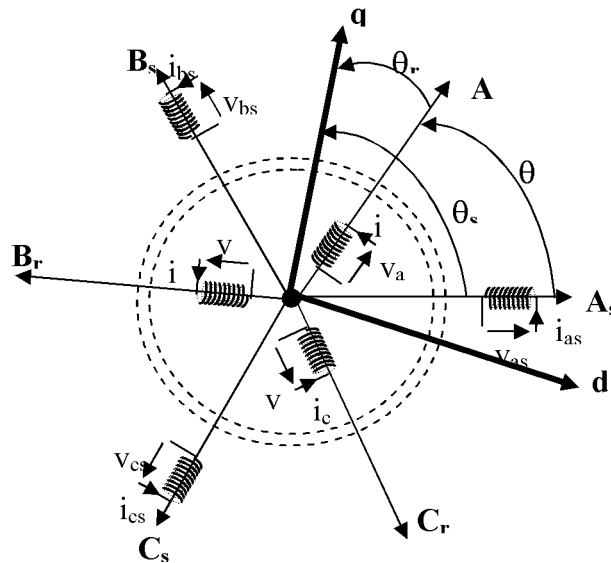


Figure II.1 : Machine asynchrone, représentation dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation

II.2.1 Définition des angles

$$(oA_s, oq) = \theta_s \quad ; \quad (oB_s, oq) = \theta_s - \frac{2\pi}{3} \quad ; \quad (oC_s, oq) = \theta_s - \frac{4\pi}{3}$$

$$(oA_r, oq) = \theta_r \quad ; \quad (oB_r, oq) = \theta_r - \frac{2\pi}{3} \quad ; \quad (oC_r, oq) = \theta_r - \frac{4\pi}{3}$$

$$(oA_s, oA_r) = \theta_s - \theta_r = \theta \quad (od, oq) = \frac{\pi}{2}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$$

II.2.2 Equations électriques (dans les axes a,b,c)

$$(v_{as}) = \frac{d(\varphi_{as})}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_{as}) \quad ; \quad (v_{ar}) = \frac{d(\varphi_{ar})}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_{ar})$$

$$(v_{bs}) = \frac{d(\varphi_{bs})}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_{bs}) \quad ; \quad (v_{br}) = \frac{d(\varphi_{br})}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_{br})$$

$$(v_{cs}) = \frac{d(\varphi_{cs})}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_{cs}) \quad ; \quad (v_{cr}) = \frac{d(\varphi_{cr})}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_{cr})$$

II.2.3 Ecriture matricielle des équations électriques

$$(v_s) = \frac{d(\varphi_s)}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_s) \quad ; \quad (v_r) = \frac{d(\varphi_r)}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_r)$$

$$(v_s) = (v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs})^t \quad ; \quad (v_r) = (v_{ar} \quad v_{br} \quad v_{cr})^t$$

$$(i_s) = (i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs})^t \quad ; \quad (i_r) = (i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr})^t$$

Avec :

$$[\mathcal{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [\mathcal{R}_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

II.2.4 Transformation de Park

Elle consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre les axes des phases et les axes d et q.

Dans la matrice de Park, c'est l'angle θ_s qui intervient pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques.

La transformation de Park pour les courants se présente comme suit :

$$(i_{ps}) = P(\theta_s).(i_s) \quad \Rightarrow \quad (i_s) = P(\theta_s)^{-1} .(i_{ps})$$

avec :

$$(i_{ps}) = (i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{0s})^t \text{ composantes de Park (d,q,0) du courant au stator.}$$

$$(i_s) = (i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs})^t \text{ composantes a,b,c du courant au stator.}$$

Cette transformation est valable aussi pour les tensions et les flux. Pour les grandeurs rotoriques, il suffit de remplacer l'indice « s » par l'indice « r ».

II.2.5 Equations magnétiques dans les axes a,b,c :

$$(\varphi_s) = [\mathcal{L}_{ss}] (i_s) + [\mathcal{M}_{sr}] (i_r)$$

$$(\varphi_r) = [\mathcal{L}_{rr}] (i_r) + [\mathcal{M}_{rs}] (i_s)$$

où :

$$(\varphi_s) = (\varphi_{as} \quad \varphi_{bs} \quad \varphi_{cs})^t \quad ; \quad (\varphi_r) = (\varphi_{ar} \quad \varphi_{br} \quad \varphi_{cr})^t$$

$$(i_s) = (i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs})^t \quad ; \quad (i_r) = (i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr})^t$$

$$[\mathcal{L}_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix}, \quad [\mathcal{L}_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix}$$

$$[\mathcal{M}_{sr}] = M_{rs} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$[\mathcal{M}_{rs}] = [\mathcal{M}_{sr}]^t$$

où :

- L_{as} : Inductance propre d'une phase statorique
- L_{ar} : Inductance propre d'une phase rotorique
- M_{as} : Inductance mutuelle entre deux phases du stator
- M_{ar} : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor
- M_{rs} : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une autre du rotor
(obtenue quand les axes magnétiques des deux phases sont alignés)

II.2.6 Equations magnétiques dans les axes d et q

$$\begin{aligned}(\varphi_s) &= [\mathcal{L}_{ss}](i_s) + [\mathcal{M}_{sr}](i_r) \\(\varphi_{ps}) &= \left\{ P(\theta_s) [\mathcal{L}_{ss}] P(\theta_s)^{-1} \right\} (i_{ps}) + \left\{ P(\theta_s) [\mathcal{M}_{sr}] P(\theta_r)^{-1} \right\} (i_{pr}) \\(\varphi_r) &= [\mathcal{L}_{rr}](i_r) + [\mathcal{M}_{rs}](i_s) \\(\varphi_{pr}) &= \left\{ P(\theta_r) [\mathcal{L}_{rr}] P(\theta_r)^{-1} \right\} (i_{pr}) + \left\{ P(\theta_r) [\mathcal{M}_{rs}] P(\theta_s)^{-1} \right\} (i_{ps})\end{aligned}$$

En effectuant les quatre produits matriciels entre accolades on trouve :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{dr} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{pmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{qr} \end{pmatrix}$$

$$\varphi_{0s} = L_{0s} \cdot i_{0s} \quad ; \quad \varphi_{0r} = L_{0r} \cdot i_{0r}$$

avec :

- $L_s = L_{as} - M_{as}$: Inductance propre cyclique du stator
- $L_r = L_{ar} - M_{ar}$: Inductance propre cyclique du rotor
- $L_m = \frac{3}{2} M_{rs}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.
- $L_{0s} = L_{as} + 2.M_{as}$: Inductance homopolaire au stator
- $L_{0r} = L_{ar} + 2.M_{ar}$: Inductance homopolaire au rotor

II.2.7 Equations électriques dans les axes d et q

$$\begin{aligned}(v_s) &= \frac{d(\varphi_s)}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_s) \\(v_{ps}) &= \frac{d(\varphi_{ps})}{dt} + \left\{ p(\theta_s) \cdot \frac{d(p(\theta_s)^{-1})}{d\theta_s} \right\} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \varphi_{ps} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_{ps}) \\(v_r) &= \frac{d(\varphi_r)}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_r) \\(v_{pr}) &= \frac{d(\varphi_{pr})}{dt} + \left\{ p(\theta_r) \cdot \frac{d(p(\theta_r)^{-1})}{d\theta_r} \right\} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \varphi_{pr} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_{pr})\end{aligned}$$

On effectue les produits matriciels (entre accolades) :

$$p(\theta_s) \cdot \frac{d(p(\theta_s)^{-1})}{d\theta_s} = p(\theta_r) \cdot \frac{d(p(\theta_r)^{-1})}{d\theta_r} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{l}
v_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} + R_s \cdot i_{ds} \quad ; \quad v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \\
v_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} + R_s \cdot i_{qs} \quad ; \quad v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{qr} \\
v_{0s} = \frac{d\varphi_{0s}}{dt} + R_s \cdot i_{0s} \quad ; \quad v_{0r} = \frac{d\varphi_{0r}}{dt} + R_r \cdot i_{0r}
\end{array}$$

II.3 Equations électriques dans les axes d et q dans les trois référentiels

II.3.1 Référentiel immobile par rapport au stator

$$\begin{array}{l}
\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{donc} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \\
v_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + R_s \cdot i_{ds} \quad ; \quad v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \varphi_{qr} \cdot \omega_r + R_r \cdot i_{dr} \\
v_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + R_s \cdot i_{qs} \quad ; \quad v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \varphi_{dr} \cdot \omega_r + R_r \cdot i_{qr}
\end{array}$$

II.3.2 Référentiel immobile par rapport au rotor

$$\begin{array}{l}
\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad \text{donc} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r \\
v_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \cdot \omega_r + R_s \cdot i_{ds} \quad ; \quad v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \\
v_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \cdot \omega_r + R_s \cdot i_{qs} \quad ; \quad v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + R_r \cdot i_{qr}
\end{array}$$

II.3.3 Référentiel immobile par rapport au champ tournant

$$\begin{array}{l}
\frac{d\theta_r}{dt} = g \cdot \omega \quad \text{donc} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \\
v_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \cdot \omega + R_s \cdot i_{ds} \quad ; \quad v_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \cdot g \cdot \omega + R_r \cdot i_{dr} \\
v_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \cdot \omega + R_s \cdot i_{qs} \quad ; \quad v_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \cdot g \cdot \omega + R_r \cdot i_{qr}
\end{array}$$

II.4 Modèle dynamique de la machine asynchrone en tenant compte de la saturation

II.4.1 Equations électriques

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} + R_s i_{ds} \\
 v_{qs} &= \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} + R_s i_{qs} \\
 0 &= \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} + R_r i_{dr} \\
 0 &= \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} + R_r i_{qr}
 \end{aligned} \tag{II.1}$$

Notons que ces équations correspondent à un système d'axes d et q où l'axe q est en avance par rapport à l'axe d. C'est-à-dire que la matrice de Park et son inverse s'expriment comme suit :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$p(\theta)^{-1} = p(\theta)^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

Dans la matrice de Park et son inverse, on utilise parfois les deux coefficients $\frac{2}{3}$ et $\frac{1}{2}$ au lieu des coefficients $\sqrt{\frac{3}{2}}$ et $\frac{1}{\sqrt{2}}$, mais dans ces cas la matrice de Park ne sera plus orthonormée et son inverse ne sera plus égale à sa transposée.

Nous constatons que dans les équations électriques, nous avons besoin des expressions des flux et de leurs dérivées.

II.4.2 Equations des flux

Si l'on désire exprimer les flux en fonction des courants statoriques et rotoriques, c.à.d le vecteur $(i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr})$, nous obtenons le système d'équations suivant :

$$\begin{aligned}\varphi_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \varphi_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \\ \varphi_{dr} &= L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \\ \varphi_{qr} &= L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs}\end{aligned}\tag{II.2}$$

Sachant que les inductances cycliques statoriques et rotoriques s'expriment en fonction de l'inductance magnétisante comme suit : $L_s = L_m + l_{s\sigma}$; $L_r = L_m + l_{r\sigma}$

Les dérivées des flux passent toutes par le calcul suivant :

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt}$$

Car $L_s = L_m + l_{s\sigma}$; $L_r = L_m + l_{r\sigma} \Rightarrow \frac{dL_s}{dt} = \frac{dL_r}{dt} = \frac{dL_m}{dt}$; $\frac{dl_{s\sigma}}{dt} = \frac{dl_{r\sigma}}{dt} = 0$

$$i_m = (i_{dm}^2 + i_{qm}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{1}{2} \left(2i_{dm} \frac{di_{dm}}{dt} + 2i_{qm} \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot (i_{dm}^2 + i_{qm}^2)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{\frac{1}{2} \left(2i_{dm} \frac{di_{dm}}{dt} + 2i_{qm} \frac{di_{qm}}{dt} \right)}{(i_{dm}^2 + i_{qm}^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{\frac{1}{2} \left(2i_{dm} \frac{di_{dm}}{dt} + 2i_{qm} \frac{di_{qm}}{dt} \right)}{i_m}$$

$$\Rightarrow \frac{di_m}{dt} = \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right)$$

Il faut donc réécrire le système (II.2) en fonction des courants statoriques et des courants magnétisants

Si l'on désire exprimer les flux en fonction des courants statoriques et magnétisants, c.à.d le vecteur $(i_{ds}, i_{qs}, i_{dm}, i_{qm})$, dans le cas où l'on désire exprimer L_m en fonction de i_m pour tenir compte de la saturation, il faut éliminer les courants rotoriques du système (II.2) en les exprimant par les deux relations :

$$i_{dr} = i_{dm} - i_{ds} \quad ; \quad i_{qr} = i_{qm} - i_{qs}$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m (i_{dm} - i_{ds}) = (L_s - L_m) i_{ds} + L_m i_{dm} = l_{s\sigma} i_{ds} + L_m i_{dm}$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m (i_{qm} - i_{qs}) = (L_s - L_m) i_{qs} + L_m i_{qm} = l_{s\sigma} i_{qs} + L_m i_{qm}$$

$$\varphi_{dr} = L_r (i_{dm} - i_{ds}) + L_m i_{ds} = (L_m - L_r) i_{ds} + L_r i_{dm} = -l_{r\sigma} i_{ds} + L_r i_{dm}$$

$$\varphi_{qr} = L_r (i_{qm} - i_{qs}) + L_m i_{qs} = (L_m - L_r) i_{qs} + L_r i_{qm} = -l_{r\sigma} i_{qs} + L_r i_{qm}$$

On obtient donc les équations magnétiques suivantes :

$$\varphi_{ds} = l_{s\sigma} i_{ds} + L_m i_{dm}$$

$$\varphi_{qs} = l_{s\sigma} i_{qs} + L_m i_{qm}$$

$$\varphi_{dr} = -l_{r\sigma} i_{ds} + L_r i_{dm}$$

$$\varphi_{qr} = -l_{r\sigma} i_{qs} + L_r i_{qm}$$

(II.3)

Les dérivées des flux s'expriment par :

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = l_{s\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{dt} i_{dm}$$

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = l_{s\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \frac{di_m}{dt} i_{dm}$$

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{i_{dm}}{i_m} \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \frac{di_{qm}}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = l_{s\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \frac{di_{qm}}{dt} \right) i_{dm}$$

On applique le même développement aux autres flux :

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = l_{s\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \frac{di_{qm}}{dt} \right) i_{qm}$$

$$\frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -l_{r\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_r \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \frac{di_{qm}}{dt} \right) i_{dm}$$

$$\frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -l_{r\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_r \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \frac{di_{qm}}{dt} \right) i_{qm}$$

Sachant que :

$$L_{mdr} = L_r + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m} \quad ; \quad L_{mqr} = L_r + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{qm}^2}{i_m}$$

$$L_{md} = L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m} \quad ; \quad L_{mq} = L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{qm}^2}{i_m} \quad ; \quad L_{dq} = \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm} \cdot i_{qm}}{i_m}$$

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = l_{s\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt}$$

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = l_{s\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{qm}}{dt}$$

$$\frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -l_{r\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{mdr} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt}$$

$$\frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -l_{r\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mqr} \frac{di_{qm}}{dt}$$

$$v_{ds} = l_{s\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt} + R_s \cdot i_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} \cdot i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{qm}$$

$$v_{qs} = l_{s\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} \cdot i_{ds} + R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{dm}$$

$$0 = -l_{r\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{mqr} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt} - R_r \cdot i_{ds} + \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} \cdot i_{qs} + R_r \cdot i_{dm} - \frac{d\theta_r}{dt} L_r \cdot i_{qm}$$

$$0 = -l_{r\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mqr} \frac{di_{qm}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} \cdot i_{ds} - R_r \cdot i_{qs} + \frac{d\theta_r}{dt} L_r \cdot i_{dm} + R_r \cdot i_{qm}$$

On obtient le système final :

$$\begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{s\sigma} & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_{s\sigma} & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_{r\sigma} & 0 & L_{mdr} & L_{dq} \\ 0 & -l_{r\sigma} & L_{dq} & L_{mqr} \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_s & -\frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} & 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} L_m \\ \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} & R_s & \frac{d\theta_s}{dt} L_m & 0 \\ -R_r & \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} & R_r & -\frac{d\theta_r}{dt} L_r \\ -\frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} & -R_r & \frac{d\theta_r}{dt} L_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Pour construire le schéma Matlab Simulink de ce modèle, il faut inverser la matrice inductance, soit manuellement, soit en utilisant le logiciel MatWorks qui permet l'inversion littérale des matrices.

Les détails de calcul de l'inverse de la matrice inductance sont fournis en annexe A.

Nous constatons ici que nous n'avons pour l'instant pas choisi de référentiel, c'est-à-dire que nous n'avons pas donnée de valeur particulière aux dérivées des angles $\frac{d\theta_s}{dt}$ et $\frac{d\theta_r}{dt}$.

En effet, le choix de référentiel n'affecte que les fem de rotation et seule la matrice résistance se trouve affectée par le choix du référentiel.

Seule l'application considérée peut indiquer ou même imposer un référentiel par rapport à un autre.

Dans notre cas, nous pouvons utiliser indifféremment le référentiel lié au stator ou au rotor. Par contre, le référentiel lié au champ tournant est contre indiqué car dans le cas du fonctionnement en génératrice asynchrone auto excitée, la fréquence et donc la vitesse de synchronisme peut varier. Elle représente une conséquence et non un paramètre qu'on peut fixer à l'avance.

II.5 Construction du schéma Matlab Simulink

Cherchons d'abord à exprimer les dérivées des courants

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_{11} & \mathbf{x}_{12} & \mathbf{x}_{13} & \mathbf{x}_{14} \\ \mathbf{x}_{21} & \mathbf{x}_{22} & \mathbf{x}_{23} & \mathbf{x}_{24} \\ \mathbf{x}_{31} & \mathbf{x}_{32} & \mathbf{x}_{33} & \mathbf{x}_{34} \\ \mathbf{x}_{41} & \mathbf{x}_{42} & \mathbf{x}_{43} & \mathbf{x}_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ds} - R_s i_{ds} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_{mi} i_{qm} \\ v_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{ds} - R_s i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_{mi} i_{dm} \\ R_r i_{ds} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{qs} - R_r i_{dm} + \frac{d\theta_r}{dt} L_{ri} i_{qm} \\ \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{ds} + R_r i_{qs} - \frac{d\theta_r}{dt} L_{ri} i_{dm} - R_r i_{qm} \end{pmatrix}$$

$$\frac{d i_{ds}}{dt} = \frac{1}{D} \left\{ \begin{aligned} & \left(v_{ds} - R_s i_{ds} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_{mi} i_{qm} \right) \cdot x_{11} + \left(v_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{ds} - R_s i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_{mi} i_{dm} \right) \cdot x_{12} \\ & + \left(R_r i_{ds} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{qs} - R_r i_{dm} + \frac{d\theta_r}{dt} L_{ri} i_{qm} \right) \cdot x_{13} + \left(\frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{ds} + R_r i_{qs} - \frac{d\theta_r}{dt} L_{ri} i_{dm} - R_r i_{qm} \right) \cdot x_{14} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{D} \left(\begin{array}{l} x_{11} \cdot v_{ds} + x_{12} \cdot v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{11} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{12} + R_r x_{13} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{14} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{11} - R_s x_{12} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{13} + R_r x_{14} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{12} - R_r x_{13} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{14} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{11} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{13} - R_r x_{14} \right) \cdot i_{qm} \end{array} \right)$$

Le calcul de la dérivée des autres courants se fait en remplaçant dans l'expression de

$\frac{di_{ds}}{dt}$ le premier indice de x_{1j} à savoir 1 par respectivement 2,3 et 4.

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{D} \left(\begin{array}{l} x_{21} \cdot v_{ds} + x_{22} \cdot v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{21} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{22} + R_r x_{23} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{24} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{21} - R_s x_{22} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{23} + R_r x_{24} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{22} - R_r x_{23} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{24} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{21} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{23} - R_r x_{24} \right) \cdot i_{qm} \end{array} \right)$$

$$\frac{di_{dm}}{dt} = \frac{1}{D} \left(\begin{array}{l} x_{31} \cdot v_{ds} + x_{32} \cdot v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{31} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{32} + R_r x_{33} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{34} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{31} - R_s x_{32} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{33} + R_r x_{34} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{32} - R_r x_{33} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{34} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{31} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{33} - R_r x_{34} \right) \cdot i_{qm} \end{array} \right)$$

$$\frac{di_{qm}}{dt} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{41}v_{ds} + x_{42}v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{41} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{42} + R_r x_{43} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{44} \right) i_{ds} + \\ \left(l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{41} - R_s x_{42} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{43} + R_r x_{44} \right) i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{42} - R_r x_{43} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{44} \right) i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{41} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{43} - R_r x_{44} \right) i_{qm} \end{pmatrix}$$

Ces quatre derniers systèmes d'équations nous permettent de construire le schéma Matlab Simulink de la Machine Asynchrone en tenant compte de la saturation.(figure II.2)

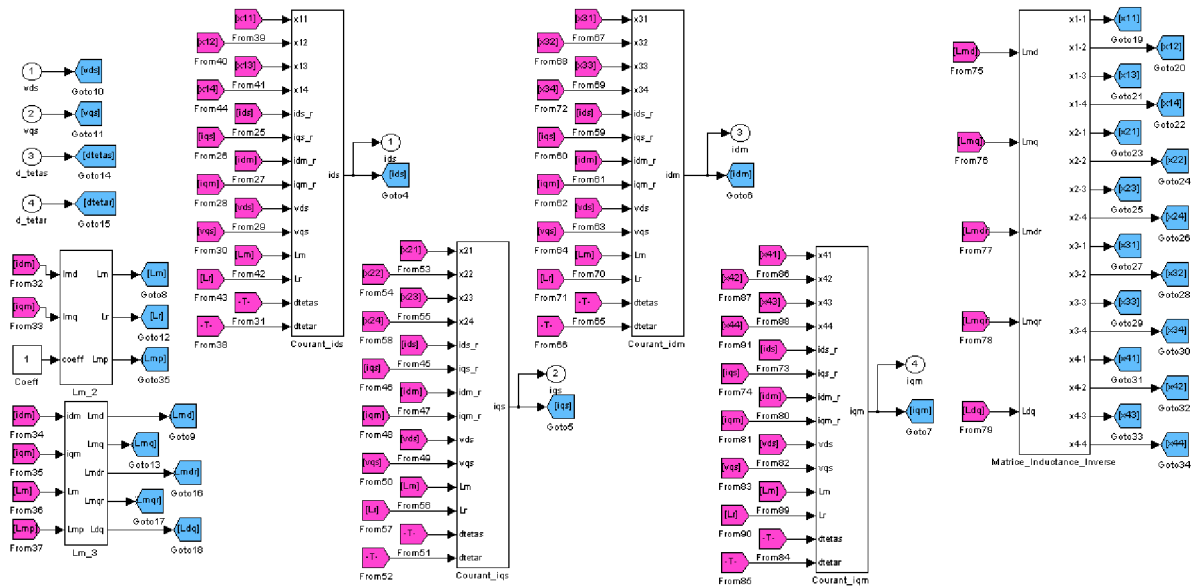


Figure II.2 : Schéma Matlab-Simulink de la GAEE.

II.6 Le processus d'auto-amorçage

II.6.1 Description du phénomène d'auto-amorçage

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 rémanent pour produire une plus grande 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.

la figure (II.3) symbolise le processus d'auto-amorçage.

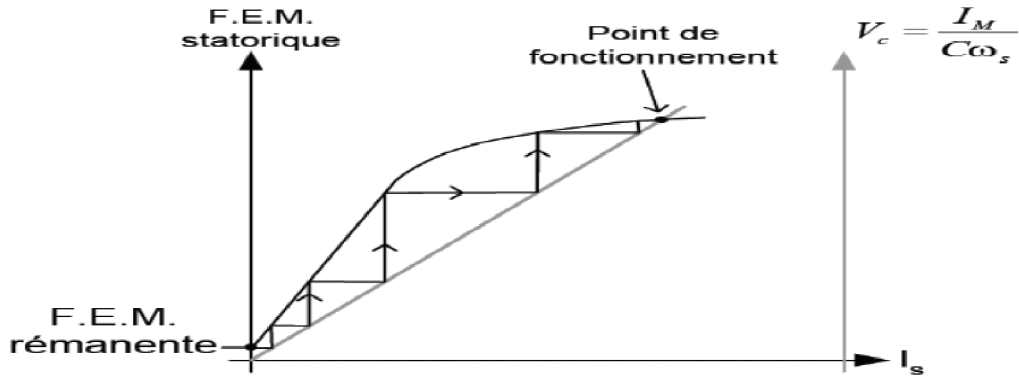


Figure II.3 : Phénomène d'auto-amorçage.

II.6.2 Modélisation du phénomène d'auto-amorçage

$$\frac{d(v_s)}{dt} = -\frac{1}{C} \cdot (i_s)$$

$$\frac{d(p(\theta_s)^{-1} \cdot v_{ps})}{dt} = -\frac{1}{C} \cdot (p(\theta_s)^{-1} \cdot i_{ps})$$

$$p(\theta_s)^{-1} \cdot \frac{dv_{ps}}{dt} + \frac{dp(\theta_s)^{-1}}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} v_{ps} = -\frac{1}{C} \cdot (p(\theta_s)^{-1} \cdot i_{ps})$$

$$\frac{dv_{ps}}{dt} + p(\theta_s) \frac{dp(\theta_s)^{-1}}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} v_{ps} = -\frac{1}{C} \cdot i_{ps}$$

$$\frac{dv_{ps}}{dt} = -p(\theta_s) \frac{dp(\theta_s)^{-1}}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} v_{ps} - \frac{1}{C} \cdot i_{ps}$$

$$p(\theta_s) \cdot \frac{d(p(\theta_s)^{-1})}{d\theta_s} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \end{pmatrix} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{1}{C} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{pmatrix}$$

$$\frac{dv_{ds}}{dt} = v_{qs} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{1}{C} \cdot i_{ds}$$

$$\frac{dv_{qs}}{dt} = -v_{ds} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{1}{C} \cdot i_{qs}$$

$$\frac{dv_{0s}}{dt} = -\frac{1}{C} \cdot i_{0s}$$

II.7 Résultats de simulation :

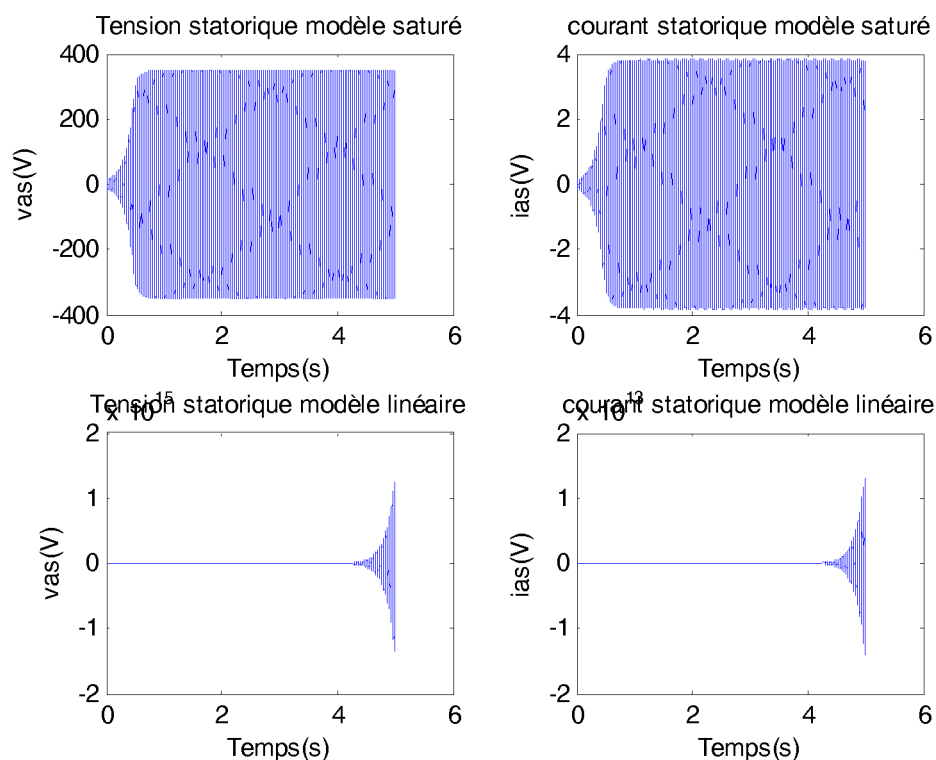


Figure II.4 : Résultats de simulation pour le modèle linéaire et saturé.

En fonctionnement linéaire l'inductance de magnétisation est considérée comme constante et égale à sa valeur en régime non saturé, la caractéristique de magnétisation ne présente alors pas de coude de saturation et il n'y a pas d'intersection avec la caractéristique externe du condensateur. L'auto-amorçage est donc possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie ainsi que le courant atteint rapidement des valeurs inadmissibles.

En modèle saturé, au début de l'auto-amorçage la tension croît d'une façon exponentielle comme dans le cas linéaire, puis elle s'incurve pour converger vers une valeur fixée par le choix du condensateur et de la vitesse. Le courant reste semblable à la tension d'où sa valeur maximale est légèrement inférieure à la valeur du courant magnétisant car le courant rotorique est négligeable à vide. Voir la figure (II.4)

II.8 Conclusion

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

Nous avons d'abord construit à partir du modèle de Park les équations du modèle linéaire, celui-ci fait appel à des matrices inductances constantes, ce modèle ne reflète pas la réalité. Par la suite, nous avons présenté la procédure de prise en compte de l'effet de la saturation magnétique en introduisant dans le modèle linéaire une inductance magnétisante variable en fonction du courant magnétisant, et nous avons aussi rajouté les équations d'auto-amorçage à vide. Et enfin on a exploité le programme écrit sous Matlab-Simulink pour la simulation en fonctionnement à vide des deux modèles linéaire et saturé.

Chapitre III

III.1 Introduction

Parmi les méthodes de détermination des paramètres de la machine asynchrone nous citons la méthode des essais classiques, autrement dit, les essais à vide et les essais à rotor bloqué que nous exposons dans ce chapitre après avoir rappelé le schéma équivalent de la machine asynchrone.

Cette méthode classique consiste à identifier les paramètres du schéma équivalent, à savoir la résistance rotorique, les réactances de fuite statorique et rotorique et la réactance magnétisante à partir des essais à vide et à rotor bloqué.

La résistance statorique est mesurée par un essai volt-ampéremétrique à chaud et a courant nominal.

III.2 Identification des paramètres de la machine asynchrone à cage

III.2.1 Schéma équivalent

Le schéma de la figure ci-dessous représente le schéma équivalent en monophasé d'une machine asynchrone à cage en régime équilibré dont les paramètres d'une phase rotorique sont ramenés au stator.

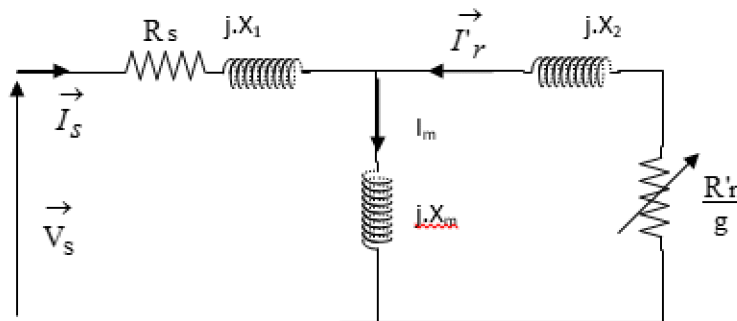


Figure III.1 :le schéma équivalent par phase d une MAS ramené au stator

R_s : Résistance d'une phase statorique (elle se mesure à chaud avec la méthode Volt-ampérométrique).

R'_r : Résistance équivalente d'une phase rotorique ramenée au stator.

X_1 : Réactance de fuite statorique ($X_1 = N'_s \cdot \omega$) d'où N'_s est l'inductance de fuite statorique

X_2 : Réactance de fuite rotorique ramenée au stator ($X_2 = N'_r \cdot \omega$) d'où N'_r est l'inductance de fuite rotorique ramenée au stator.

X_m : Réactance magnétisante ($X_m = L_m \cdot \omega$) d'où L_m est l'inductance magnétisante.

III.2.2 Mesure des résistance statorique

La résistance statorique est mesurée à chaud en courant continu par la méthode volt_ ampèremétrique. Les résultats sont donnés dans le tableau (III.1) :

V(V)	14.7	29.7	43.7	R_s (Ω)
I(A)	0.51	1.05	1.5	9.58

Tableau III.1: Résultat mesurée de la résistance statorique

La valeur de la résistance retenue est la moyenne des trois valeurs mesurées (le tableau III.1 représente les résultats de trois résistances montées en série).

III.2.3 Essai à rotor bloqué

Cette essai permet de déterminer la résistance rotorique ramenée au stator R'_r et les inductances de fuites statoriques $N's$ et rotoriques $N'r$.

L'essai à rotor bloqué a donné les résultats dans le tableau (III.2) :

V_{cc} (V)	50
I_{cc} (A)	2.65
P_{cc} (W)	307

Tableau III.2: Résultat de l'essai a rotor bloqué.

En vertu du schéma de la figure III.2, nous calculons la résistance statorique et l'inductance de fuite statorique et rotorique par les formules suivantes :

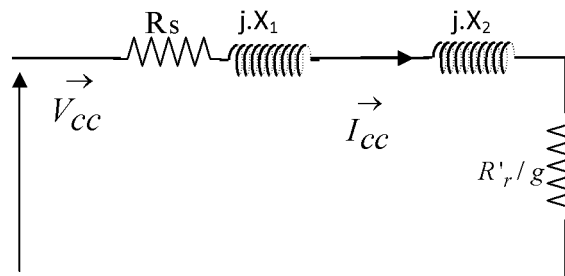


Figure III.2 : Schéma équivalent à l'essai à rotor bloqué.

- **Calcul de R'_r**

$$\text{On a } p_{cc} = 3R_s \cdot I_{cc}^2 + 3R'_r \cdot I_{cc}^2$$

$$\text{Donc : } R'_r = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} - R_s \quad (\text{III.1})$$

- **Calcul de N's et N'r**

On a

$$V_{cc} = Z_{cc} \cdot I_{cc}$$

Donc

$$V_{cc} = \sqrt{(R_s + R'_r)^2 + (N'_r + N_s)^2 \cdot \omega^2} \cdot I_{cc}$$

$$N_s + N'_r = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_{cc}}{I_{cc}}\right)^2 - (R_s + R'_r)^2} \quad (\text{III.2})$$

III.2.4 Essai à vide

Cet essai permet d'identifier les pertes mécaniques et les pertes fer et de déterminer en conséquence la résistance et l'inductance de magnétisation R_m et L_m . Cet essai s'effectue à une vitesse constante, pour considérer que les pertes mécaniques sont constantes.

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau suivant :

$I_{10}(\text{A})$	1.90	1.55	1.25	1.05	0.90	0.75	0.65	0.55
$P_{10}(\text{W})$	215.00	178.00	142.00	122.00	105.00	84.00	78.00	64.00
$V_{10}(\text{V})$	220.00	200.00	180.00	160.00	140.00	120.00	100.00	80.00

Tableau III.3 Résultat de l'essai à vide

Les pertes mécaniques et les pertes fer s'identifient en traçant la courbe $P_{10} - 3 \cdot R_s \cdot I_{10}^2$ Qui représente la somme des pertes mécaniques et les pertes fer, en fonction de V_{10}^2 . Cette courbe est une droite que l'on extrapole à l'origine pour extraire les pertes mécaniques qui sont supposées constantes. Les pertes fer sont la différence au point nominal de $P_{10} - 3 \cdot R_s \cdot I_{10}^2$ et des pertes mécaniques (voir figure III.3).

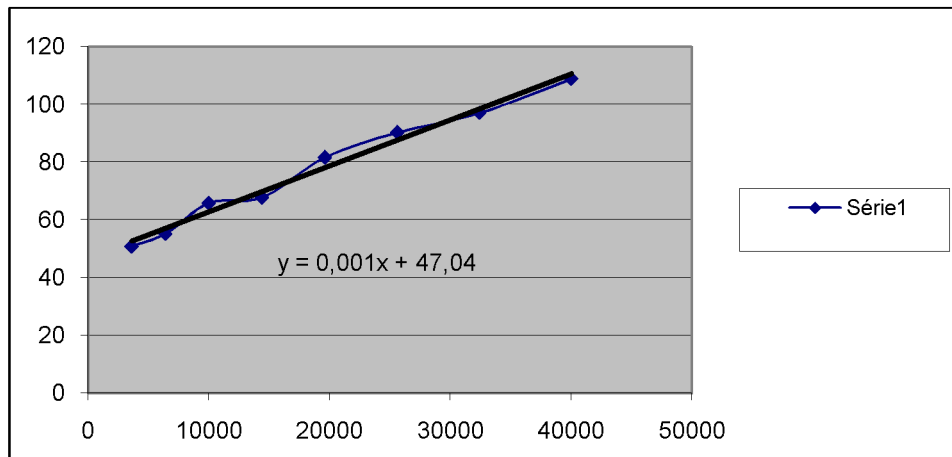


Figure III.3 : Caractéristique de P_{fer_mec} en fonction de v^2

Après extrapolation à l'origine, on trouve les pertes mécaniques (47,04W), les pertes fer sont déduites par soustraction, au point $v=200V$, soit $P_{fer} = 64,20W$

La résistance de magnétisation se calcule comme suit :

$$R_m = \frac{E}{I_0}$$

Avec

$$E = V_s - Z_s \cdot I_{10} \quad (III.3)$$

III.2.5 Essai au synchronisme

Pour cet essai, on doit maintenir la vitesse de la machine au synchronisme ($g=0$), et ça nous permettra d'identifier l'inductance de magnétisation L_m . Le schéma équivalent est le suivant :

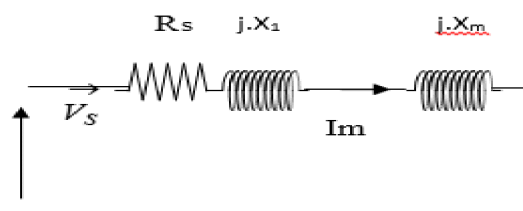


Figure3 : schéma équivalent d'une MAS au synchronisme

III.2.3.1 Identification de l'inductance magnétisante (L_m)

$$E = V_s - Z_s \cdot I_s$$

$$E = L_m \cdot \omega \cdot i_m$$

$$L_m = \frac{E}{i_m \cdot \omega}$$

Ou encore :

$$L_m = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_s}{I_s}\right)^2 - R_s^2 - N_s} \quad (\text{III.4})$$

La courbe $X_m(I_m)$ doit être construite expérimentalement point par point et l'ensemble des points permettent de synthétiser une approximation. Plusieurs formes de cette approximation sont proposées dans la littérature, la plus connue est l'approche linéaire par morceaux. Nous avons choisi d'adopter dans notre cas la forme polynomiale donnée par l'équation (III.5), parce qu'elle est de forme simple et se prête très facilement à la programmation et la précision peut être améliorée par le degré (j) de cette fonction.

$$L_m = f(|i_m|) = \sum_{j=0}^n a_j \cdot |i_m|^j \quad (\text{III.5})$$

Il apparait d'après les différents essais effectués que la fonction de degré 4 représentée par la figure (III.4) et celle qui reproduit le plus fidèlement la courbe expérimentale. La forme complète de cette fonction est donnée comme suit :

$$L_m = 0.4792 + 0.1598 \cdot i_m - 0.2096 \cdot i_m^2 + 0.059 \cdot i_m^3 - 0.0048 \cdot i_m^4$$

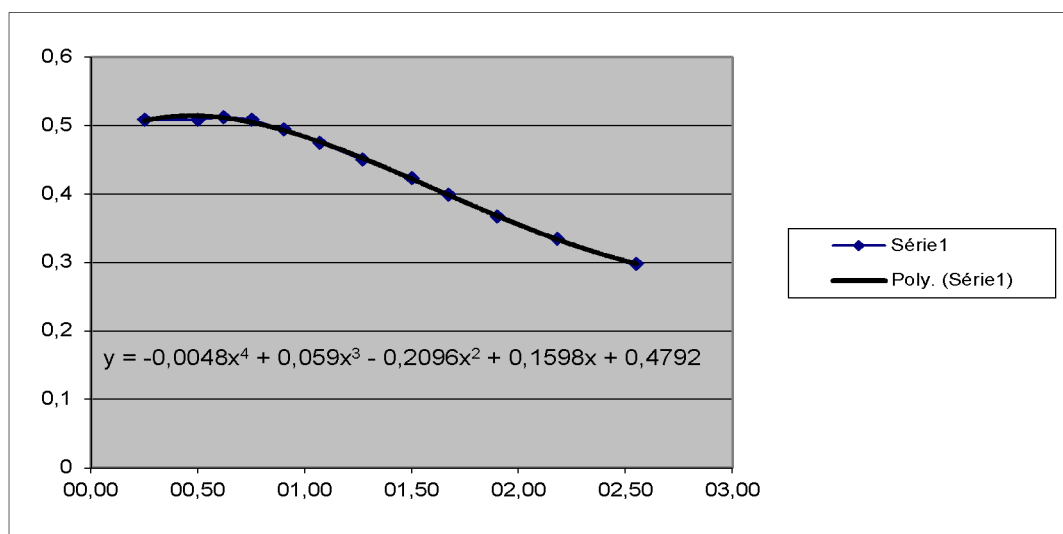


Figure III.4 : la caractéristique de $L_m = f(|i_m|)$ obtenue expérimentalement et par approximation polynomiale.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons identifié les paramètres électriques de la machine asynchrone.

Notre machine est à rotor à cage, nous avons donc choisi d'identifier les paramètres de son schéma équivalent à savoir : la résistance statorique, la résistance rotorique ramenée au stator, les inductances de fuites statoriques et rotoriques ainsi que la résistance et l'inductance de magnétisation. Tous ces paramètres sont identifiés par deux essais ; un essai à vide et un essai à rotor bloqué. Par ailleurs et pour tenir compte de la saturation, un essai au synchronisme nous a permis de tracer les variations de l'inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant et nous avons proposé de l'approximer pour une fonction polynomiale d'ordre 4.

Chapitre IV

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions les performances de la génératrice asynchrone en fonctionnement autonome, débitant sur une charge résistive inductive à travers un redresseur à diodes et un hacheur. L'objectif de cette étude est de montrer la sensibilité de la tension générée par la SEIG et par conséquent la tension redressée et la tension en sortie du hacheur aux variations de charge, puis aux variations de la vitesse. Différentes simulations sous Matlab-Simulink feront apparaître les effets de la charge et celles de la vitesse de rotation.

IV.2 Modèles du redresseur à diodes et du hacheur

IV.2.1 Description de l'ensemble GAAE_Redresseur_Hacheur_Charge

IV.2.2 Redresseur à diode

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu, est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension. Les redresseurs non commandés, essentiellement réalisés à partir des diodes, sont utilisés lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée. Un filtre permet de minimiser les ondulations de la tension redressée, son schéma est illustré sur la figure (VI.1).

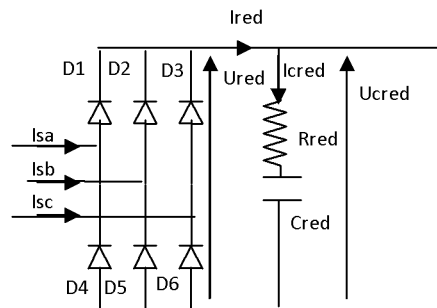


Figure IV.1 : Circuit électrique du redresseur triphasé à diodes.

Le schéma Matlab-Simulink du redresseur à diodes est illustré dans la figure IV.2 suivante :

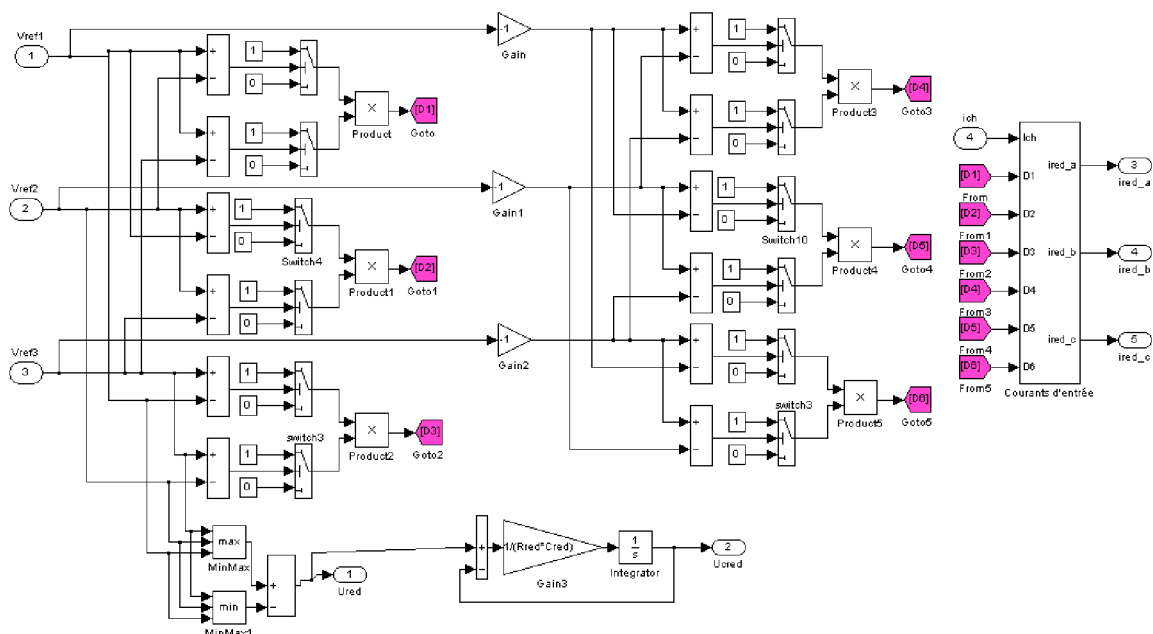


Figure IV.2 : Schéma sous Matlab-Simulink du redresseur à diodes.

IV.2.3 Hacheur série

Le convertisseur DC/DC proposé est de type hacheur série ou dévolteur (Buck). Ce hacheur est modélisé par le schéma électrique équivalent de la Figure (IV.3). Lors du fonctionnement en régime continu de ce hacheur série, les valeurs moyennes des tensions de sortie V_s et d'entrée V_e sont proportionnelles, telle que $V_s = \alpha V_e$. Le coefficient de proportionnalité α , étant le rapport cyclique de valeurs comprises entre 0 et 1.

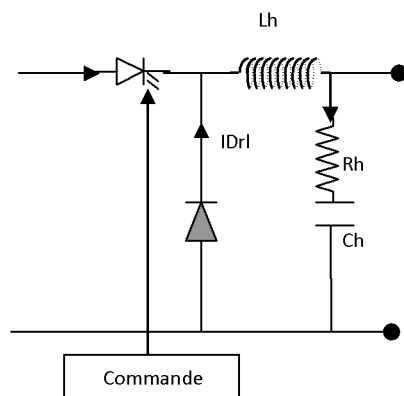


Figure IV.3 : Circuit électrique du hacheur série avec une charge.

Le schéma Matlab-Simulink du hacheur série est illustré dans la figure IV.4 suivante :

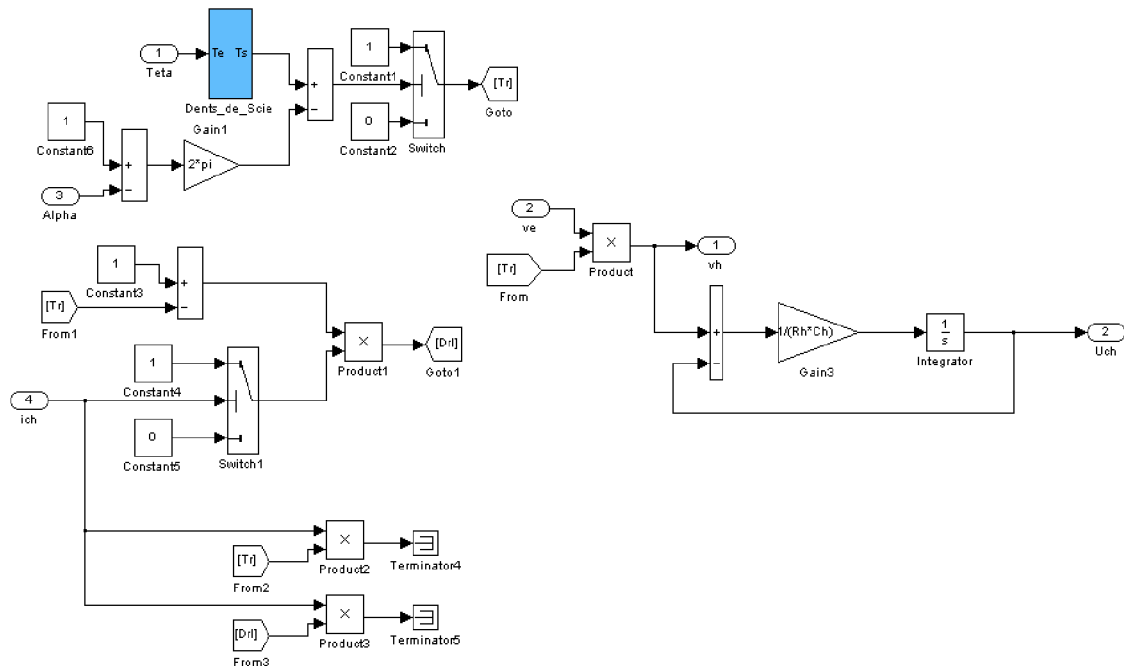


Figure IV.4 : Schéma sous Matlab-Simulink du hacheur série.

Le modèle général à exploiter dans notre étude est illustré dans la figure (IV.5) suivante :

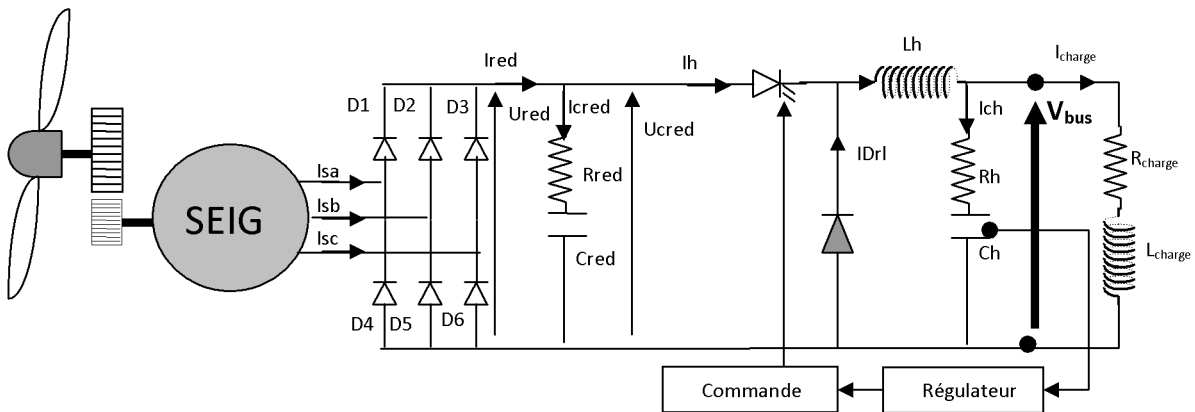


Figure IV.5 : Structure de l'ensemble GAAE_Redresseur_Hacheur_Charge.

Le schéma Matlab-Simulink du modèle général est illustré dans la figure IV.6 suivante :

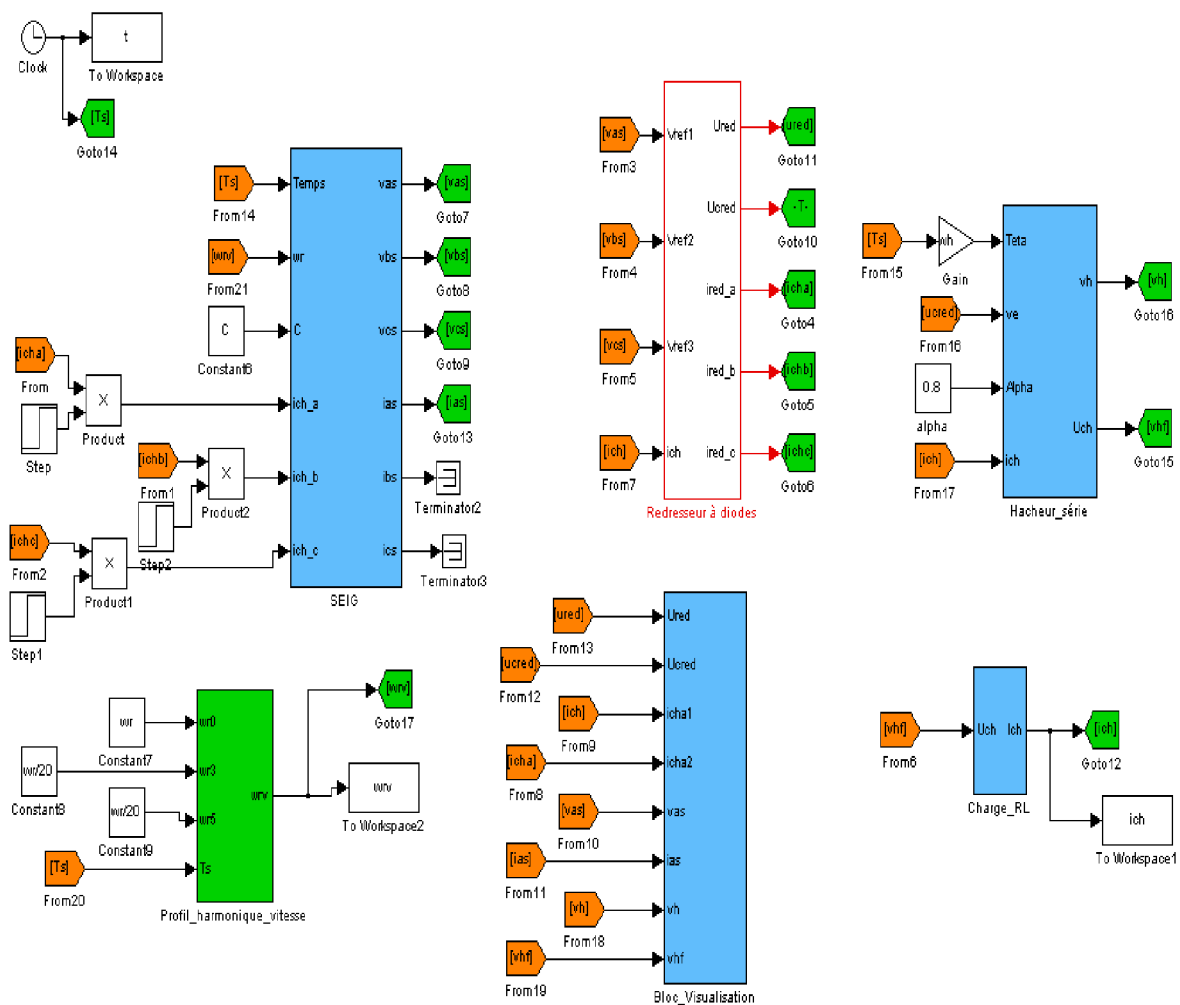


Figure IV.6 : Schéma sous Matlab-Simulink de l'ensemble GAAE_Redresseur_Hacheur_Charge

IV.3 Simulation et interprétation des résultats de l'ensemble GAAE_Red_charge

Dans ce qui suit, on a inséré au générateur asynchrone un redresseur à diodes. Ce dernier contient un filtre qui permet de minimiser les ondulations de la tension redressée en régime permanent. Les simulations effectuées nous donnent les résultats suivants :

IV.3.1 Fonctionnement à vide

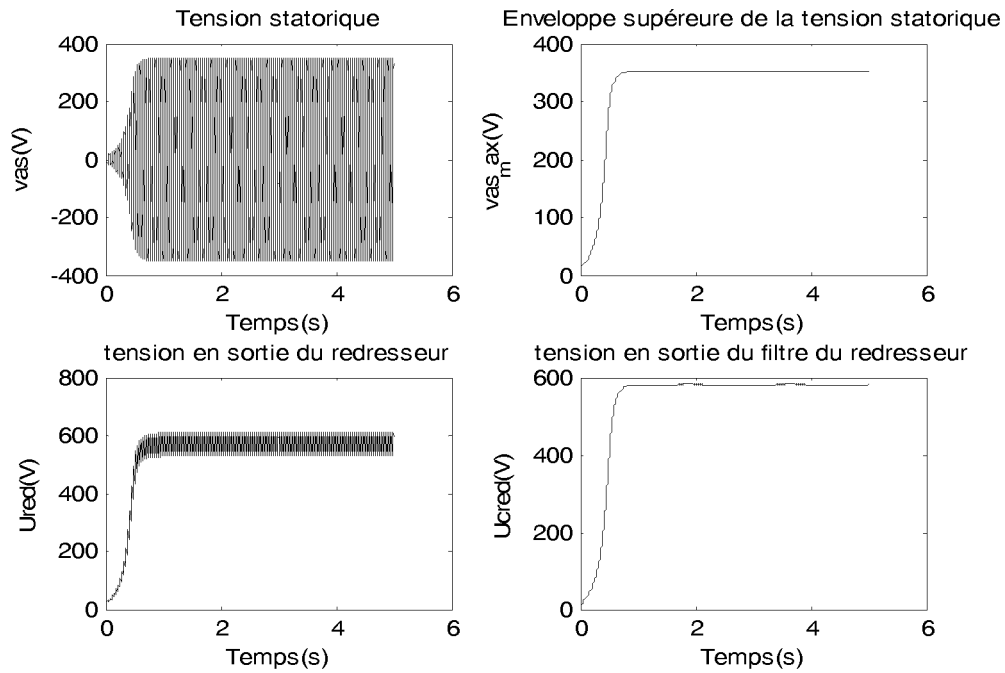


Figure IV.7 : Tensions délivrées par le générateur asynchrone et tensions en sortie du redresseur pour un fonctionnement à vide

IV.3.2 Effet du branchement d'une charge

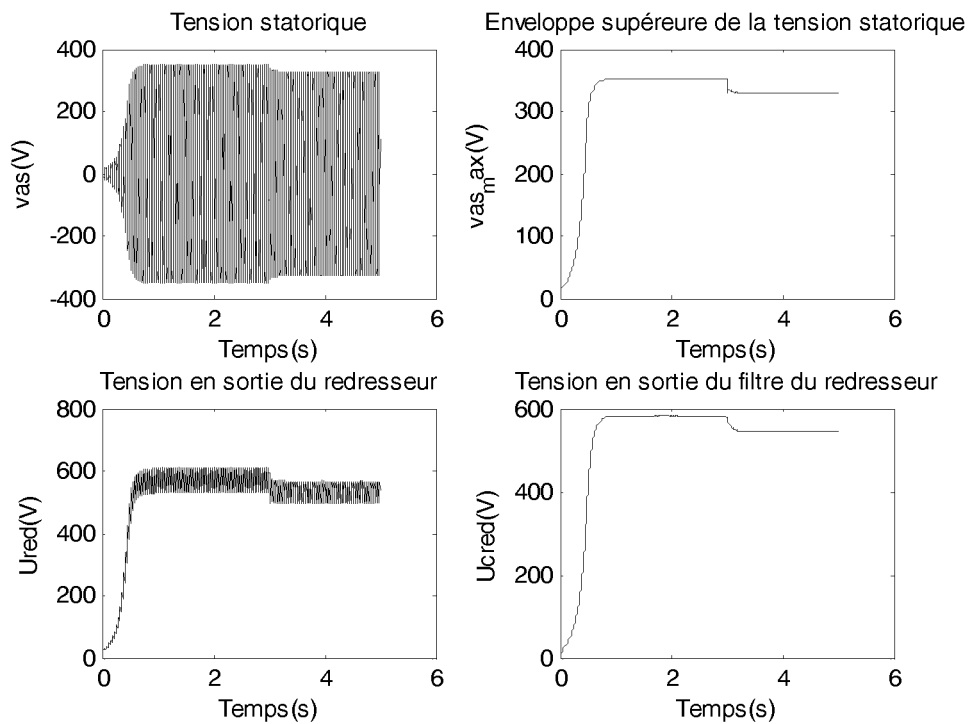


Figure IV.8: Tensions délivrées par le générateur asynchrone et tensions en sortie du redresseur pour un fonctionnement à vide et branchement d'une charge à $t=3s$.

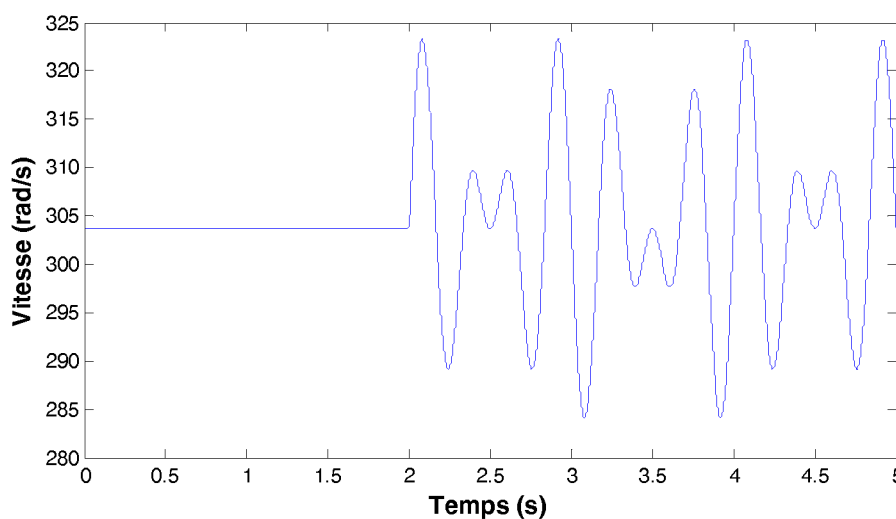


Figure IV.9: Profil de vitesse.

IV.3.3 Effet de variation de la vitesse de rotation.

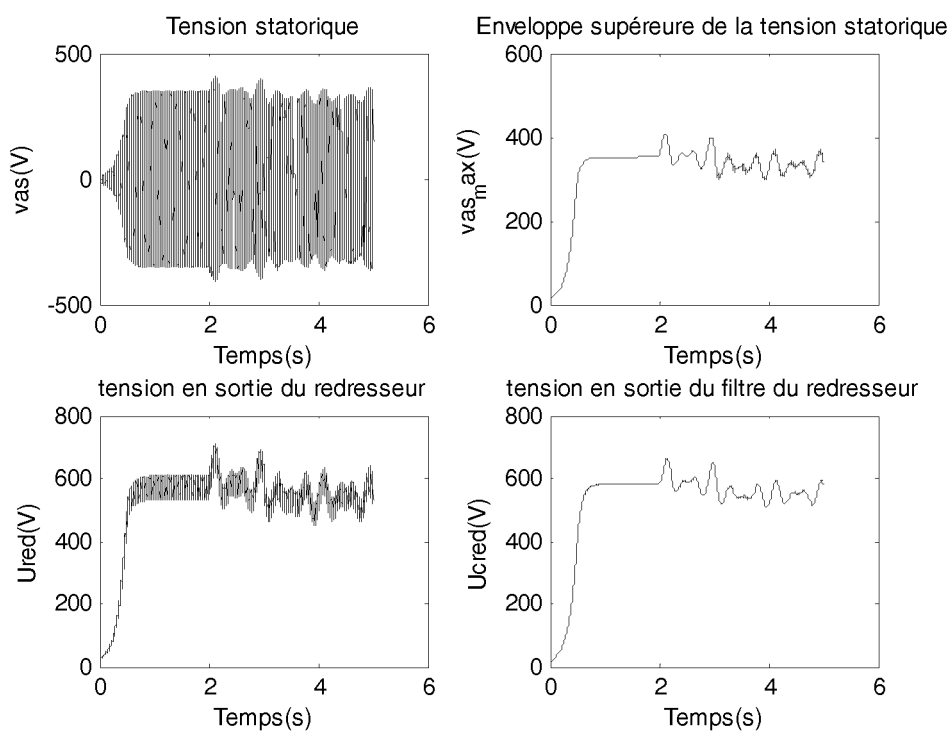


Figure IV.10 : Tensions délivrées par le générateur asynchrone et tensions en sortie du redresseur pour un fonctionnement à vitesse variable

➤ Interprétation des résultats

Nous donnons les allures de l'évolution de la tension statorique et celle en sortie du redresseur à partir de deux tests par simulation :

- Un test à vitesse constante et à charge variable,

- Un test à vide et à vitesse variable.

A vide, la tension statorique et celle à la sortie du redresseur augmente jusqu'à atteindre une valeur fixe, à $t=3s$ la tension diminue à l'instant d'introduction de la charge (Figure IV.8), la machine est entraînée à une vitesse constante. Les résultats de simulation obtenus pour une vitesse variable montrent que la tension statorique et celle redressée sont très affectées par la vitesse qui varie selon le profil montré dans la Figure (IV.9).

IV.4 Résultats de l'ensemble Générateur Asynchrone_Redresseur_Hacheur

En ajoutant au modèle étudié précédemment un hacheur série dévolteur, cette adaptation a pour but de maintenir la tension à une valeur constante en agissant directement sur le rapport cyclique α . Les simulations effectuées ont donné les résultats suivants :

IV.4.1 Vitesse Variable

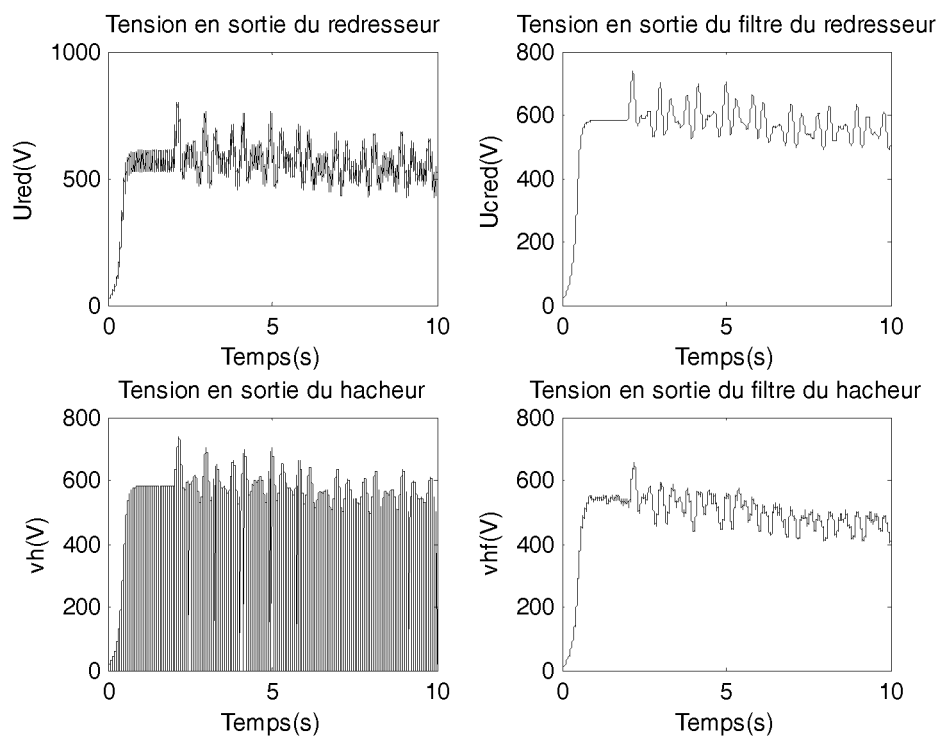


Figure IV.11 : Tensions en sortie du redresseur et du hacheur pour une vitesse variable.

IV.4.2 Charge Variable

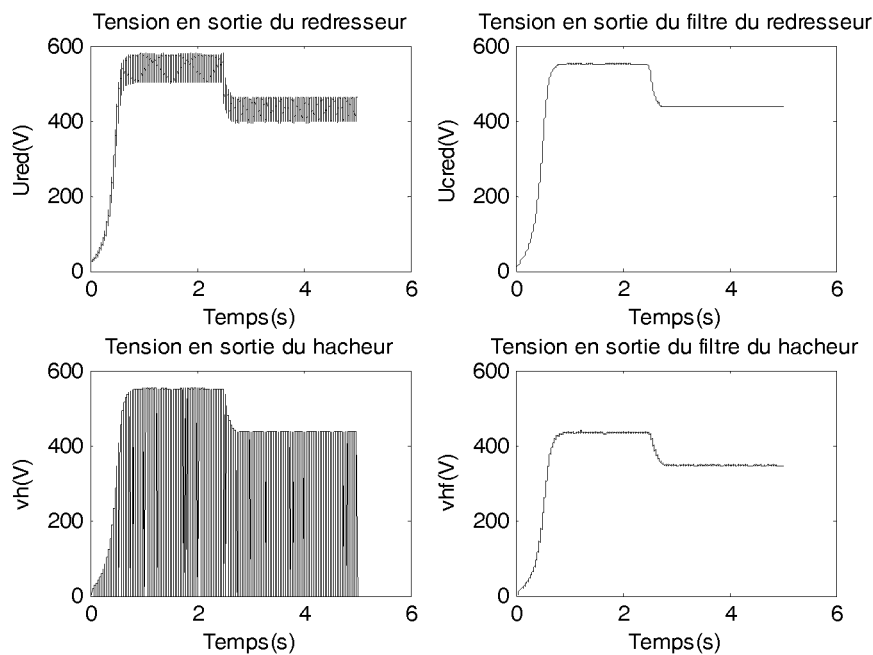


Figure IV.12 : Tension en sortie du redresseur et de hacheur pour un auto-amorçage à vide et un branchement d'une charge à $t=3s$.

➤ Interprétation des résultats

Comme dans le cas du modèle précédent, la tension obtenue après insertion d'un hacheur, et pour des variations de vitesse on remarque que la tension suit le profil de vitesse avec une petite chute de tension ce qui est montré sur la figure (IV.11).

Egalement pour les variations de la charge voir figure (IV.12), la tension de sortie diminue à l'instant d'introduction de la charge.

IV.5 Conclusion

Après avoir effectué les différents tests de simulation sous Matlab Simulink sur la génératrice asynchrone auto excitée, les résultats montrent que la tension obtenue à la sortie est sensible aux différentes variations, soit de la vitesse ou bien de la charge.

A partir de ces résultats, on constate qu'une génératrice asynchrone auto-excitée autonome doit être munie d'un régulateur de tension afin de la maintenir constante quel que soit les variations de charge ou de la vitesse, c'est cet aspect que nous allons développer dans le chapitre suivant.

Chapitre V

V.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons utilisé la SEIG connectée à des convertisseurs (Redresseur et Hacheur), les résultats obtenus ont montré que la tension est très sensible aux variations de la vitesse et celle de la charge.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la commande de cette tension afin de la maintenir constante, pour assurer cette dernière on fait appel à un régulateur de tension de type PI. Le système à commander est celui du chapitre précédent, et on effectue les différentes simulations sous Matlab Simulink en variant la vitesse et la charge.

V.2 Régulation proportionnelle et intégrale (PI)

V.2.1 Description du système de régulation

Pour contrôler la tension de la SEIG qui est excitée par un banc de condensateurs, on fait appel à un régulateur de type PI, cette commande est réalisée en boucle fermée pour contrôler la tension en sortie du hacheur lors des variations de la charge et de la vitesse.

Le régulateur proportionnel intégral noté PI est composée de la fonction proportionnelle et de la fonction intégrale mises en parallèle. Sa fonction de transfert est :

$$C(p) = k_i + \frac{k_p}{p} \quad (\text{V.1})$$

D'où :

k_i : est le gain intégral.

k_p : est le gain proportionnel.

L'avantage principal d'un régulateur PI est qu'il annule l'erreur statique grâce à la fonction intégrale.

La tension filtrée en sortie du hacheur est régie par l'équation suivante :

$$U_{red} = R_h \cdot i_h + U_h \quad (\text{V.2})$$

$$i_h = C_h \cdot \frac{dU_h}{dt} \quad (\text{V.3})$$

$$U_{red} = R_h \cdot C_h \cdot \frac{dU_h}{dt} + U_h \quad (\text{V.4})$$

$$\frac{dU_h}{dt} = \frac{1}{R_h \cdot C_h} (U_{red} - U_h) \quad (\text{V.5})$$

Dans le domaine fréquentiel, cette équation s'écrit :

$$U_{red}(p) = R_h \cdot C_h \cdot p \cdot U_h(p) + U_h(p) + U_h(p) \cdot (1 + R_h \cdot C_h \cdot p) \quad (\text{V.6})$$

$$U_h(p) = \frac{U_{red}(p)}{(1 + R_h \cdot C_h \cdot p)} \quad (V.7)$$

On considère donc que notre système est du 1^{er} ordre de gain statique G_0 et de constante de temps τ , comme le montre l'équation de transfert (V.8) :

$$G(p) = \frac{G_0}{(1 + \tau p)} \quad (V.8)$$

Avec :

$$G_0 = U_{red_moy}$$

$$\text{et } \tau = R_h \cdot C_h$$

Le calcul des coefficients k_i et k_p du régulateur se fait en utilisant la méthode de compensation des pôles, ce qui donne une expression des deux gains du régulateur comme suit :

L'équation du système global en boucle fermée s'écrit :

$$G_{bf}(p) = \frac{k_p \left(p + \frac{k_i}{k_p} \right) G(p)}{1 + k_p \left(p + \frac{k_i}{k_p} \right) G(p)} \quad (V.9)$$

En remplaçant $G(p)$ par son expression (IV.7) dans l'équation (V.9), on obtient :

$$G_{bf}(p) = \frac{k_p \left(p + \frac{k_i}{k_p} \right) \cdot \frac{U_{red}(p)}{(1 + R_h \cdot C_h \cdot p)}}{1 + k_p \left(p + \frac{k_i}{k_p} \right) \cdot \frac{U_{red}(p)}{(1 + R_h \cdot C_h \cdot p)}} \quad (V.10)$$

En boucle ouverte :

$$G_{bo}(p) = \frac{k_p}{p} \left(p + \frac{k_i}{k_p} \right) \frac{G_0}{\tau \left(p + \frac{1}{\tau} \right)} \quad (V.11)$$

La méthode de compensation des pôles stipule qu'il faut compenser le pôle de la fonction

$p + \frac{1}{\tau}$ du dénominateur de $G(p)$ par la fonction $\left(p + \frac{k_i}{k_p} \right)$ au numérateur du régulateur, on

impose donc : $\frac{k_i}{k_p} = \frac{1}{\tau}$

L'équation (V.11) devient : $G_{bo}(p) = \frac{k_i \cdot G_0}{\tau \cdot p}$

Qui en boucle fermée donne :

$$G_{bf} = \frac{\frac{k_i \cdot G_0}{\tau}}{p + \frac{k_i \cdot G_0}{\tau}} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{k_i \cdot G_0} p} = \frac{1}{1 + \tau_{bf} p}$$

Avec : $\tau_{bf} = \frac{\tau}{k_i \cdot G_0}$ la constante de temps de la boucle fermée.

D'où :

$$k_i = \frac{\tau}{\tau_{bf} \cdot G_0}$$

et

$$k_p = \tau \cdot k_i = \tau \cdot \frac{\tau}{\tau_{bf} \cdot G_0}$$

Nous allons utiliser le régulateur $C(p)$ pour contrôler notre système $G(p)$ illustré par le schéma de la figure (V.1).

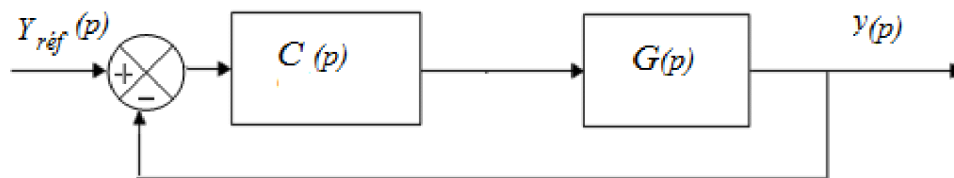


Figure V.1: Schéma d'un système de commande en boucle fermée.

Le schéma Matlab-Simulink du régulateur $C(p)$ se présente comme suit :

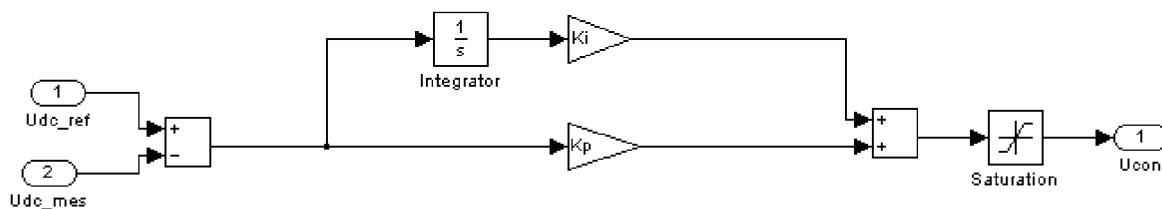


Figure V.2 : Schéma sous Matlab Simulink du régulateur $C(p)$.

Nous obtenons enfin le système global régulé comme montré sur le schéma Matlab-Simulink de la figure (V.3) :

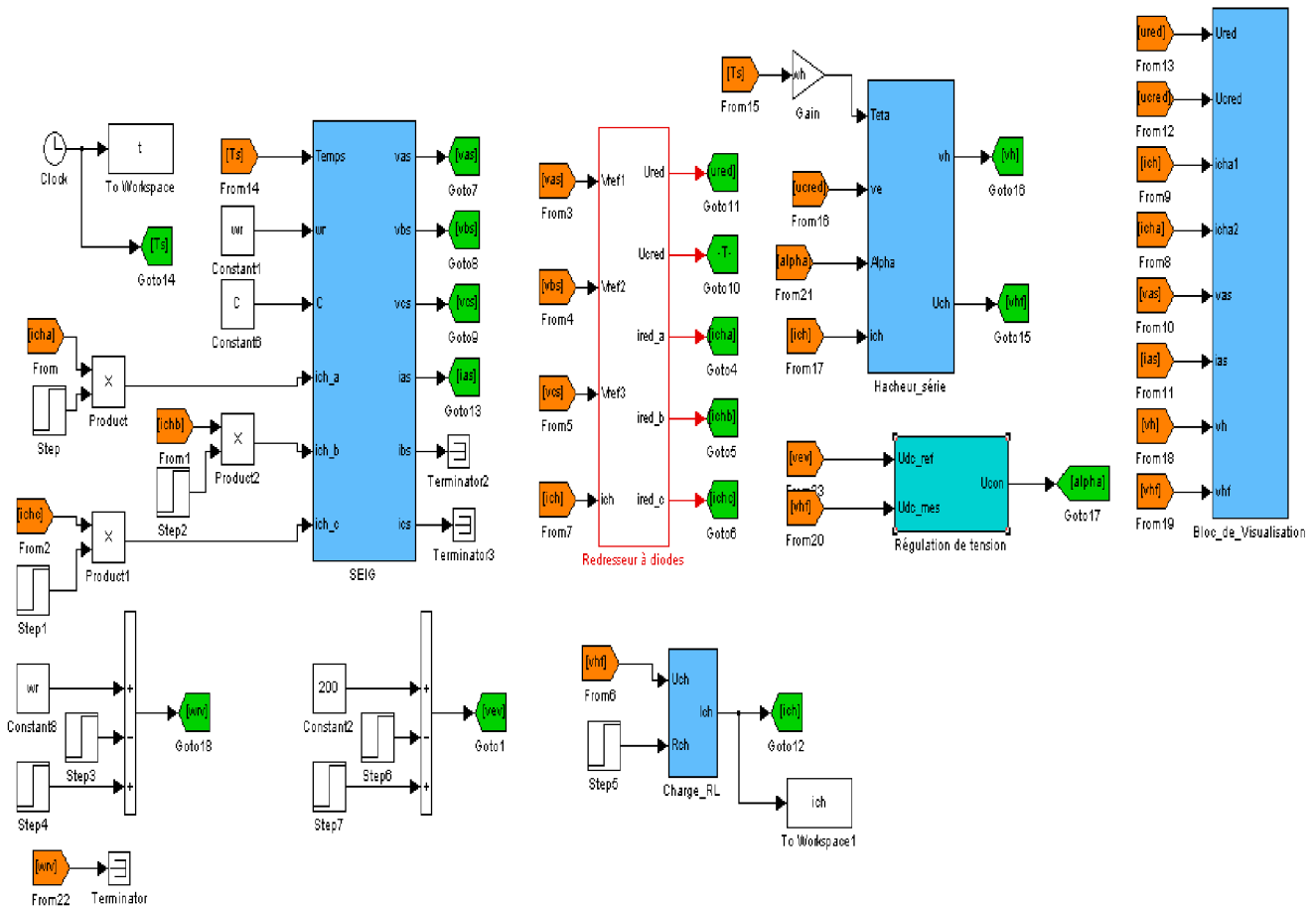


Figure V.3: Schéma sous Matlab Simulink du système global régulé.

Dans ce qui suit, nous allons effectuer des simulations dans les mêmes conditions que celles du chapitre précédent, pour montrer l'apport du régulateur de tension.

Deux tests seront donc menés :

- Variation de la vitesse suivant un profil de vitesse.
- Variation en échelon de la charge

V.3 Simulation et interprétation des résultats

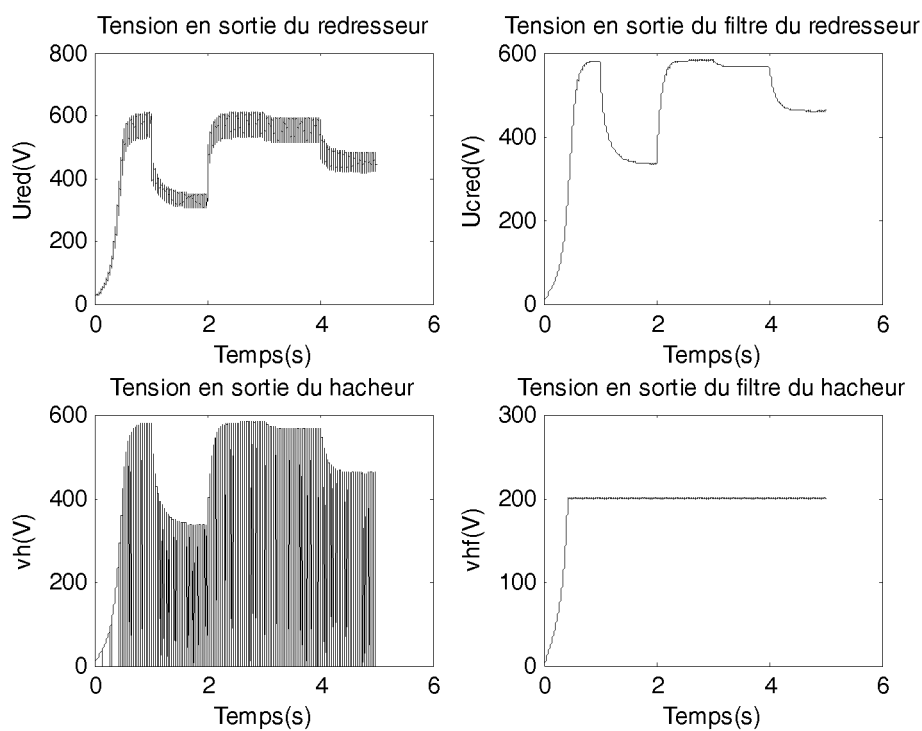


Figure V.4: Réponse du système régulé à un profil de vitesse et à une augmentation de la charge

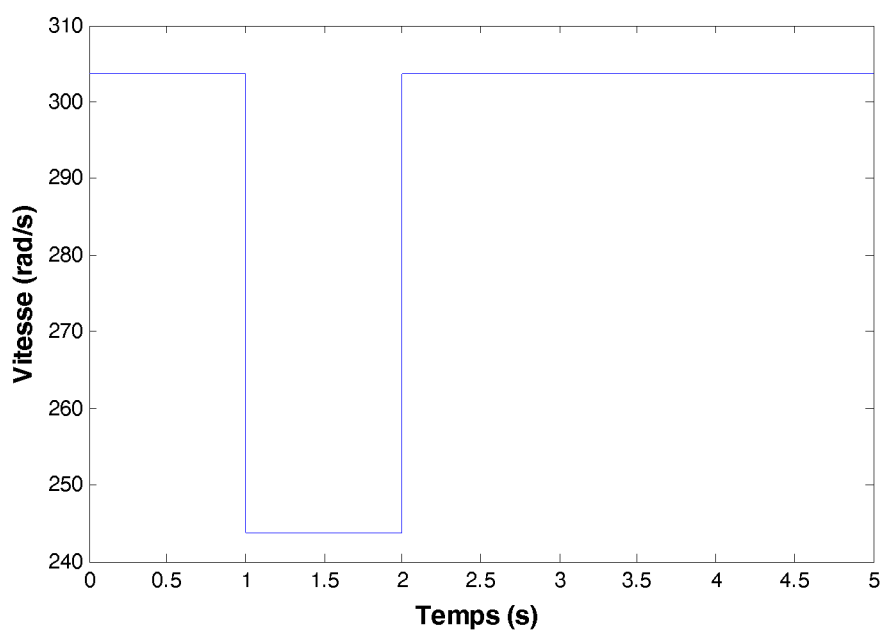


Figure V.5 : Profil de vitesse.

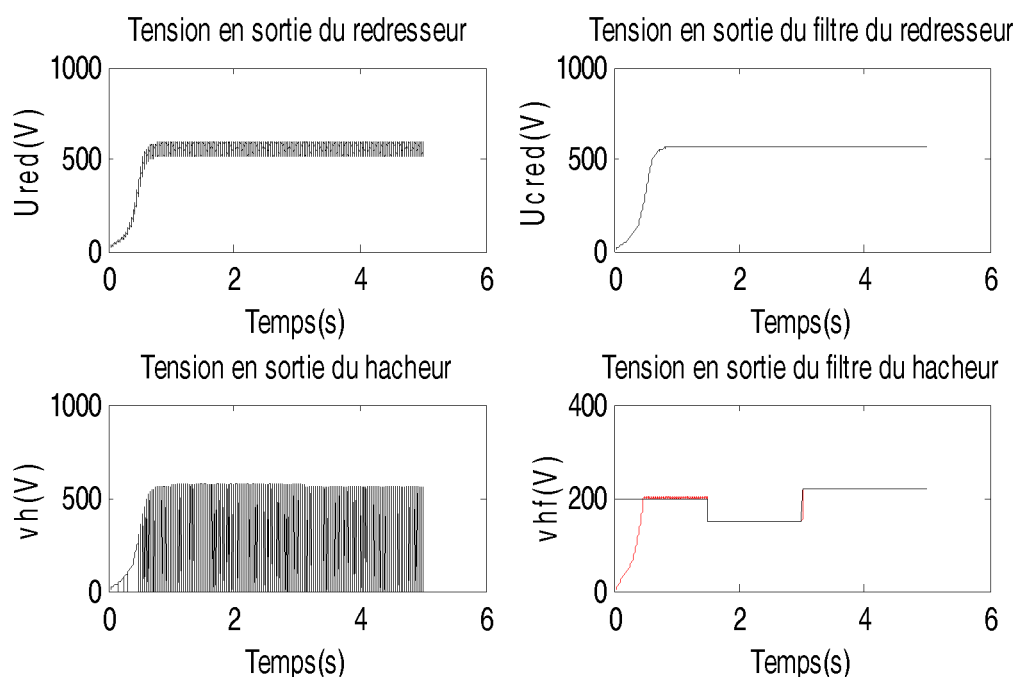


Figure V.6: Réponse à une tension de référence du hacheur variable.

➤ Interprétation

Les résultats des deux tests par simulation (voir figure (V.4) et figure (V.6)) effectués ont montré que la tension à la sortie est maintenue constante, ce qui nous permis de constater que la commande du système par un régulateur PI est efficace, dans les deux cas de variation soit de la charge ou bien de la vitesse. La variation de la vitesse se fait selon un profil de vitesse illustré dans la figure V.5 et la variation de la charge se en échelon à un instant donné identiquement au chapitre précédent.

V.4 Conclusion

Ce dernier chapitre à été consacré à la commande de la SEIG débitant sur une charge résistive à travers une cascade formée d'un redresseur à diodes et d'un hacheur série. Un régulateur PI est utilisé afin de maintenir la tension constante à la sortie en dépit des variations de la vitesse de rotation et de la charge.

Des tests par simulations sous Matlab-Simulink ont été effectués et les résultats ont montré que le régulateur PI utilisé a permis de maintenir la tension de sortie constante malgré les variations de la vitesse et de la charge. Il est également montré qu'il est possible de faire suivre au système une consigne de tension variable.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire a consisté en la modélisation, l'identification et la régulation de tension d'une génératrice asynchrone auto excitée utilisée dans les systèmes autonomes de conversion de l'énergie éolienne.

Nous avons consacré un premier chapitre à des généralités sur les éoliennes à base de la machine asynchrone auto excitée, nous avons présenté les différents constituants et les différents types d'éoliennes. Nous avons ensuite présenté quelques chaînes de conversion d'énergie éolienne utilisant exclusivement la génératrice asynchrone auto-excitée.

Le second chapitre a été dédié à la modélisation de la machine asynchrone fonctionnant en génératrice autonome. Nous avons construit à partir du modèle de Park les équations du modèle linéaire, celui-ci fait appel à des matrices d'inductances constantes. Par la suite, nous avons présenté la procédure de prise en compte de l'effet de la saturation de la génératrice en régime dynamique, en introduisant dans le modèle linéaire une inductance magnétisante variable en fonction du courant magnétisant.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit les méthodes d'identification des paramètres du schéma équivalent de la SEIG, ces méthodes sont exploitées pour des essais expérimentaux effectués sur une machine asynchrone à cage d'une puissance de 1.1 KW existant dans le laboratoire des machines électriques. Des calculs analytiques sont suivis après l'expérience pour déterminer la valeur numérique de chacun de ces paramètres. L'identification de l'inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant a été effectuée, son approximation a été réalisée par une expression polynomiale de degré 4.

Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié les performances de la génératrice asynchrone en fonctionnement autonome, débitant sur une charge résistive inductive à travers un redresseur à diodes et un hacheur. L'objectif de cette étude était de montrer la sensibilité de la tension aux variations de la vitesse et celle de la charge. Par la suite des tests de simulations sont effectuées ; un test à vitesse constante et à charge variable et un test à vide et à vitesse variable. Les résultats montrent que la tension obtenue à la sortie est sensible aux différentes variations, soit de la vitesse ou bien de la charge. Ce qui nous mène à la nécessité d'utiliser un régulateur de tension à la sortie pour la maintenir constante.

Dans le dernier chapitre, nous avons utilisé un régulateur de tension de type PI pour maintenir la tension de sortie constante. Le système régulé a été soumis aux mêmes tests par simulation que dans le chapitre précédent, pour montrer l'apport du régulateur. Les résultats de simulations sous Matlab Simulink ont montré une bonne régulation de tension de sortie et une bonne robustesse vis-à-vis des variations de vitesse ou de charge.

Références

Références

- [1] **Madjid Si brahim**, « Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone », thèse de Doctorat 3^{ème} cycle LMD en électrotechnique, UMMTO, 2015.
- [2] **F.Poitiers**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, France 2003.
- [3] **P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi**, « Eolienne », Techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp, BM4 640 1-BM4 6402 1.
- [4] **S. El Aimani**, « Modélisation de différents Technologie d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension »Thèse de doctorat, Université de Lille, décembre 2004.
- [5] **A. Boyette**, « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »,Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, France, décembre 2006.
- [6] **B. Multon ,G. Robin**, « Le génie électrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne »,C.G.E03,Saint-Nazaire ,juin 2003.
- [7] **A. Davigny**, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université de Lille ,2007.
- [8] **H.Camblong**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'Arts et métiers centre de Bordeaux, décembre 2003.
- [9] **M. Kassa Idjdarene**, « Contribution à l'Etude et la commande de Génératrice Asynchrone à cage Dédiées à des centrales Electrique Eolienne Autonomes », Thèse de doctoral Université Abderrahmane Mira _Bejaia, 2010 .
- [10] **D.Seyoum,M.F.Rahman et C.Grantham**-« Terminale voltage contrôle of a wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented feild control », Applied power Electronics conference and exposition (APE'03), Eighteenth Annual IEEE , vol.2 Miami Beach,9_13 février 2003,pp.846-852.
- [11] **A.Nesba,R.Ibtiouen et O.Touhami** : « Dynamic performance of self-excited iduction generator feeding different static laods », Serbian Journal of Electrical Engineering ,vol 3, No 1,june 2006,pp63-76.
- [12] **D. Rekioua, T. Rekioua, K. Idjdarene et A. Tounzi** – « An approach for the modeling of an autonomous induction generator taking into account the

Références

saturation effect », International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 4, Issue 1, December 2005, pp. 1-25.

[13] **L. Wang et C. Cheng** – « Excitation capacitance required for an isolated three-phase induction generator supplying a single-phase load », Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 23-27 January 2000, pp. 299-303.

[14] **L. Wang et R. Deng** – « A novel analysis of an autonomous three-phase delta-connected induction generator with one capacitor », Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2006, pp. 1-6.

[15] **A. H. Al-Bahrani, N. H. Malik** – « Steady state analysis and performance characteristics of a three-phase induction generator self excited with a single capacitor », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 5, No. 4, December 1990, pp. 725-732

[16] **K. Idjdarene, D. Rekioua et D. Aouzellag** – « Modélisation et simulation D'une chaîne de conversion à énergie éolienne basée sur une génératrice Asynchrone en fonctionnement autonome », 3rd Conference on Electrical Engineering, Batna, Algeria, 04-06 October 2004, pp. 294-297.

[17] **A. Tounzi** – « Utilisation de l'énergie éolienne dans la production de L'électricité », Journées du club EEA, 28-29 Janvier, 1999, Paris, France, pp.1-14.

[18] **M. Al-Saffar, E. Nho, et T. A. Lipo** – « Controlled shunt capacitor self-excited induction generator », IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Third IAS Annual Meeting, vol. 2, 12-15 October 1998, pp. 1486-1490.

[19] **L. A. C. Lopes et R. G. Almeida** – « Operation aspects of an isolated wind driven induction generator regulated by a shunt voltage source inverter », Industrial Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE, Vol. 4, 8-12 October 2000, pp. 2277-2282.

[20] **M. L. Elhafyani, S. Zouggar, A. Aziz et M. Benkaddour** – « Conception et Modélisation d'un système éolien contrôlé par un régulateur de tension », Colloque International Sur les Énergies Renouvelables (CER'2007), Oujda, Maroc, 4-5 Mai 2007, pp. 1-5.

Annexes

Calcul de l'inverse de la matrice inductance :

Ce calcul se fait manuellement ou en utilisant un logiciel spécialisé dans l'inversion littérale des matrices tels que MathWorks ou Matlab.

$$\begin{pmatrix} l_{s\sigma} & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_{s\sigma} & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_{r\sigma} & 0 & L_{mdr} & L_{dq} \\ 0 & -l_{r\sigma} & L_{dq} & L_{mqr} \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$D = (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq}) \cdot (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md}) - L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})^2$$

$$x_{11} = L_{mdr} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq}) - L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})^2$$

$$x_{12} = l_{r\sigma} L_{dq} (L_{mdr} - L_{md})$$

$$x_{13} = L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma}) - L_{md} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq})$$

$$x_{14} = l_{s\sigma} L_{dq} (L_{mdr} - L_{md})$$

$$x_{21} = -l_{r\sigma} L_{dq} (L_{mqr} - L_{mq})$$

$$x_{22} = L_{mqr} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md}) - L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})^2$$

$$x_{23} = -l_{s\sigma} L_{dq} (L_{mqr} - L_{mq})$$

$$x_{24} = L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma}) - L_{mq} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md})$$

$$x_{31} = l_{r\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq})$$

$$x_{32} = -l_{r\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{33} = l_{s\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq})$$

$$x_{34} = -l_{s\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{41} = -l_{r\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{42} = l_{r\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md})$$

$$x_{43} = -l_{s\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{44} = l_{s\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md})$$

Annexe B

Paramètres de la machine asynchrone modélisée

Les paramètres électriques :

- Rotor à cage d'écureuil.
- 2 paires de pôles.
- $\Delta/Y230/400V -4.6/2.65A-1.1kW-50Hz-1410 \text{ tr/min}$

Les paramètres identifiés :

- $R_s=9.58 \Omega$ Résistance statorique.
- $R_r=4.99 \Omega$ Résistance rotorique.
- $l_{\sigma s}=0.019 \text{ H}$ Inductance de fuite statorique.
- $l_{\sigma r}=0.019 \text{ H}$ Inductance de fuite rotorique ramené au stator.
- $L_m=0.4792 \text{ H}$ Inductance magnétisante.

Paramètres du redresseur à diodes

- $R_{red}=9 \Omega$ Résistance du filtre de redresseur.
- $C_{red}=4700 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ Capacité du filtre du redresseur.

Paramètres du hacheur série

- $R_h=9 \Omega$ Résistance du filtre du hacheur.
- $L_h=0.12 \text{ H}$ inductance du filtre du hacheur.
- $C_h=4700 \cdot 10^{-6} \text{ F}$ Capacité du filtre du hacheur.

Paramètres du régulateur de tension

- $K_p=0.07$ Gain proportionnel.
- $K_i=0.5$ Gain intégral.