

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par

Farid ZEMMOUK

Ghiles ROUAS

Thème

Développement du modèle dynamique d'une génératrice asynchrone auto- excitée en régime saturé

Mémoire soutenu publiquement le 29 / 09 / 2015 devant le jury composé de :

M^{me} Feroudja. MEGHERBI-BITAM

Professeur, UMMTO, Présidente

M^r Salah. HADDAD

Professeur, UMMTO, Encadreur

M^{elle} Rahma. KACHENOURA

Maitre Assistante Classe A, UMMTO, Examinatrice

M^r M'hend. MEKIOUS

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à M^r. HADDAD Salah, professeur au département Électrotechnique qui nous a proposé ce sujet, nous a orienté le long de la réalisation de ce mémoire et nous a prodigué les précieux conseils qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude. Nous tenons également à remercier vivement M^r ROUAS Rabah et M^r SI BRAHIM Madjid et toute personne qui nous a aidés 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.

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chers parents

A mes sœurs Fetta, Nassima et son mari, Lamia et son mari ainsi leurs enfants Yanis,

Mayas et Wiwiz

A mon frère Rabah et sa fiancée

A ma grand-mère maternelle

A la mémoire de mes défunts, mon oncle Saïd et mon très cher ami Halim

A toute ma famille et tous ce qui me sont cher(es)

A tous mes ami(e)s surtout Lounis, Achour, Lynda et Kahina

A toute la promotion d'électrotechnique 2015

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

Ghiles.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chers parents

A mon frère Salim

A toute ma famille et tous ce qui me sont cher(es)

A tous mes ami(e)s sans exception

A toute la promotion d'électrotechnique 2015

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

Farid.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes	
I.1.Introduction.....	3
I.2. Définition de l'énergie éolienne	3
I.3. Principaux composants d'une éolienne.....	4
I.3.1.Le mât (tour)	4
I.3.2.Un rotor	5
I.3.3.Une nacelle.....	5
I.3.4.Un arbre principal	5
I.3.5.Le multiplicateur de vitesse	5
I.3.6.Un frein	5
I.3.7. La générateur électrique	5
I.3.8.Une girouette	6
I.3.9.L'anémomètre	6
I.3.10.Un système de contrôle	6
I.3.11.Une unité de refroidissement	6
I.3.12.Une fondation	6
I.4. Les différents types d'éoliennes	6
I.4.1 Éoliennes à axe vertical	6
I.4.2.Éoliennes à axe horizontal	7
I.5. Chaîne de conversion de l'énergie éolienne	8

I.5.1. Conversion énergie cinétique –mécanique	9
I.5.2. Description d'une pale éolienne	10
I.6. Conclusion	11

Chapitre II : Modélisation de la génératrice asynchrone auto-excitée

II.1. Introduction	12
II.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone auto excitée	12
II.3. Modélisation de la machine asynchrone.....	13
II.3.1. Modèle linéaire	13
II.3.2. Modèle saturé	18
II.4. Modélisation de l'auto amorçage	27
II.4.1. Auto amorçage à vide	27
II.4.2. Fonctionnement en charge	29
II.4.2.1. Charge équilibrée.....	29
II.4.2.2. Charge déséquilibrée	30
II.5. Conclusion	31

Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

III.1 Introduction	32
III.2 Fonctionnement à vide	32
III.2.1 Schéma simulink de la GAAE à vide.....	32
III.2.2 Résultat de simulation	33
II.2.3 Influence de la capacité d'auto-amorçage	35

III.3 Fonctionnement en charge.....	36
III.3.1 Charges équilibrées	37
III.3.1.a Charge résistive (R)	37
III.3.1.b Charge résistive-inductive (RL)	40
III.3.2 Charge déséquilibrée	43
III.3.2.a Charge déséquilibrée résistive(R)	43
III.3.2.b Charge déséquilibrée résistive-inductive(RL)	45
III.4 Conclusion.....	48
 Chapitre IV : Modèle de la chaine de conversion MCC-GAAE	
IV.1 Introduction	49
IV.2 Description d'un moteur à courant continu.....	49
IV.3 Principe de fonctionnement	50
IV.4 Modélisation de la machine a courant continu.....	50
IV.5 Résultats de simulation	52
IV.6 Conclusion	55
Conclusion générale	56
Annexe a	58
Annexe b	60
Références bibliographiques	61

Introduction générale

Introduction générale

La machine asynchrone est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie, surtout en fonctionnement moteur. En plus, cette machine offre la possibilité d'utilisation comme générateur. Dans ce dernier mode de fonctionnement, la machine asynchrone équipe la majorité des éoliennes dans la gamme de la moyenne puissance.

Pour une génératrice asynchrone autonome, l'hypothèse de la linéarité n'a plus de sens, la saturation devient indispensable lors de son fonctionnement. Ce qui nous a amené à étendre le modèle linéaire à la saturation.

L'utilisation de la machine asynchrone dans ce mode de fonctionnement particulier commence à s'élargir grâce d'une part, au développement actuel des dispositifs de l'électronique de puissance, qui permettent de surmonter le problème de régulation de la génératrice autonome. D'autre part, grâce aux avantages présentés par la génératrice :

Son coût peu élevé, sa robustesse et sa construction simple, l'absence de contacts glissants, maintenances non régulière, etc....

Ces avantages ont amené beaucoup de chercheurs à se consacrer à l'étude des performances de cette machine. Cependant, la plupart d'entre eux n'ont abordé que le fonctionnement en régime établi de la génératrice. Relativement peu de travaux sont basés sur l'analyse des régimes dynamiques.

Notre travail consiste en la modélisation et la simulation d'une génératrice asynchrone auto-excitée d'une puissance de 3,5 kw, fonctionnant en site isolé.

Ce qui nous conduit à orienter notre recherche vers l'analyse de ces régimes dynamiques à vide et en charge.

Nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la description de l'énergie éolienne et à la présentation de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent. Nous donnerons quelques notions sur le vent, et on nous citerons les différents types d'éoliennes et donnerons une description générale sur les principaux composants qui les constituent.

Introduction générale

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation de la machine asynchrone fonctionnant en génératrice autonome. Le modèle est établi en utilisant la transformation de Park en régime linéaire puis en régime saturé. Par la suite, on va présenter la procédure de prise en compte de l'effet de la saturation magnétique de la génératrice en régime dynamique, en introduisant dans le modèle linéaire une inductance magnétisante variable en fonction du courant magnétisant, en fin on va rajouter les équations d'auto-amorçage à vide et en charge.

Le troisième chapitre est consacré à développer des programmes sous Matlab-Simulink à l'aide des équations décrites dans le deuxième chapitre, et on va effectuer plusieurs tests de simulation.

Dans le premier cas on va simuler un fonctionnement à vide pour étudier l'influence de la capacité d'auto-amorçage sur l'amplitude et la dynamique de la tension statorique, et dans le deuxième cas on va faire des tests de fonctionnement avec des charges équilibrées et déséquilibrées (R et RL).

Au quatrième chapitre on va introduire une machine à courant continu pour entrainer notre génératrice, donc on va réaliser un schéma sous Matlab-Simulink de l'ensemble MCC-GAAE et on va montrer l'influence du couple électromagnétique de la génératrice sur la vitesse de rotation et l'amplitude de la tension et du courant statorique.

Le mémoire sera clôturé par une conclusion générale, une annexe et une bibliographie indiquant quelques sources d'informations utilisées.

Chapitre I

I.1.Introduction

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique connaît un essor considérable depuis quelques décennies. Cela est dû d'une part à des contraintes d'ordre environnemental mais également à une maîtrise de plus en plus grande des technologies mises en œuvre pour assurer cette conversion. Le secteur de la production d'énergie électrique est indéniablement celui qui a connu les avancées les plus significatives. En effet, le but initial est de favoriser la pénétration des énergies renouvelables dans la production globale de l'énergie électrique.

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne et sur les différentes chaînes utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne. [13]

I.2. Définition de l'énergie éolienne

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

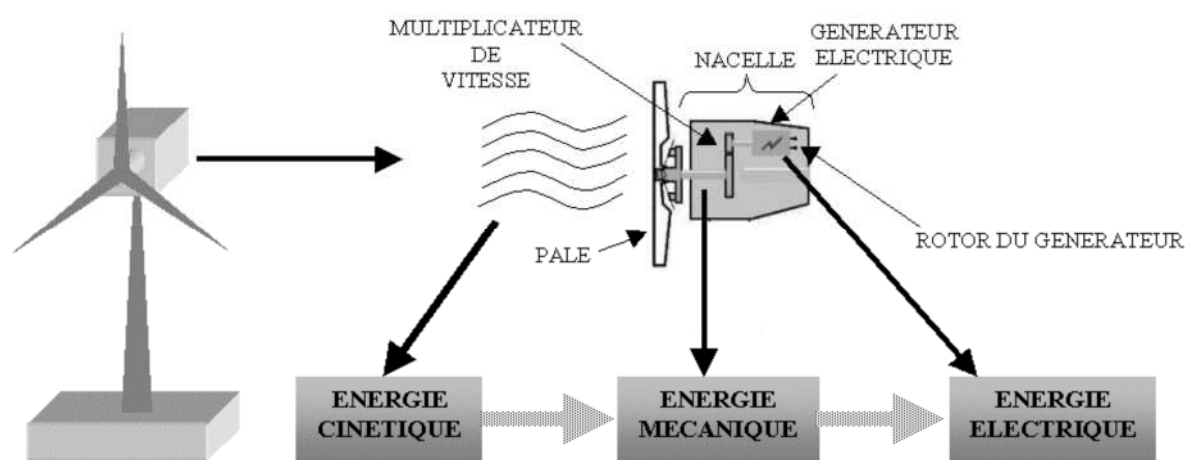


Figure I-1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [2]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radio actif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de

plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être de technologie avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative fiable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. [1],[12],[13]

I.3. Principaux composants d'une éolienne

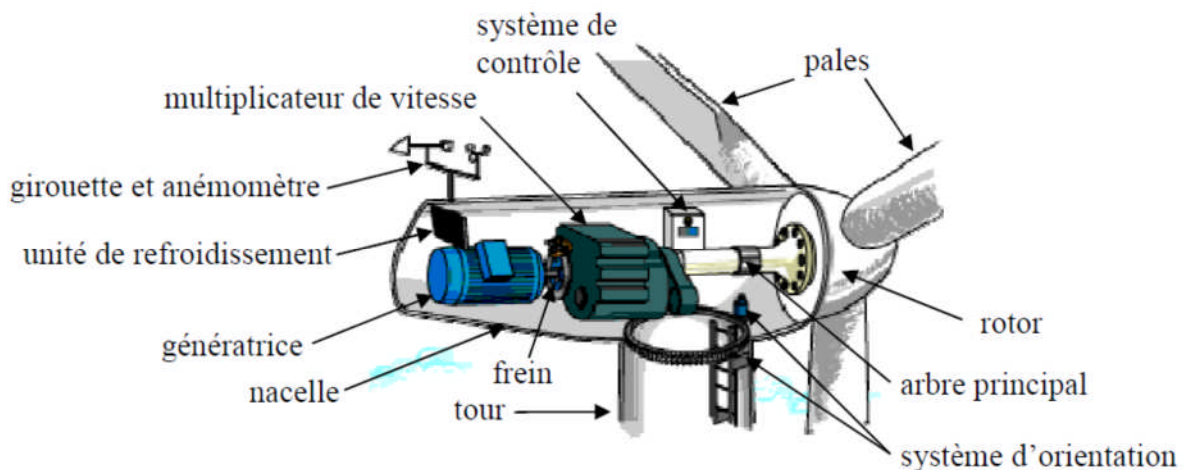


Figure I-2 : Principaux composants d'une éolienne [12]

I.3.1. Le mât (tour)

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle plus rotor). 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 des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Si les éoliennes sont-elles si haut perchées, c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons..., et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le

rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent, d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor.

I.3.2. Le rotor

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne (moyeu). Les pâles sont faites de bois ou de fibres de verre, leur rayon peut atteindre 75 m. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pâles (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor.

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

I.3.3. La nacelle

Ce trouve au sommet du mât elle contient les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

I.3.4. L'arbre principal

Il tourne lentement et transmet une très grande force de rotation au multiplicateur.

I.3.5. Le multiplicateur de vitesse

Il est constitué d'un grand nombre de roues dentées et placées dans un engrenage. Celui-ci transforme la force lente de l'arbre principal en rotation rapide pour la génératrice.

I.3.6. Le frein

C'est un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

I.3.7. La génératrice électrique

La fonction première de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de génératrices : synchrone ou asynchrone.

I.3.8. La girouette

Elle informe le système de contrôle de la direction du vent.

I.3.9.L'anémomètre

Il mesure la vitesse du vent et informe le système de commande quand le vent souffle assez fort pour produire de l'électricité d'une manière efficace.

I.3.10. Le système de contrôle

Il est chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par l'anémomètre (vitesse du vent) et la girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

I.3.11.L'unité de refroidissement

Elle fonctionne comme un ventilateur ou un radiateur d'eau ou d'huile.

I.3.12. La fondation

Elle est faite pour empêcher l'éolienne de basculer par grands vents.

I.4. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal. [1], [12], [13]

I.4.1Éoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour la production de l'énergie électrique, elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Leurs organes de commande et le générateur se situent au niveau du sol donc facilement accessible. Il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor, cependant elles ne peuvent pas démarrer automatiquement il faut les lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production.

Elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grande distance et les câbles des haubans doivent passer au dessus des pales cela présente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole. La conception verticale impose que les éoliennes fonctionnent avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur, et en raison de leur petite taille l'énergie produite reste faible. Ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont limité le développement de ces éoliennes laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal. [1],[12]



Rotor de Savonius



Rotor de Darrieus

Figure I-3 : Éolienne à axe vertical [12]

I.4.2.Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent, leur emprise au sol est très faible et elles captent le vent en hauteur, elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. La portance de ces ailes placées dans le vent sert à générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisés est de 1 à 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Elles représentent un coût moins important que celles à axe vertical et

sont moins exposées aux contraintes mécaniques, de plus la position en hauteur privilégie l'efficacité.

Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120 m pour une puissance de 6MW. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront aux cas des éoliennes à axe horizontal. [1], [12],[2]



Éolienne tripale

Éolienne bipale

Figure 1-4 : Éolienne à axe horizontal [12]

I.5.Chaine de conversion de l'énergie éolienne

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

Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique

Une transformation 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

I.5.1. Conversion énergie cinétique – mécanique

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. Si on considère une masse d'air, m (kg), qui se déplace avec la vitesse v (m/s), l'énergie cinétique de cette masse est :

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

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface A , en une seconde est :

$$m = \rho \cdot A \cdot v \quad (\text{I.2})$$

Si pendant une unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface A (m²), située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait alors :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{I.3})$$

P_v : puissance théorique disponible dans le vent.

ρ : masse volumique de l'air.

Cependant on ne peut pas extraire la totalité de la puissance. On introduit donc, le coefficient de puissance du générateur éolien par la relation :

$$C_p = \frac{P_e}{P_v} \quad (\text{I.4})$$

P_e : puissance extraite du vent.

Ce coefficient caractérise l'aptitude du générateur éolien à capter l'énergie éolienne. La puissance correspondante est donc :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (\text{I.5})$$

R (m) : Rayon de la turbine.

La figure ci-dessous présente une classification des turbines éoliennes selon leurs dimensions et par leurs puissances délivrées :

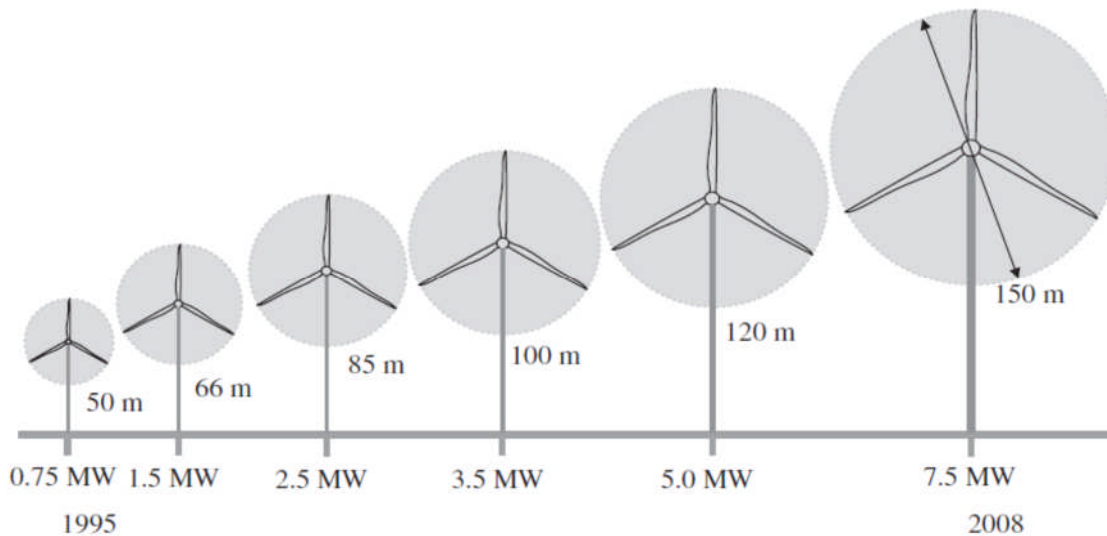


Figure 1-5 : Évolution des turbines éoliennes selon leurs dimensions [12]

La valeur du coefficient de puissance C_p va dépendre de la vitesse de rotation de la turbine (qui peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ) et de l'angle d'inclinaison des pâles β .

Avec :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (\text{I.6})$$

Où $R \cdot \Omega$ est la vitesse linéaire périphérique en bout de pâles de l'hélice. [12],[2],[1]

I.5.2. Description d'une pale éolienne

Les pâles de la turbine sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Les éoliennes modernes ont deux ou trois pâles. Leur longueur atteint actuellement entre 30 et 75 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 150 mètres.

La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure 1-6 : [12]

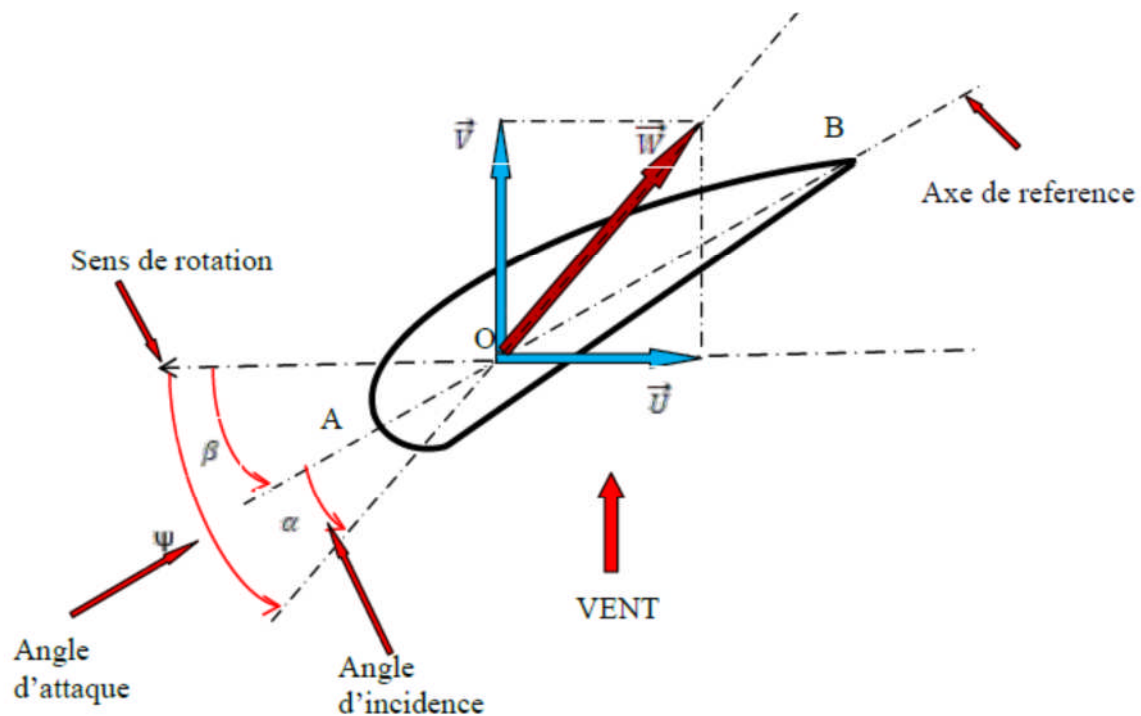


Figure 1-6 : Éléments caractéristiques d'une pale [2]

I.6.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits.

Dans ce qui suit nous allons étudier la génératrice utilisée dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

Chapitre II

II.1. Introduction

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique. Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionner autonome. Il existe deux types de machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné.

Ce chapitre est donc consacré à la modélisation analytique de la génératrice asynchrone auto excitée à rotor bobiné. Notre travail consiste alors à écrire toutes les équations mathématiques qui puissent reproduire fidèlement le comportement de cette machine en régime permanent et transitoire dans un repère diphasé et en prenant en considération l'hypothèse de la non linéarité des matériaux ferromagnétiques, et ce modèle sera établi en utilisant la transformation de Park en régime saturé. Après l'introduction du modèle général de la machine, nous présenterons son adaptation pour l'étude du fonctionnement générateur à vide et en charge (charges équilibrées et déséquilibrées). [15], [6]

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

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse de champ tournant) exprimé par l'équation suivante :

$$\Omega_s = \frac{60 * f}{p} \quad (\text{II.1})$$

La génératrice asynchrone n'engendre pas sa propre énergie d'excitation contrairement à l'alternateur. Pour cette raison il faudra lui apporter cette énergie et stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence. Dans un entraînement à vitesse fixe la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Le couple mécanique entrainant tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Par ailleurs il lui fournit l'énergie réactive dont elle a besoin pour tous ces régimes de fonctionnement. Cette énergie est nécessaire à la création de son flux magnétique, pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique est légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme, ce qui

nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la vitesse de la génératrice à celle du rotor de l'éolienne.[1], [15]

II.3.Modélisation de la machine asynchrone

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

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

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

Cela implique qu'il existe une valeur minimale de capacité à connecter au stator pour obtenir un 'enclenchement' de la génératrice.

L'étude du fonctionnement de la machine asynchrone, en moteur comme en générateur, nécessite de disposer d'un modèle mathématique. Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter une modélisation analytique, d'abord en négligeant l'effet de la saturation des matériaux puis, dans un deuxième temps, en introduisant cet effet dans le modèle. [15], [1],[13]

II.3.1.Modèle linéaire

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices.

- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, L'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.

- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.é.m. est distribuée sinusoidalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes, les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoidales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré. [13]

L'équation générale de la machine asynchrone dans un repère triphasé s'écrit sous la forme suivante :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d[\varphi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II.2})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d[\varphi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

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

Respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques

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

Respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques

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

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques

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

Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques

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

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r].[i_{rabc}] + \frac{d[\varphi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.4})$$

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

$$[T_{em}] = \frac{1}{2} [i_{sabc}, i_{rabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [\varphi_{sabc}, \varphi_{rabc}] \right) \quad (\text{II.5})$$

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

$$[\varphi_{sabc}] = [L_s].[i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)].[i_{rabc}] \quad (\text{II.6})$$

$$[\varphi_{rabc}] = [L_r].[i_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)].[i_{sabc}] \quad (\text{II.7})$$

Où seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont fonction de la position rotorique θ , l'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$[T_{em}] = [i_{sabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \right) \cdot [i_{rabc}] \quad (\text{II.8})$$

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

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

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

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

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

$$\theta = P \cdot \Theta = \theta_s - \theta_r \quad (\text{II.9})$$

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

P : nombre de paires de pôles ;

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

Les différents axes sont illustrés sur la figure II-1

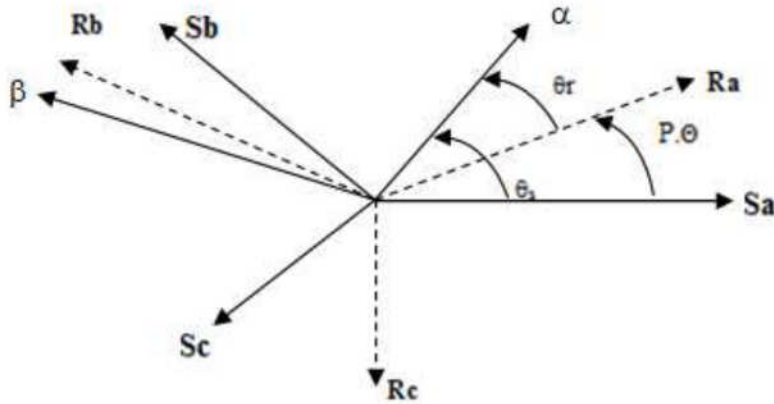


Figure II-1: Les différents systèmes d'axes utilisés.

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

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \varphi_{sq} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \quad (\text{II.10})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \varphi_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \quad (\text{II.11})$$

$$V_{so} = R_s \cdot i_{so} + \frac{d\varphi_{so}}{dt} \quad (\text{II.12})$$

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

$$V_{rd} = 0 = R_r \cdot i_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \quad (\text{II.13})$$

$$V_{rq} = 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \quad (\text{II.14})$$

$$V_{ro} = R_r \cdot i_{ro} + \frac{d\varphi_{ro}}{dt} \quad (\text{II.15})$$

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (II.12) et (II.15) qui correspondent aux composantes homopolaires, sont nulles.

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

L_s : Inductance cyclique statorique.

L_r : Inductance cyclique rotorique.

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

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère « dq » par rapport aux repères triphasés.

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

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s : \text{Pulsation des grandeurs statoriques.}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r : \text{Pulsation des grandeurs rotorique.}$$

Par la suite, l'expression (II.9) peut se transformer, en régime permanent sous la forme suivante :

$$\omega_s - \omega_r = P \cdot \Omega = \omega \quad (\text{II.17})$$

Avec :

Ω : la vitesse mécanique.

ω : la vitesse électrique du rotor.

Ainsi, en partant des équations (II.10),(II.11), (II.13),(II.14), et en utilisant la relation (II.16) Qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère dq :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot L_m \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot L_m & 0 \\ 0 & \omega_r \cdot L_m & L_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot L_m & 0 & \omega_r \cdot L_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

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

$$T_{em} = P \cdot L_m \cdot (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.19})$$

II.3.2. Modèle saturé

Dans la plupart des cas le modèle linéaire de la machine asynchrone est suffisant pour obtenir des bons résultats dans l'analyse des régimes transitoires (démarrage...). Ce modèle considère que l'inductance magnétisante est constante, ce qui n'est pas tout à fait vrai, car le matériau magnétique utilisé pour la fabrication n'est pas parfaitement linéaire. Cependant dans certaines utilisations de la machine asynchrone (alimentation avec onduleur, génératrice auto-excitée, éoliennes), il est très indispensable de tenir compte de l'effet de la saturation du circuit magnétique et donc de la variation de l'inductance magnétisante.

Équations électriques conventions récepteur :

$$V_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} + R_s \cdot i_{ds} \quad (\text{II.20})$$

$$V_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (\text{II.21})$$

$$0 = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} + R_r \cdot i_{dr} \quad (\text{II.22})$$

$$0 = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} + R_r \cdot i_{qr} \quad (\text{II.23})$$

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 :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$$P(\theta)^{-1} = P(\theta)^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

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 $\sqrt{\frac{2}{3}}$ 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.

Équations des flux :

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

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \quad (\text{II.26})$$

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \quad (\text{II.27})$$

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (\text{II.28})$$

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (\text{II.29})$$

Sachant que les inductances cycliques statoriques et rotoriques s'expriment en fonction de l'inductance magnétisante et des inductances de fuites comme suit :

$$L_s = L_m + l_{s\sigma} ; L_r = L_m + l_{r\sigma}$$

Tenir compte de la saturation revient à considérer les inductances comme étant variables en fonction des courants.

Les dérivées des flux passent toutes par le calcul suivant : $\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt}$

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

On considère que les inductances de fuites ne seaturent pas, c'est-à-dire que le trajet des fuites est composé majoritairement par de l'air.

Finalement la prise en compte de la saturation passe obligatoirement par le calcul du terme $\frac{dL_m}{di_m}$. Ce qui nous oblige à connaître comment varie l'inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant. Ceci ne peut se faire qu'expérimentalement en relevant la caractéristique de magnétisation $L_m(i_m)$ et en l'approximant par la fonction adéquate. Cette opération est montrée en annexe a. En connaissant la fonction $L_m(i_m)$ on déduit par dérivation $\frac{dL_m}{di_m}$.

Il reste à calculer le terme $\frac{di_m}{dt}$. Le courant magnétisant s'exprime par la relation :

$$i_m = \sqrt{(i_{dm}^2 + i_{qm}^2)} \quad (\text{II.30})$$

Sachant que : $i_{dm} = i_{ds} + i_{dr}$; $i_{qm} = i_{qs} + i_{qr}$

On trouve la dérivée du courant magnétisant par rapport au temps comme suit :

$$\frac{di_m}{dt} = \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qr}}{dt} \right)$$

La dérivée de l'inductance magnétisante par rapport au temps devient :

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qr}}{dt} \right) \quad (\text{II.31})$$

En remplaçant l'expression de $\frac{dL_m}{dt}$ dans la dérivée des flux, on trouve :

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_{ds}}{dt} = & L_s \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qr}}{dt} \right) i_{ds} + \\ & L_m \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qr}}{dt} \right) i_{dr} \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_{ds}}{dt} = & \left(L_s + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m} \right) \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm} \cdot i_{qm}}{i_m} \right) \frac{di_{qs}}{dt} + \left(L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m} \right) \frac{di_{dr}}{dt} + \\ & \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm} \cdot i_{qm}}{i_m} \right) \frac{di_{qr}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.33})$$

On pose :

$$L_{md} = L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m} \text{ Inductance magnétisante dynamique d'axe d}$$

$$L_{mq} = L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{qm}^2}{i_m} \text{ Inductance magnétisante dynamique d'axe q}$$

$$L_{dq} = \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm} \cdot i_{qm}}{i_m} \text{ Inductance magnétisante dynamique croisée}$$

Cette inductance s'appelle en anglais « cross coupling transient inductance », elle symbolise l'effet croisé de la saturation, c'est-à-dire l'effet de l'axe d sur l'axe q et vice versa.

On pose également :

$$L_{m ds} = l_{s\sigma} + L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m} \qquad L_{m dr} = l_{r\sigma} + L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m}$$

$$L_{m qs} = l_{s\sigma} + L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{qm}^2}{i_m} \qquad L_{m qr} = l_{r\sigma} + L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{qm}^2}{i_m}$$

Le même développement se fait pour les dérivées des autres flux et on obtient :

$$\frac{d\phi_{ds}}{dt} = L_{m ds} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{md} \frac{di_{dr}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qr}}{dt} \quad (\text{II.34})$$

$$\frac{d\phi_{qs}}{dt} = L_{dq} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{m qs} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dr}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{qr}}{dt} \quad (\text{II.35})$$

$$\frac{d\phi_{dr}}{dt} = L_{md} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{m dr} \frac{di_{dr}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qr}}{dt} \quad (\text{II.36})$$

$$\frac{d\phi_{qr}}{dt} = L_{dq} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dr}}{dt} + L_{m qr} \frac{di_{qr}}{dt} \quad (\text{II.37})$$

Ce qui donne finalement la représentation d'état suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{mds} & L_{dq} & L_{md} & L_{dq} \\ L_{dq} & L_{mqs} & L_{dq} & L_{mq} \\ L_{md} & L_{dq} & L_{mdr} & L_{dq} \\ L_{dq} & L_{mq} & L_{dq} & L_{mqr} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & -L_s \frac{d\theta_s}{dt} & 0 & -L_m \frac{d\theta_s}{dt} \\ L_s \frac{d\theta_s}{dt} & R_s & L_m \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \\ 0 & -L_r \frac{d\theta_r}{dt} & R_r & -L_m \frac{d\theta_r}{dt} \\ L_r \frac{d\theta_r}{dt} & 0 & L_m \frac{d\theta_r}{dt} & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

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.

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.

En pratique, trois référentiels peuvent être utilisés :

- Référentiel lié au stator : $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$ et $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$
- Référentiel lié au rotor : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r$ et $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$
- Référentiel lié au champ tournant : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega$ et $\frac{d\theta_r}{dt} = g \cdot \omega$

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.

Si l'on désire exprimer les flux en fonction des courants statoriques et magnétisants, soit le vecteur $(i_{ds}, i_{qs}, i_{dm}, i_{qm})$, il faut éliminer les courants rotoriques du système II.34 à II.37 en

les exprimant par les deux relations $i_{dr} = i_{dm} - i_{ds}$; $i_{qr} = i_{qm} - i_{qs}$

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot (i_{dm} - i_{ds}) = (L_s - L_m) \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} = l_{s\sigma} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} \quad (\text{II.39})$$

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot (i_{qm} - i_{qs}) = (L_s - L_m) \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} = l_{s\sigma} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} \quad (\text{II.40})$$

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot (i_{dm} - i_{ds}) + L_m \cdot i_{ds} = (L_m - L_r) \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dm} = -l_{r\sigma} \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dm} \quad (\text{II.41})$$

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot (i_{qm} - i_{qs}) + L_m \cdot i_{qs} = (L_m - L_r) \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qm} = -l_{r\sigma} \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qm} \quad (\text{II.42})$$

On obtient donc les équations magnétiques suivantes :

$$\varphi_{ds} = l_{s\sigma} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} \quad (\text{II.43})$$

$$\varphi_{qs} = l_{s\sigma} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} \quad (\text{II.44})$$

$$\varphi_{dr} = -l_{r\sigma} \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dm} \quad (\text{II.45})$$

$$\varphi_{qr} = -l_{r\sigma} \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qm} \quad (\text{II.46})$$

Les dérivées des flux s'expriment par :

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = l_{s\sigma} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{dm} \quad (\text{II.47})$$

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = l_{s\sigma} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{qm} \quad (\text{II.48})$$

$$\frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -l_{r\sigma} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{dm} \quad (\text{II.49})$$

$$\frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -l_{r\sigma} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{qm} \quad (\text{II.50})$$

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = l_{s\sigma} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \quad (\text{II.51})$$

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = l_{s\sigma} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mq} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \quad (\text{II.52})$$

$$\frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -l_{r\sigma} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_{mdr} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \quad (\text{II.53})$$

$$\frac{d\phi_{qr}}{dt} = -l_{r\sigma} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mqr} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \quad (\text{II.54})$$

$$v_{ds} = l_{s\sigma} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} + R_s \cdot i_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} \cdot i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{qm} \quad (\text{II.54})$$

$$v_{qs} = l_{s\sigma} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mq} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} + R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} \cdot i_{ds} + \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{dm} \quad (\text{II.56})$$

$$0 = -l_{r\sigma} \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_{mqr} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} - R_r \cdot i_{ds} + \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} \cdot i_{qs} - \frac{d\theta_r}{dt} L_r \cdot i_{qm} + R_r \cdot i_{qm} \quad (\text{II.57})$$

$$0 = -l_{r\sigma} \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mqr} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} - R_r \cdot i_{qs} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} \cdot i_{ds} + \frac{d\theta_r}{dt} L_r \cdot i_{dm} + R_r \cdot i_{qm} \quad (\text{II.58})$$

On obtient le système final :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{s\sigma} & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_{s\sigma} & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_{r\sigma} & 0 & L_{mdr} & L_{dq} \\ 0 & -l_{r\sigma} & L_{dq} & L_{mqr} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & -\frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} & 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} L_m \\ \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} & R_s & \frac{d\theta_s}{dt} L_m & 0 \\ -R_r & \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} & R_r & -\frac{d\theta_r}{dt} L_r \\ -\frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} & -R_r & \frac{d\theta_r}{dt} L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} \quad (\text{II.59})$$

Calcul de l'inverse de la matrice inductance :

La matrice inductance à inverser est celle donnée par l'équation II.60. Le calcul de la matrice inverse se fait manuellement ou en utilisant le logiciel MathWorks qui permet l'inversion littérale des matrices.

$$\begin{bmatrix} l_{s\sigma} & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_{s\sigma} & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_{r\sigma} & 0 & L_{mdr} & L_{dq} \\ 0 & -l_{r\sigma} & L_{dq} & L_{mqr} \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{II.60})$$

Avec :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Construction du schéma Matlab Simulink :

Cherchons d'abord à exprimer les dérivées des courants :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} - R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} \cdot i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{qm} \\ v_{qs} - R_s \cdot i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} \cdot i_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{dm} \\ R_r \cdot i_{ds} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} \cdot i_{qs} - R_r i_{dm} + \frac{d\theta_r}{dt} L_r \cdot i_{qm} \\ R_r \cdot i_{qs} + \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} \cdot i_{ds} - R_r i_{qm} - \frac{d\theta_r}{dt} L_r \cdot i_{dm} \end{bmatrix} \quad (\text{II.61})$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{D} \left\{ \begin{array}{l} \left(v_{ds} - R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} \cdot i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{qm} \right) \cdot x_{11} + \\ \left(v_{qs} - R_s \cdot i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} \cdot i_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt} L_m \cdot i_{dm} \right) \cdot x_{12} + \\ \left(R_r \cdot i_{ds} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} \cdot i_{qs} - R_r i_{dm} + \frac{d\theta_r}{dt} L_r \cdot i_{qm} \right) \cdot x_{13} \\ \left(R_r \cdot i_{qs} + \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} \cdot i_{ds} - R_r i_{qm} - \frac{d\theta_r}{dt} L_r \cdot i_{dm} \right) \cdot x_{14} \end{array} \right\} \quad (\text{II.62})$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{D} \left\{ \begin{array}{l} x_{11} \cdot v_{ds} + x_{12} \cdot v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{11} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{12} + R_r x_{13} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{14} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{11} - R_s x_{12} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{13} + R_r x_{14} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{12} - R_r x_{13} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{14} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{11} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{13} - R_r x_{14} \right) \cdot i_{qm} \end{array} \right\} \quad (\text{II.63})$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{D} \left\{ \begin{array}{l} x_{21} \cdot v_{ds} + x_{22} \cdot v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{21} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{22} + R_r x_{23} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{24} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{21} - R_s x_{22} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{23} + R_r x_{24} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{22} - R_r x_{23} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{24} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{21} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{23} - R_r x_{24} \right) \cdot i_{qm} \end{array} \right\} \quad (\text{II.64})$$

$$\frac{di_{dm}}{dt} = \frac{1}{D} \left\{ \begin{array}{l} x_{31} \cdot v_{ds} + x_{32} \cdot v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{31} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{32} + R_r x_{33} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{34} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{31} - R_s x_{32} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{33} + R_r x_{34} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{32} - R_r x_{33} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{34} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{31} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{33} - R_r x_{34} \right) \cdot i_{qm} \end{array} \right\} \quad (\text{II.65})$$

$$\frac{di_{qm}}{dt} = \frac{1}{D} \left\{ \begin{array}{l} x_{41} \cdot v_{ds} + x_{42} \cdot v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{41} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{42} + R_r x_{43} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{44} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{41} - R_s x_{42} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{43} + R_r x_{44} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{42} - R_r x_{43} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{44} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{41} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{43} - R_r x_{44} \right) \cdot i_{qm} \end{array} \right\} \quad (\text{II.66})$$

C'est à partir de ces quatre derniers systèmes d'équations auquel nous ajoutons les équations d'auto-amorçage que nous allons construire le schéma Matlab Simulink de la Génératrice Asynchrone Auto-Excitée en tenant compte de l'effet croisé de la saturation.

II.4. Modélisation de l'auto amorçage

II.4.1. Auto amorçage à vide

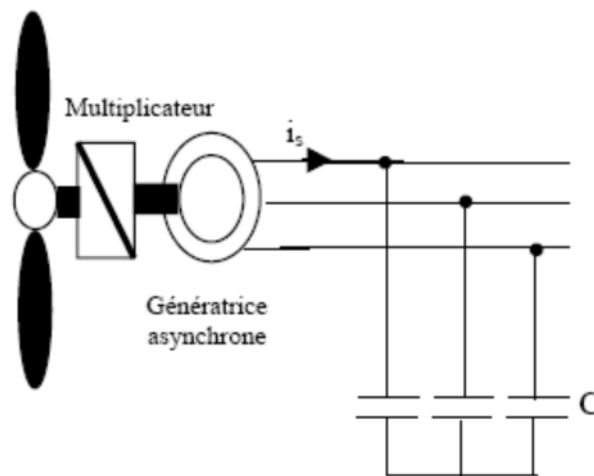


Figure II-2 : schéma de principe d'auto amorçage à vide [4]

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

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

$$V_{abc} = -\frac{1}{C} \int i_{abc} dt \Rightarrow \frac{d}{dt} V_{abc} = -\frac{1}{C} i_{abc}$$

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

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1} \cdot V_{dqo} = P(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix}$$

$$-\frac{1}{C} \cdot (P(\theta)^{-1} \cdot i_{dqo}) = \frac{d}{dt} (P(\theta)^{-1} \cdot V_{dqo})$$

$$-P(\theta)^{-1} \cdot \frac{1}{C} \cdot i_{dqo} = P(\theta)^{-1} \cdot \frac{d}{dt} (P(\theta)^{-1} \cdot V_{dqo})$$

$$\frac{d}{dt} P(\theta)^{-1} = \frac{d}{d\theta} (P(\theta)^{-1}) \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{d\theta} \cdot P(\theta)^{-1} \cdot \omega_r$$

$$\Rightarrow P(\theta)^{-1} \cdot \frac{1}{C} \cdot i_{dqo} = P(\theta)^{-1} \cdot \frac{d}{dt} \cdot V_{dqo} + \frac{d}{d\theta} \cdot P(\theta)^{-1} \cdot \omega_r \cdot V_{dqo}$$

On multiplie à gauche par P(θ) :

$$\Rightarrow -\frac{1}{C} \cdot i_{dqo} = \frac{d}{dt} \cdot V_{dqo} + P(\theta) \cdot \frac{d}{d\theta} \cdot P(\theta)^{-1} \cdot \omega_r \cdot V_{dqo}$$

Sachant que :

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

$$\Rightarrow -\frac{1}{C} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \omega_r \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix}$$

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

$$\Rightarrow -\frac{1}{C} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \cdot \omega_r$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = -\frac{1}{C} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \cdot \omega_r$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = -\frac{1}{C} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \cdot \omega_r$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{d}{dt} V_d = -\frac{1}{C} \cdot i_d + \omega_r \cdot V_q \\ \frac{d}{dt} V_q = -\frac{1}{C} \cdot i_q - \omega_r \cdot V_d \end{cases} \quad (\text{II.67})$$

II.4.2.Fonctionnement en charge

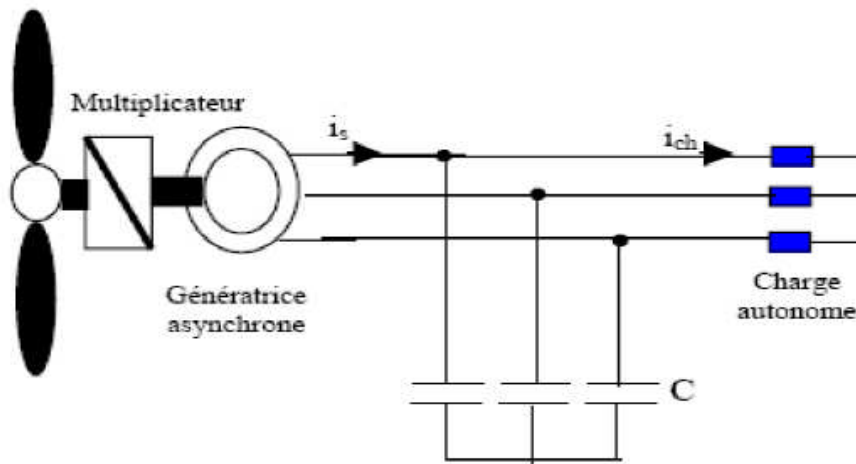


Figure II-3 : Schéma de principe d'auto-amorçage en charge [4]

II.4.2.1.Charge équilibrée

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_{ds} & -i_{chd} \\ -i_{qs} & -i_{chq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & p\Omega \\ -p\Omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}$$

Dans le cas d'une charge résistive, on déduit les courants de charge i_{chd} et i_{chq} par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R \cdot i_{chd} \\ V_{qs} = R \cdot i_{chq} \end{cases} \quad (\text{II.68})$$

Dans le cas d'une charge RL :

$$\begin{cases} V_{ds} = R \cdot i_{chd} + L \cdot \frac{di_{chd}}{dt} \\ V_{qs} = R \cdot i_{chq} + L \cdot \frac{di_{chq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

II.4.2.2. Charge déséquilibrée

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_{sa} & -i_{cha} \\ -i_{sb} & -i_{chb} \\ -i_{sc} & -i_{chc} \end{bmatrix}$$

icha, ichb et ichc étant les courants dans la charge triphasée et C la capacité d'auto-amorçage. On doit ajouter à cette équation celles concernant la charge. Dans nos travaux, nous nous sommes intéressés à deux cas de charges déséquilibrées réparties sur les trois phases comme suit :

Dans le 1^{er} cas on a : Déséquilibre des résistances, les résistances des trois phases ne sont plus identiques, mais chacune a sa propre valeur. Phase a : R_{cha} , Phase b : R_{chb} et Phase c : R_{chc}

$$\begin{cases} V_{sa} = R_{cha} \cdot i_{cha} \\ V_{sb} = R_{chb} \cdot i_{chb} \\ V_{sc} = R_{chc} \cdot i_{chc} \end{cases} \quad (\text{II.70})$$

Dans le deuxième cas on a déséquilibre des résistances et des inductances, chaque résistance et chaque inductance peut avoir sa propre valeur. Phase a : R_{cha}, L_{cha} ; Phase b : R_{chb}, L_{chb} et Phase c : R_{chc}, L_{chc} .

$$\begin{cases} V_{sa} = R_{cha} \cdot i_{cha} + L_{cha} \frac{di_{cha}}{dt} \\ V_{sb} = R_{chb} \cdot i_{chb} + L_{chb} \frac{di_{chb}}{dt} \\ V_{sc} = R_{chc} \cdot i_{chc} + L_{chc} \frac{di_{chc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.71})$$

R_{cha} , R_{chb} et R_{chc} : sont respectivement les résistances de charge dans les trois phases.

L_{cha} , L_{chb} et L_{chc} : sont respectivement les inductances de charge dans les trois phases.

II.5. 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 de notre génératrice, celui-ci fait appel à des matrices inductances constantes. Ce modèle ne reflète pas la réalité, puisque dans le cas du fonctionnement en génératrice de la machine asynchrone, c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement, autrement la tension d'alimentation augmenterait indéfiniment (théoriquement).

Par la suite, Nous avons présenté la procédure de prise en compte de l'effet de la saturation magnétique de la génératrice en régime dynamique, en introduisant dans le modèle linéaire une inductance magnétisante variable en fonction du courant magnétisant, en fin nous avons rajouté les équations d'auto-amorçage à vide et en charge.

Chapitre III

III.1.Introduction

L'objectif de ce chapitre est de réaliser un schéma sur MATLAB-SIMULINK à partir du modèle diphasé de la GAAE, avec la présence des condensateurs d'auto-amorçage et la prise en compte de la saturation (inductance magnétisante variable en fonction du courant magnétisant).

Dans le 1^{er} cas nous effectuerons des simulations du fonctionnement à vide pour montrer l'influence de la capacité des condensateurs d'auto-amorçage sur la dynamique et l'amplitude de la tension statorique, et pour les comparer avec celle de fonctionnement en charge.

En fin dans le 2^{eme} cas une étude du fonctionnement en charge de la GAAE viendra clôturer ce chapitre. Plusieurs tests par simulation seront effectués pour étudier l'influence de la charge sur la génératrice autonome, ces tests en question concernent le fonctionnement sur une charge équilibrée et déséquilibrée d'une nature résistive (R) et résistives-inductives(RL).

III.2.Fonctionnement à vide

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

Nous avons fixé dans un premier temps, la vitesse de rotation du rotor à $N_r=1500$ tr /min, et la valeur de la capacité d'auto amorçage à $C=60\mu F$.

III.2.1.Schéma Simulink de la GAAE à vide

La figure (III.1), montre que le schéma Matlab-Simulink est décomposé en deux blocs :

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

Les deux autres blocs représentent les transformées inverse de Park, leurs rôles est de visualiser les grandeurs réelles de la tension et du courant statorique en abc.

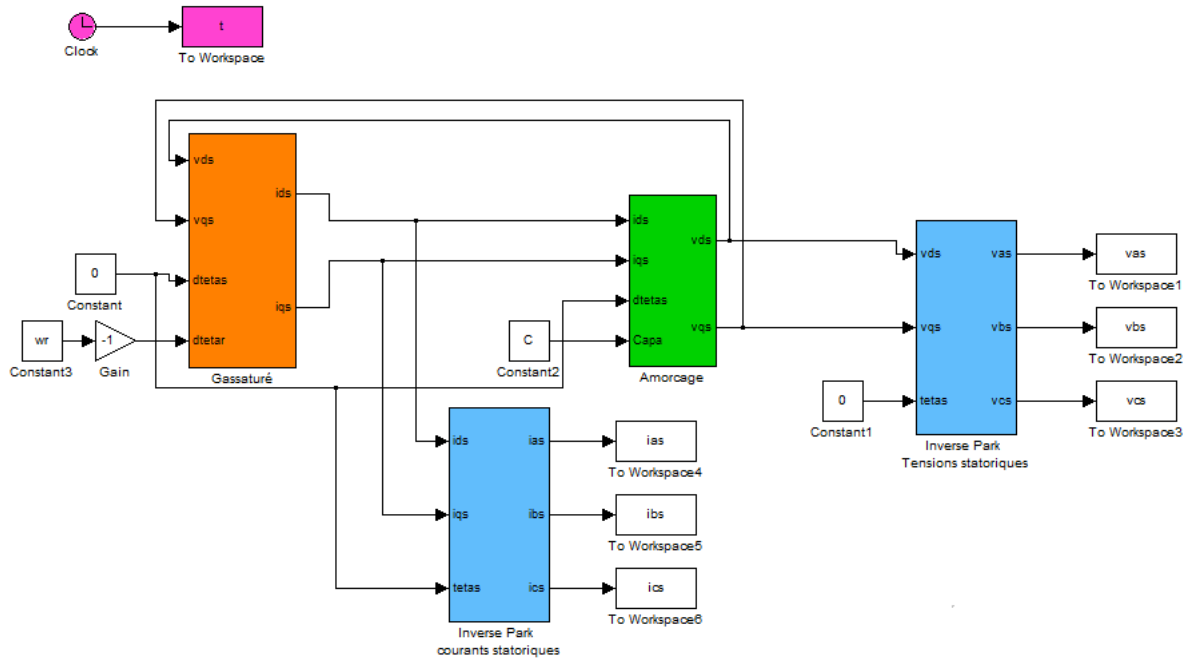


Figure III-1 : Schéma Matlab-Simulink de la GAAE à vide

III.2.2. Résultat de simulation

Les résultats de simulation de l'évolution de la tension et du courant lorsque la génératrice fonctionne à vide sont présentés dans les figures suivantes :

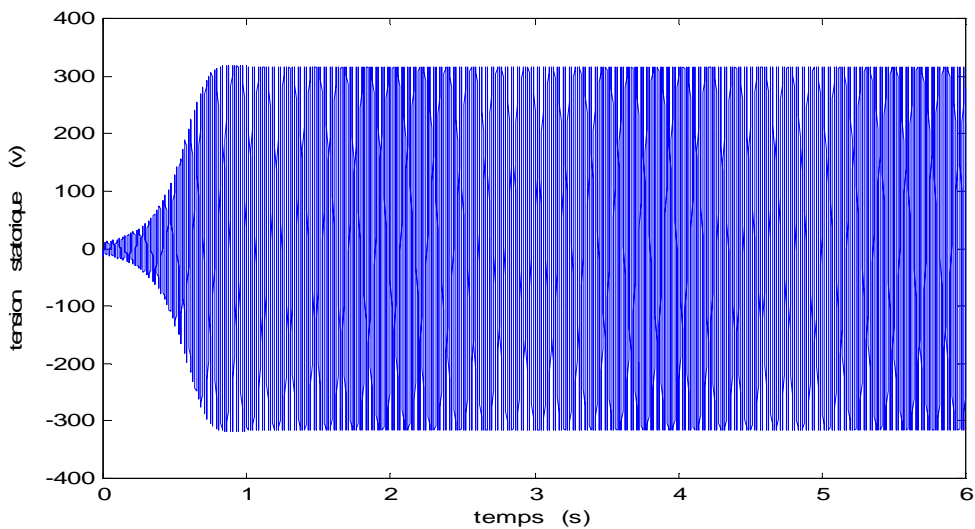


Figure III-2 : Allure de la tension statorique de la phase a

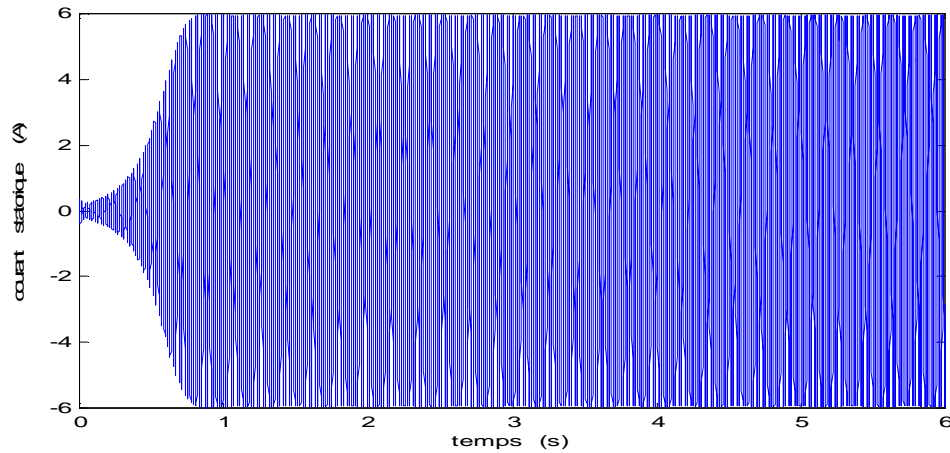


Figure III-3 : Allure du courant statorique de la phase a

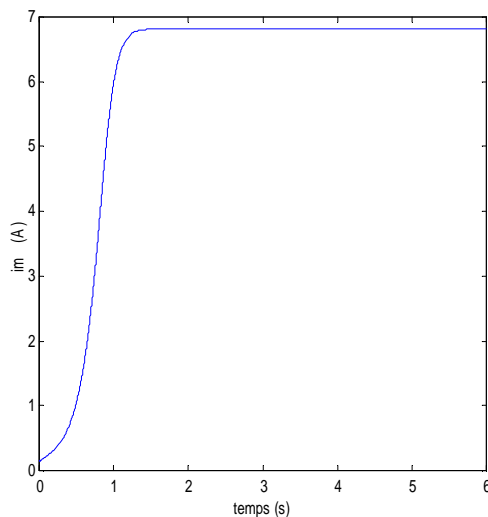


Figure III-4 : Allure du courant magnétisant (I_m) en fonction du temps

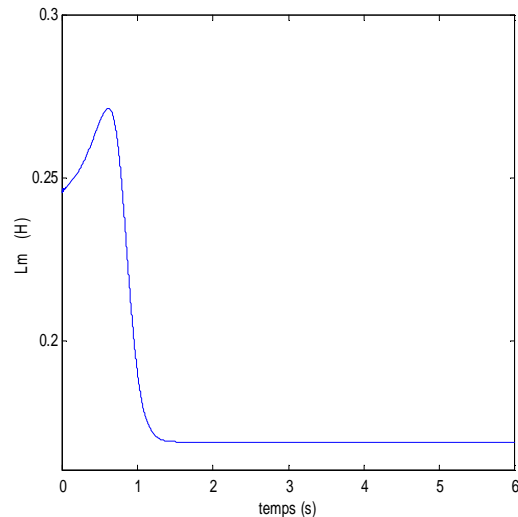


Figure III-5 : Allure de l'inductance de magnétisation (L_m) en fonction du temps

D'après ces résultats, on remarque qu'au début de l'amorçage la tension et le courant statorique croissent d'une façon exponentielle dans la zone de non saturation puis elles convergent vers des valeurs fixes. Ces valeurs dépendent de la vitesse de rotation du rotor et de la capacité des condensateurs et aussi des paramètres de la machine.

L'évolution de la tension statorique suit la courbe du courant de magnétisation, et la valeur maximale du courant statorique est légèrement inférieure à la valeur du courant de magnétisation car le courant rotorique est négligeable à vide.

II.2.3. Influence de la capacité d'auto-amorçage

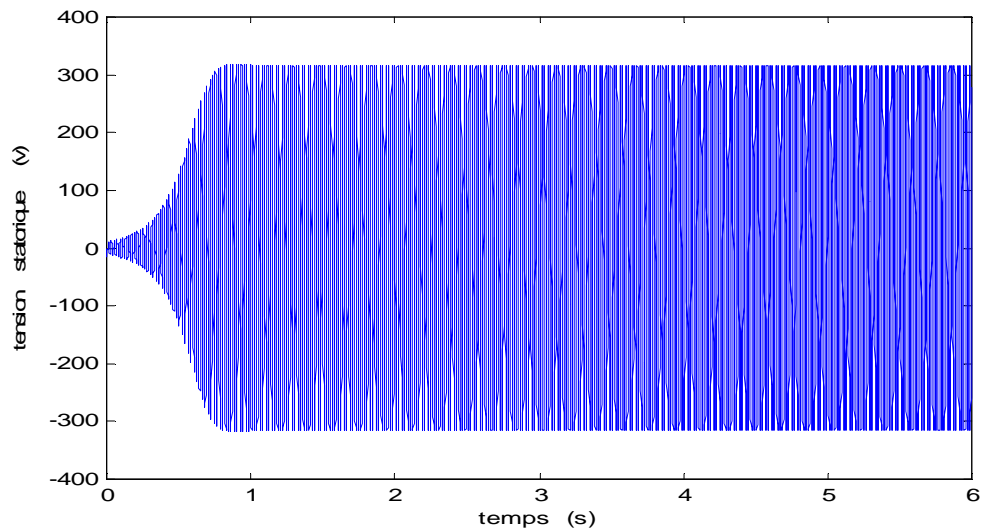


Figure III-6 : Allure de la tension statorique de la phase a pour $C = 60 \mu\text{F}$

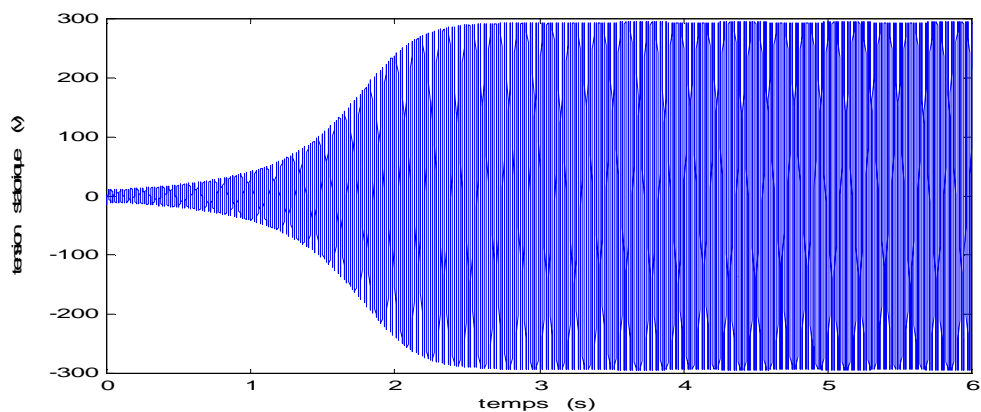


Figure III-7 : Allure de la tension statorique de la phase a pour $C = 45 \mu\text{F}$

D'après les résultats qu'on a obtenus, on constate que la valeur de la capacité d'auto-amorçage influe sur l'amplitude de la tension et le régime transitoire (délais d'amorçage). Donc il existe une valeur minimale de la capacité au-dessus de laquelle l'amorçage ne peut pas avoir lieu, et une valeur maximale au-delà de laquelle la tension statorique n'augmente plus à cause de la saturation.

III.3.Fonctionnement en charge

Dans ce cas de fonctionnement, nous nous intéressons aux caractéristiques de la génératrice connectée à une charge, pour représenter le schéma sur MATLAB SIMULINK il suffit de reprendre le même schéma dans le cas de fonctionnement à vide et de rajouter la charge.

Pour étudier l'influence de la charge, notre génératrice doit fonctionner à vide au début de la simulation jusqu'à atteindre le régime permanent, puis en introduit la charge. Dans le 1^{er} cas une charge équilibrée et dans le 2^{eme} cas une charge déséquilibré.

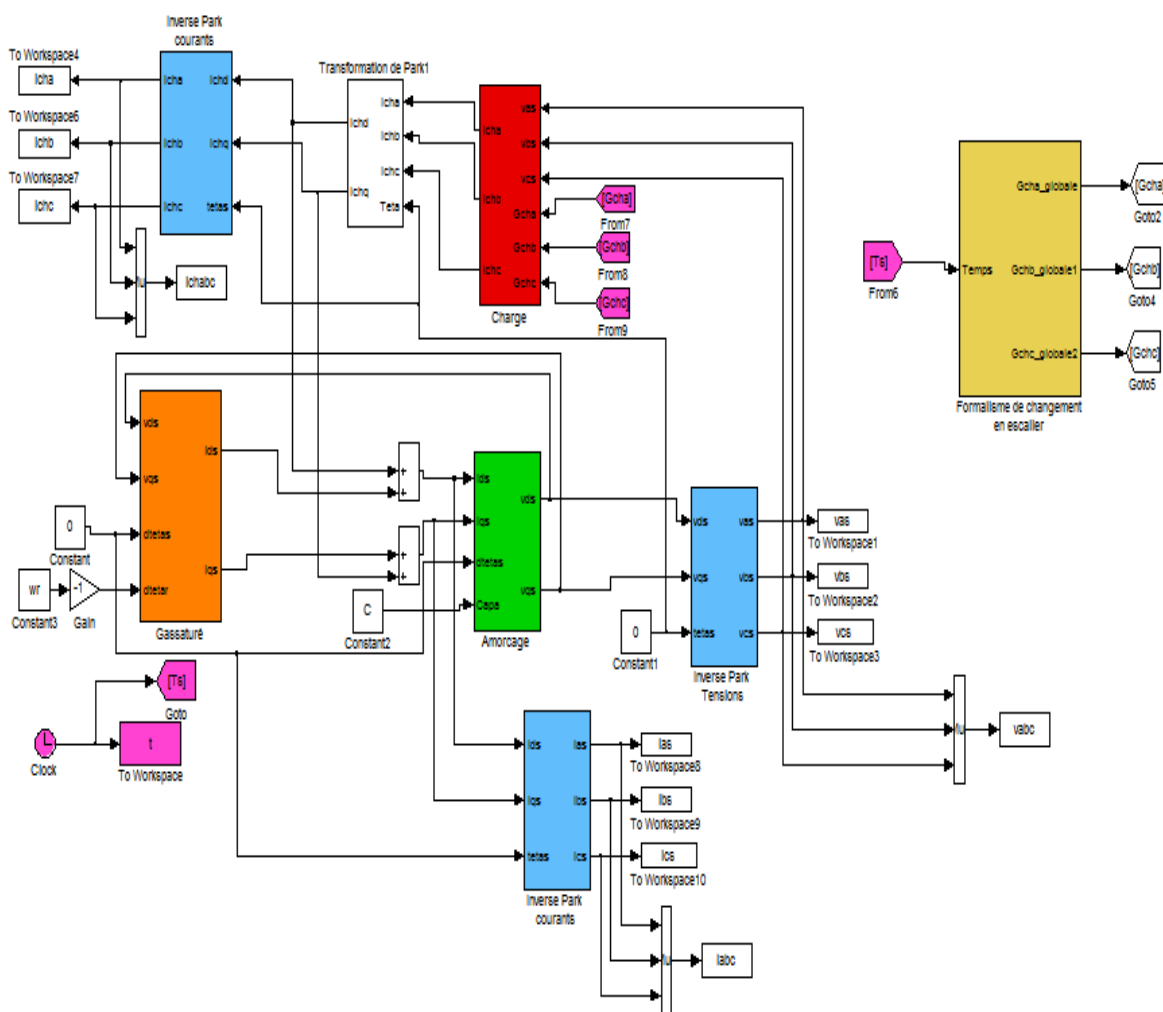


Figure III-8 : Schéma bloc de simulation de la GAAE en charge résistive (équilibrée et déséquilibrée)

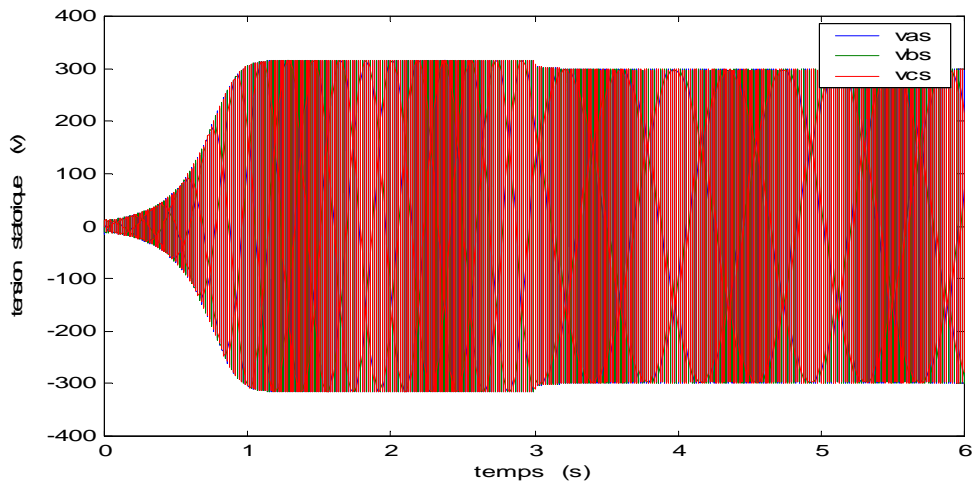


Figure III-10: Évolution des tensions statoriques

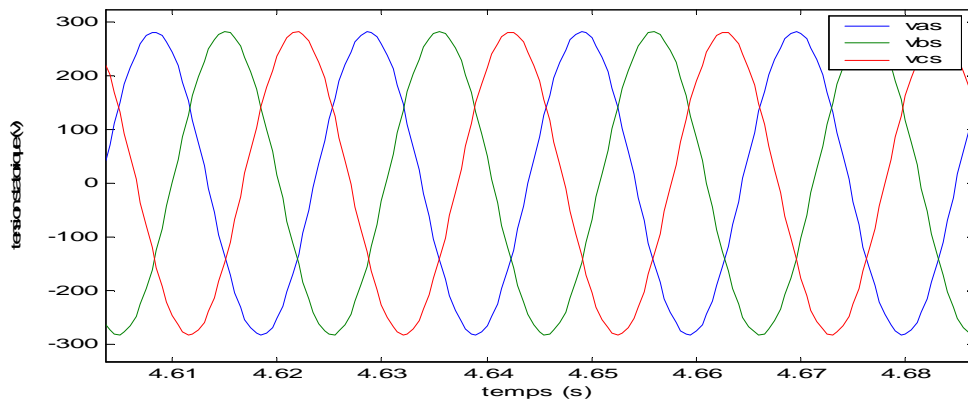


Figure III-11: Zoom sur les tensions statoriques

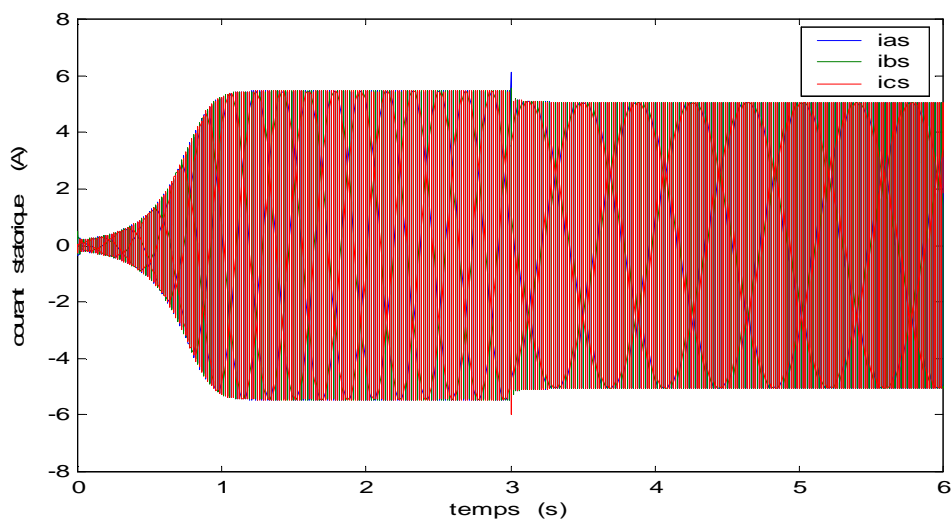


Figure III-12: Évolution des courants statoriques

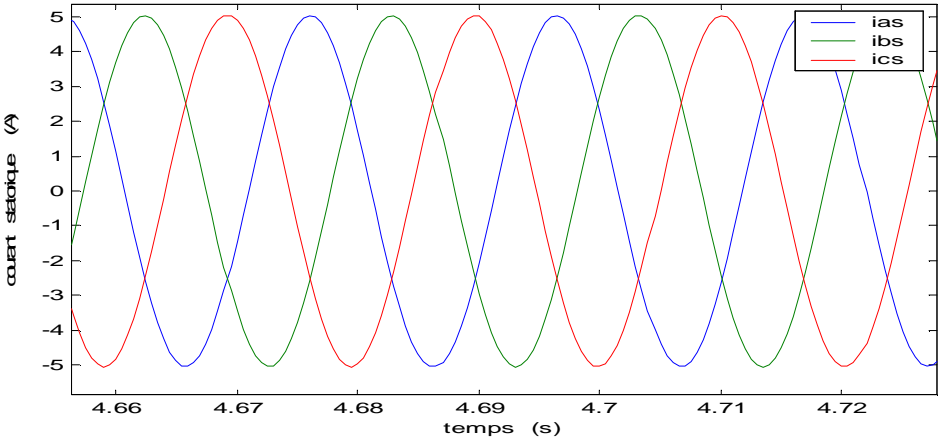


Figure III-13: Zoom sur les courants statoriques

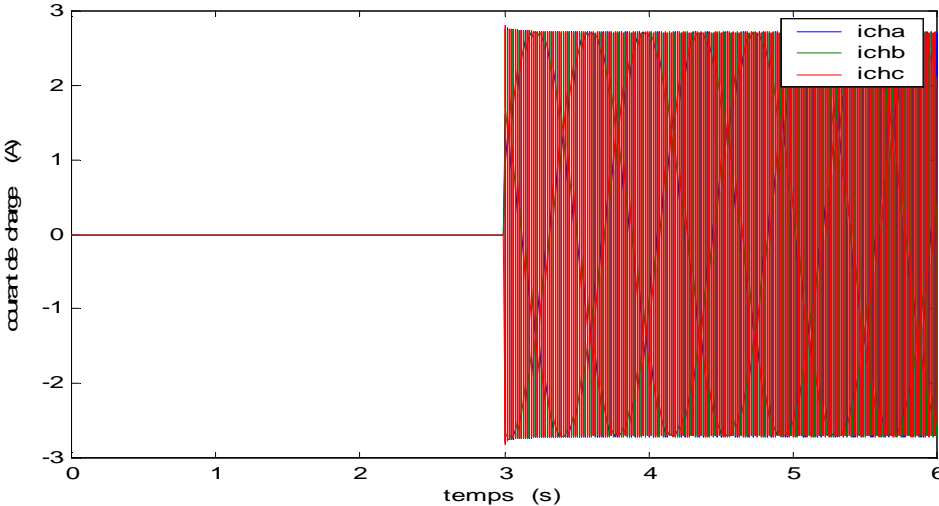


Figure III-14: Évolution des courants de charges

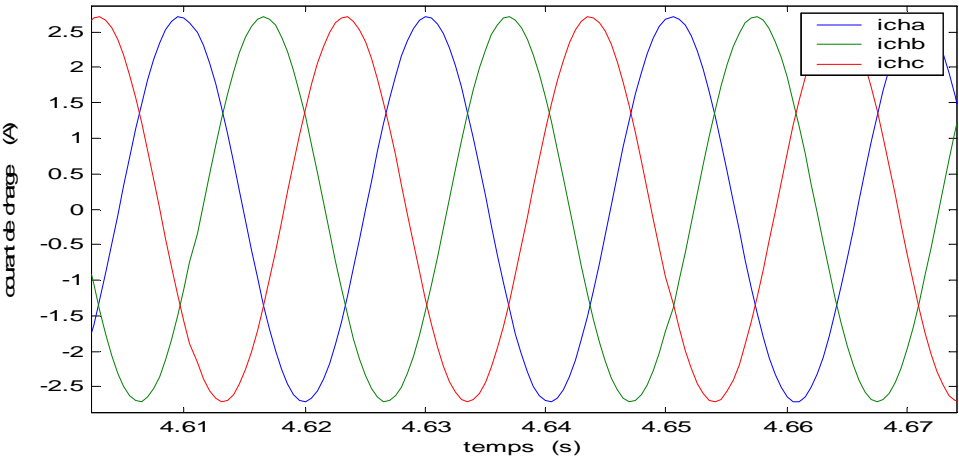


Figure III-15: Zoom sur les courants de charges

A l'instant ($t=3s$) on branche une charge résistive équilibrée aux bornes de la GAAE. La tension statorique diminue en fonction de la charge insérée à l'instant d'introduction de la charge et le courant statorique lui aussi diminue de la même manière que la tension statorique, le courant de charge initialement nul, puis il évolue d'une manière sinusoïdale dès l'application de la charge à ($t=3s$). Donc pendant le fonctionnement à vide, tous le courant statorique passe par le condensateur ce qui assure une magnétisation (puissance réactive) suffisante au maintien de la tension statorique, mais à l'introduction de la charge, le courant de charge s'impose, ce qui fait que le courant statorique se divise dans la branche capacitive et la charge.

Contrairement au fonctionnement à vide, en charge on ne peut pas négliger le glissement qui s'exprime par cette équation :

$$g = - \frac{R_r}{R_s + R_{ch}} \quad [1] \quad (III.1)$$

III.3.1.b.Charge resistive-inductive (RL)

Pour ce cas de fonctionnement nous avons entraîné notre machine dans les mêmes conditions que précédemment, la vitesse est de 1500 tr/min avec un banc de capacités de valeur $55\mu F$, puis elle est connectée à une charge résistive-inductive (RL) équilibré avec $R = 110 \Omega$ et $L = 0.35 H$. Nous donnons les allures de l'évolution des tensions, des courants statoriques et des courants de charges dans les figures suivantes :

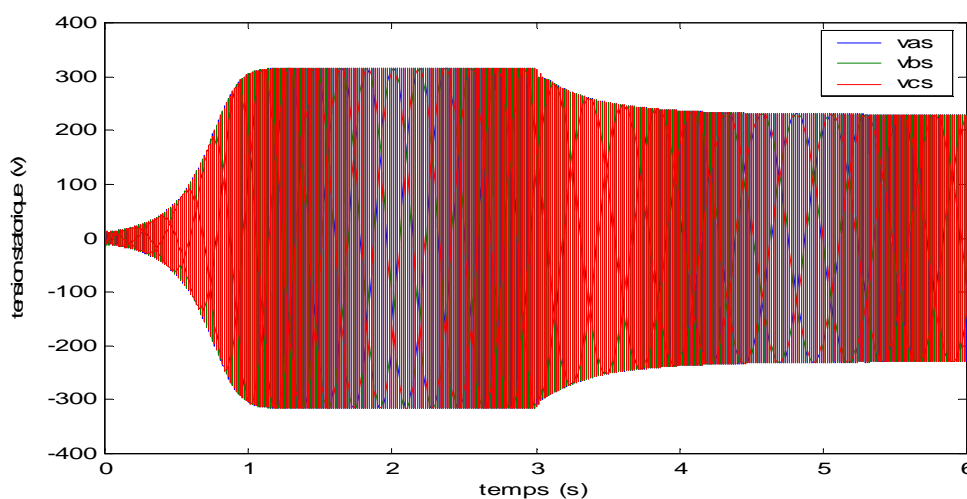


Figure III-16: Évolution des tensions statoriques

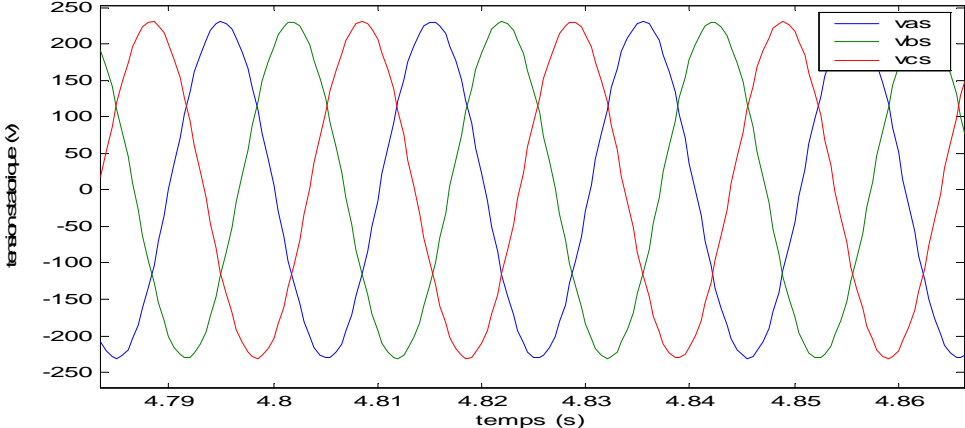


Figure III-17: Zoom sur les tensions statoriques

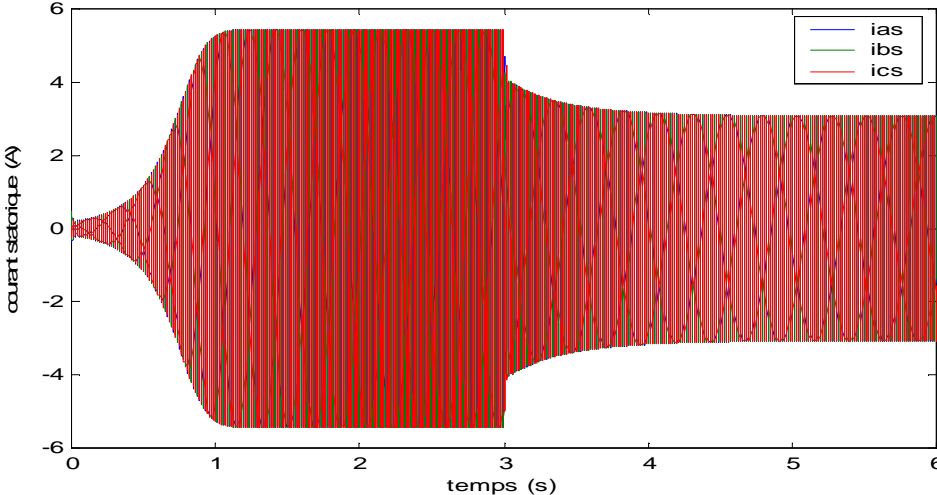


Figure III-18: Évolution des courants statoriques

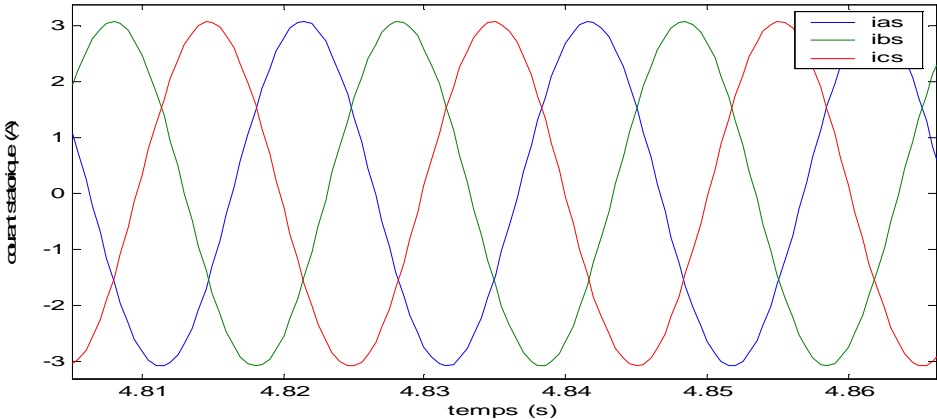


Figure III-19: Zoom sur les courants statoriques

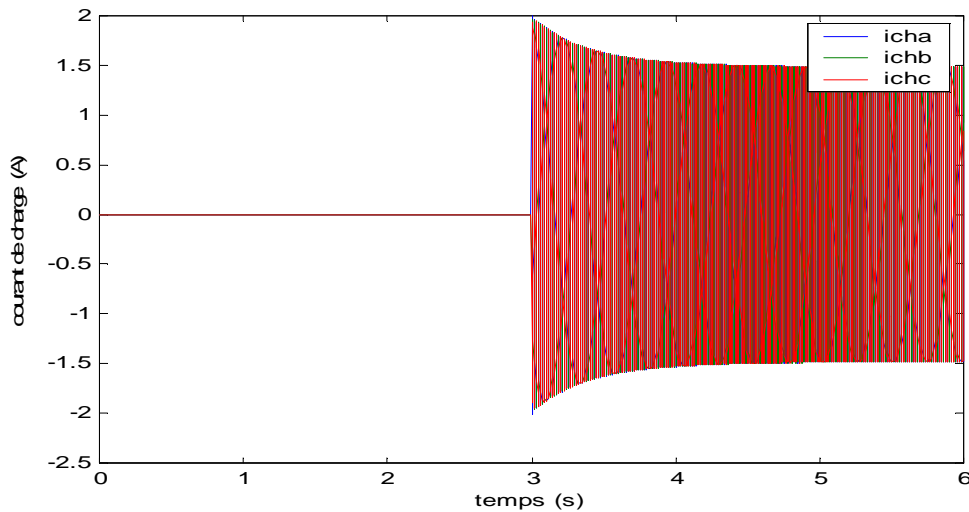


Figure III-20: Évolution des courants de charges

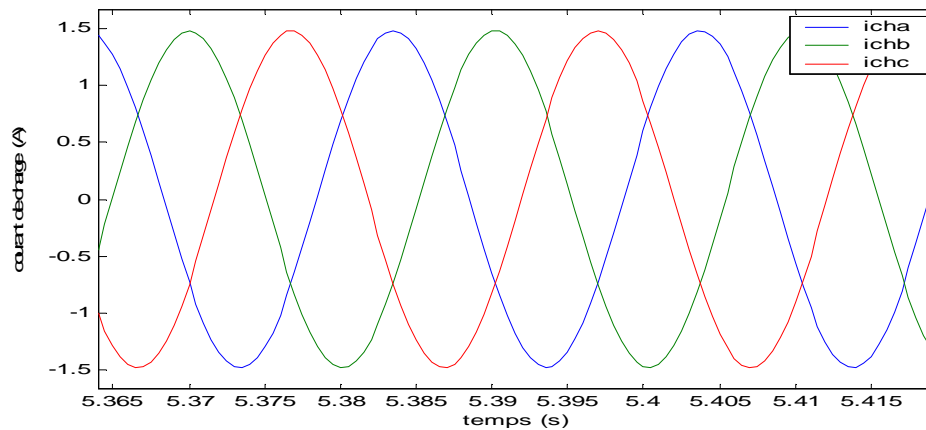


Figure III-21: Zoom sur les courants de charges

Nous constatons les mêmes résultats que nous avons obtenus dans le cas de la charge R, mais nous remarquons que la chute de la tension statorique est aggravée par la présence de l'inductance, puisque l'impédance est maintenant plus grande. Il en est de même concernant le courant statorique puisque sa chute provient de la baisse de la tension statorique.

D'une autre manière, on peut dire que l'introduction d'une charge résistive-inductive entraîne une consommation de l'énergie réactive. Cette dernière est alors fournie par la capacité d'amorçage et donc automatiquement déduite de l'énergie de magnétisation de la machine, d'où une diminution accrue de la tension et de courant statorique.

III.3.2. Charge déséquilibrée

Pour tenir compte du déséquilibre nous avons adopté un schéma Matlab-Simulink, où les équations de la charge sont exprimées dans le système d'axes abc. En effet, dans ce système d'axes, le déséquilibre est automatiquement pris en compte, il suffit de différencier entre les valeurs numériques des résistances et des inductances.

Des tests par simulation seront effectués, en considérant deux charges, La première est constituée d'une charge purement résistive (R) et la seconde comporte la charge résistive-inductive (RL).

III.3.2.a. Charge résistive déséquilibrée (R)

Dans ce cas de fonctionnement nous avons entraîné notre machine à une vitesse de 1500 tr/min avec un banc de capacités de valeur 55 μF , puis elle est connectée à une charge résistive (R) déséquilibrée comme suit : $R_{cha} = 220 \Omega$, $R_{chb} = 110 \Omega$, $R_{chc} = 55 \Omega$. Nous donnons les allures de l'évolution des tensions, des courants statoriques et des courants de charges dans les figures suivantes :

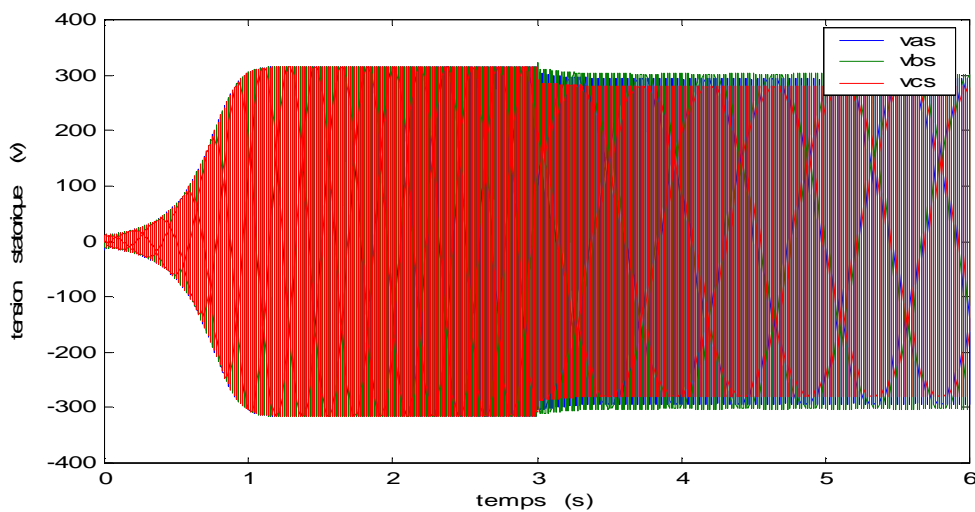


Figure III-22: Évolution des tensions statoriques

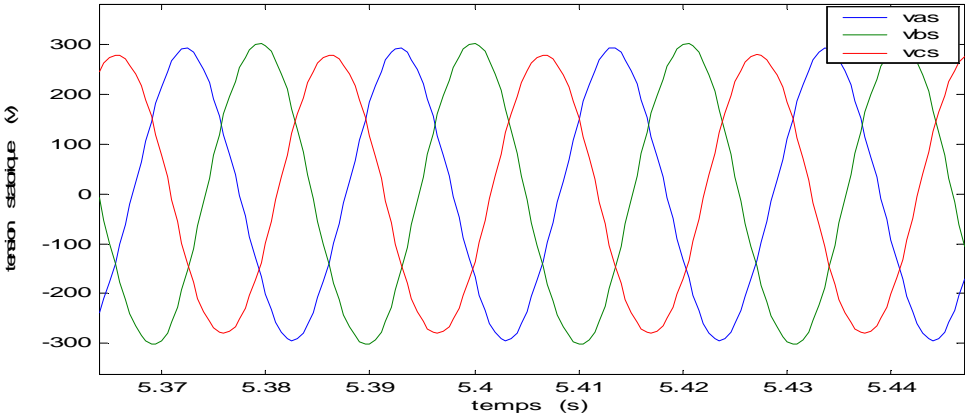


Figure III-23: Zoom sur les tensions statoriques

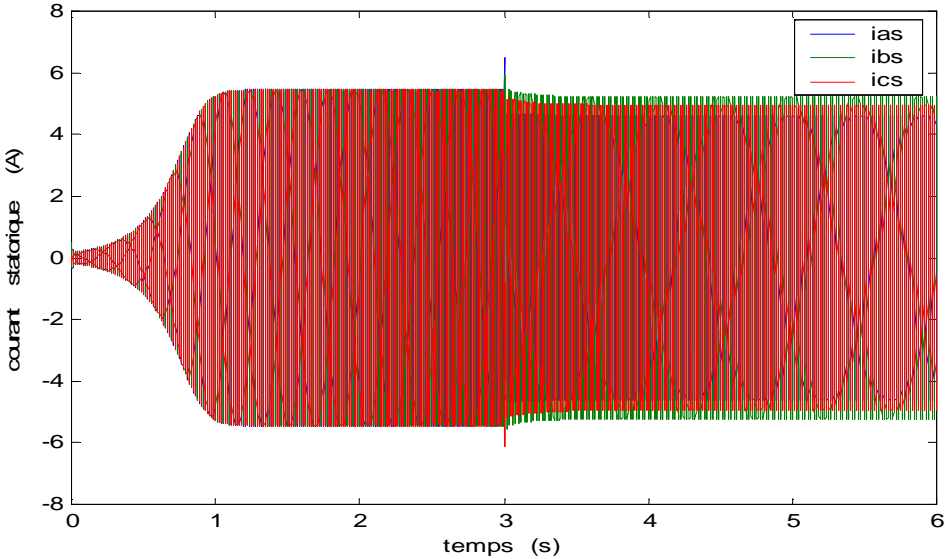


Figure III-24: Évolution des courants statoriques

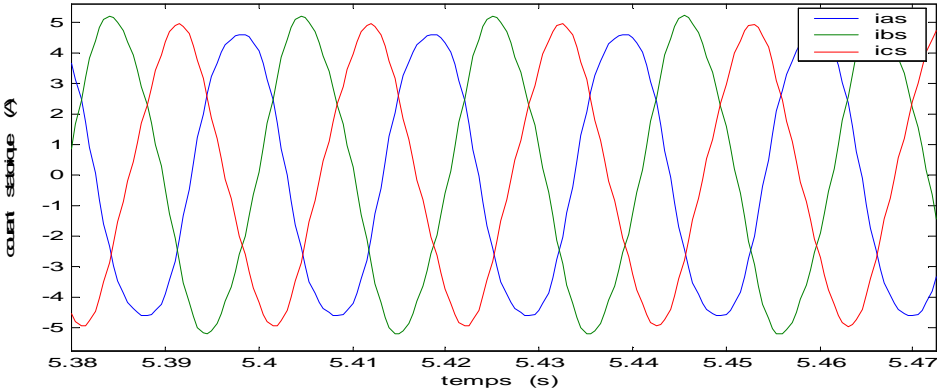


Figure III-25: Zoom sur les courants statoriques

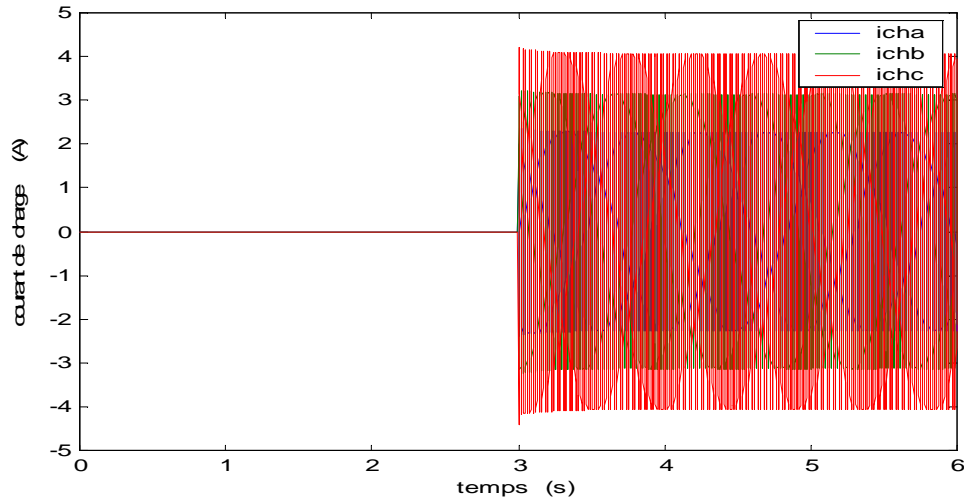


Figure III-26: Évolution des courants de charges

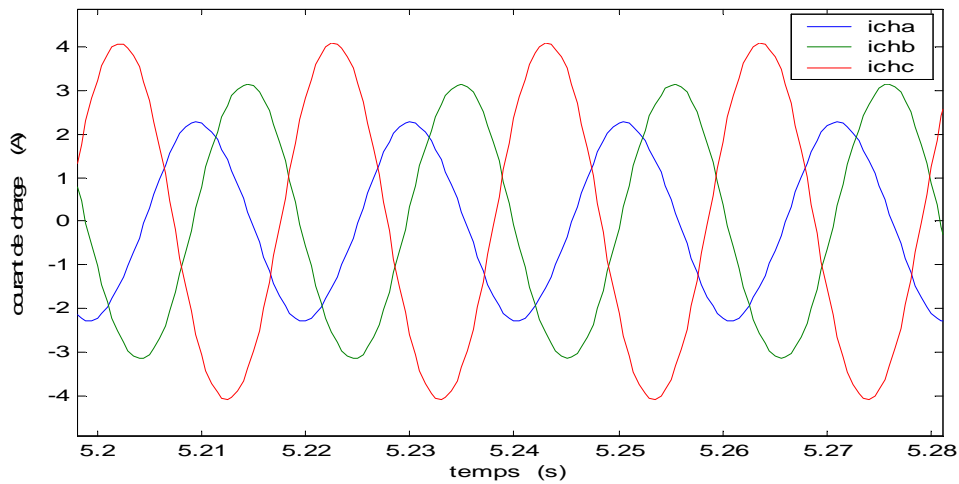


Figure III-27: Zoom sur les courants de charges

III.3.2.b. Charge résistive-inductive déséquilibrée (RL)

La seconde charge triphasée déséquilibrée que nous étudions est constituée de trois charges résistives-inductives différentes :

- Phase a : une résistance $R_{cha} = 220 \Omega$ et une inductance $L_{cha} = 0.7 \text{ H}$
- Phase b : une résistance $R_{chb} = 110 \Omega$ et une inductance $L_{chb} = 0.35 \text{ H}$
- Phase c : une résistance $R_{chc} = 73 \Omega$ et une inductance $L_{chc} = 0.23 \text{ H}$

Les résultats sont montrés dans les figures suivantes :

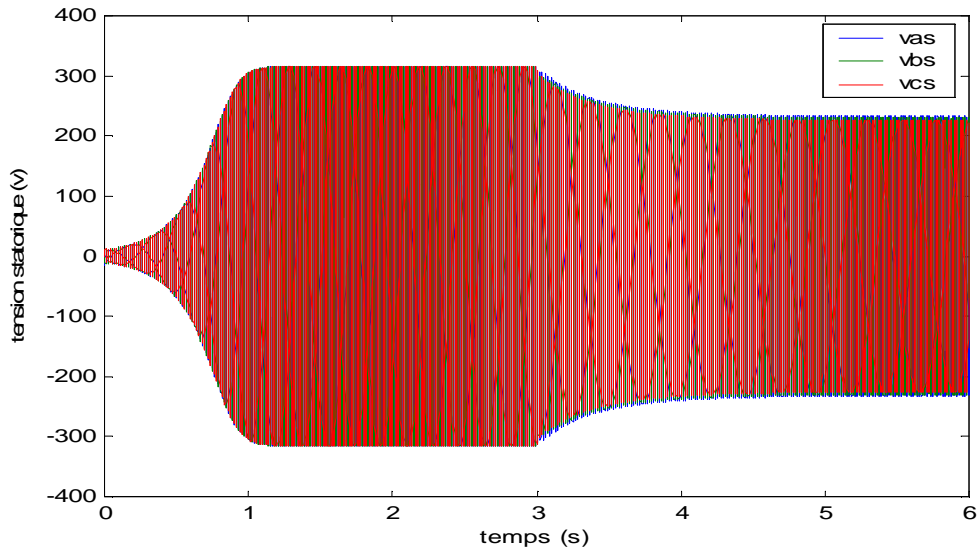


Figure III-28: Évolution des tensions statoriques

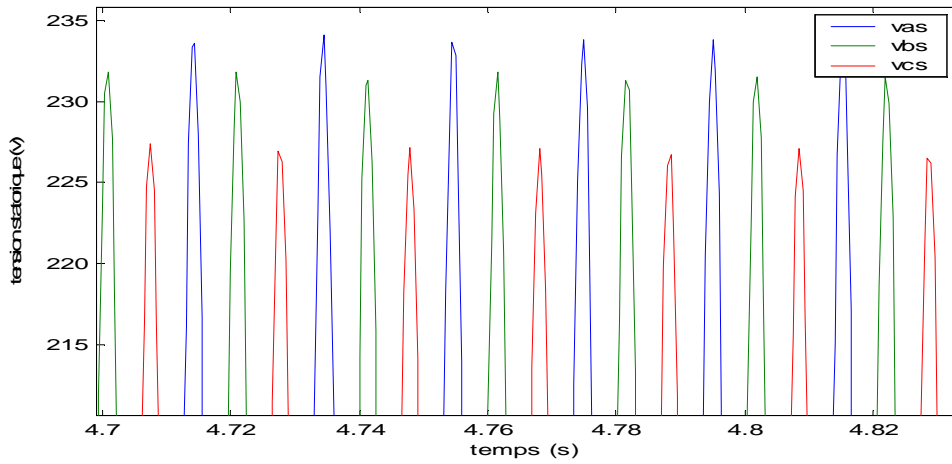


Figure III-29: Zoom sur les tensions statoriques

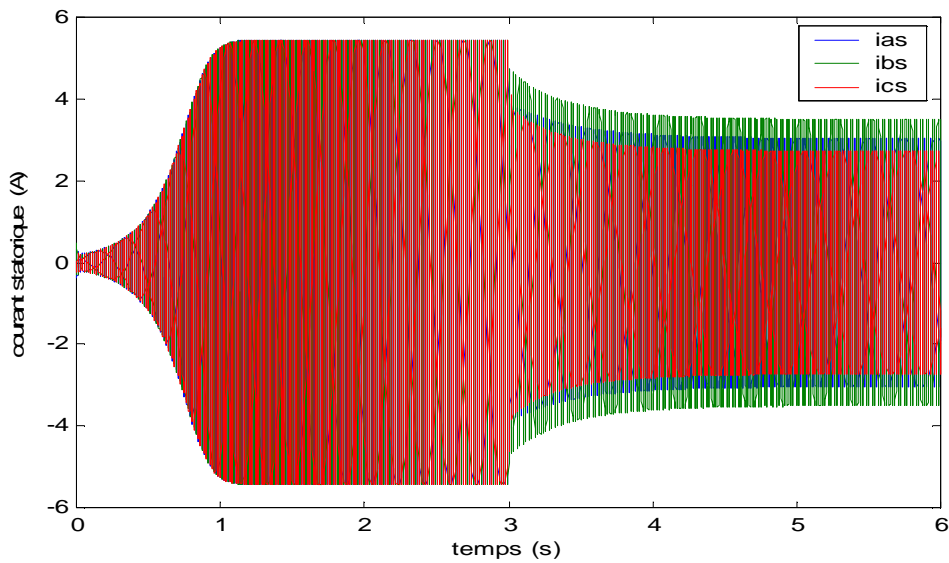


Figure III-30: Évolution des courants statoriques

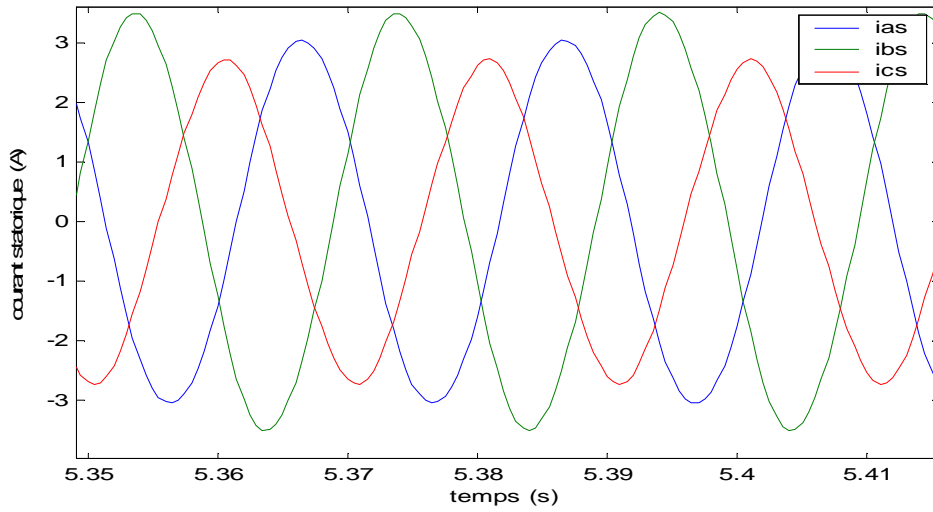


Figure III-31: Zoom sur les courants statoriques

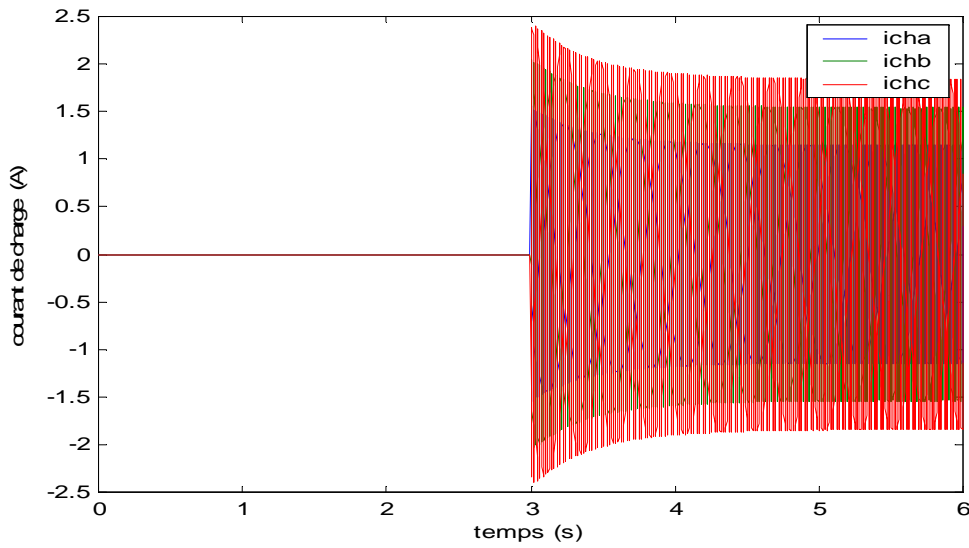


Figure III-32: Évolution des courants de charges

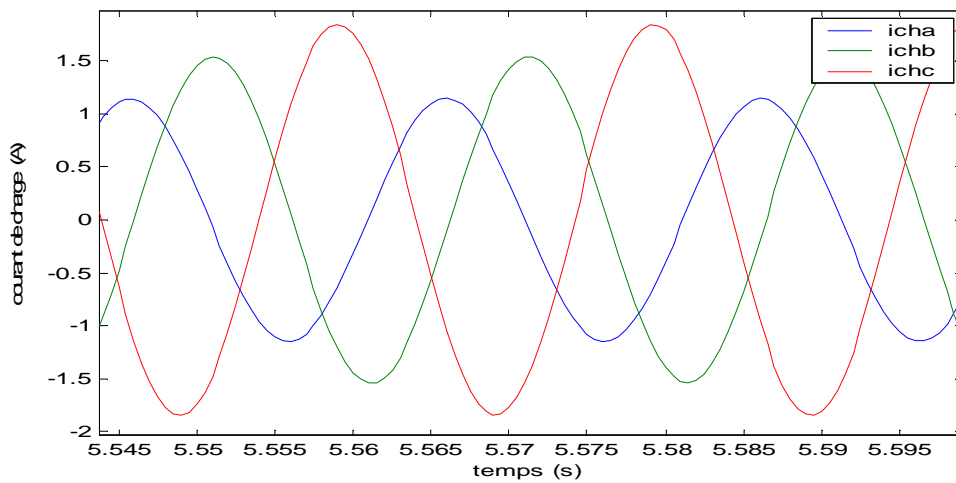


Figure III-33: Zoom sur les courants de charges

Dans les deux cas de fonctionnement en charge déséquilibrée (R et RL), nous remarquons les mêmes tendances que pour un fonctionnement sur charge équilibrée, c'est-à-dire que les tensions chutent à l'introduction des charges déséquilibrées et cette chute est déséquilibrée, elle est plus prononcée pour une résistance plus petite. Les courants sont également déséquilibrés en fonction des résistances des phases. L'introduction des inductances aggrave la chute de tension, cette dernière est également déséquilibrée en fonction des valeurs des différentes inductances.

Il y a lieu de constater enfin que cette manière de modéliser le déséquilibre en utilisant le passage aux équations en triphasé (abc) est simple et efficace et donne des résultats qui nous semblent corrects.

III.4. Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'exploitation du programme écrit sous Matlab-Simulink et qui est basé sur le modèle décrit dans le chapitre précédent.

Plusieurs tests par simulation ont été menés. Le premier est un fonctionnement à vide où nous avons étudié l'influence de la capacité d'auto-amorçage sur l'amplitude et la dynamique de la tension statorique. Nous avons déduit de cette étude que cette capacité a une grande influence sur le maintien de la tension statorique et qu'il existe une valeur minimale de cette capacité au dessous de laquelle l'amorçage est impossible et une valeur maximale au delà de laquelle la tension cesse d'augmenter mais commence plutôt à diminuer.

Les tests en charge ont montré que l'introduction d'une charge résistive équilibrée fait chuter la tension statorique et plus grande est la charge plus grave est la chute de tension. L'introduction d'une charge résistive-inductive aggrave d'avantage la chute de tension, puisque cette inductance puise son énergie réactive du même condensateur qui sert à magnétiser la machine.

La charge déséquilibrée provoque les mêmes effets que la charge équilibrée, la différence réside dans les amplitudes des chutes de tensions qui dépendent des valeurs des différentes résistances et inductances.

Chapitre IV

IV.1.Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons toujours considéré que la vitesse d'entraînement de la GAAE est constante. Dans ce chapitre, notre génératrice asynchrone auto-excitée est entraînée par une machine à courant continu, donc on ne considère plus la vitesse de rotation de la GAAE comme étant constante, mais plutôt comme étant la sortie du moteur d'entraînement.

L'objectif de ce chapitre est d'introduire un modèle Matlab-Simulink du moteur à courant continu et de construire le modèle de l'ensemble MCC-GAAE. Dans ce modèle, le couple électromagnétique de la GAAE agit comme un couple résistant au moteur à courant continu. Ce nouveau système s'approche beaucoup plus de la réalité et nous allons étudier dans ce chapitre par des tests de simulation, le comportement de la vitesse de rotation de l'ensemble MCC-GAAE et son influence sur l'amplitude de la tension et le courant statorique.

Dans ce cadre, nous effectuerons un test dans lequel nous ferons initialement fonctionner le moteur à vide ; c'est-à-dire sans prise en compte du couple électromagnétique de la GAAE. Nous mettrons en action ce couple électromagnétique, qui est un couple résistant pour le MCC, qu'une fois la GAAE est amorcée.

IV.2.Description d'un moteur à courant continu

Une machine à courant continu est un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique.

Un moteur électrique à courant continu est constitué d'un stator qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé soit par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanents. Le stator est aussi appelé inducteur. Il est également constitué d'un rotor bobiné relié à un collecteur rotatif inversant la polarité dans chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour, de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique. Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits.

Le système balais-collecteur joue le rôle d'un redresseur mécanique.

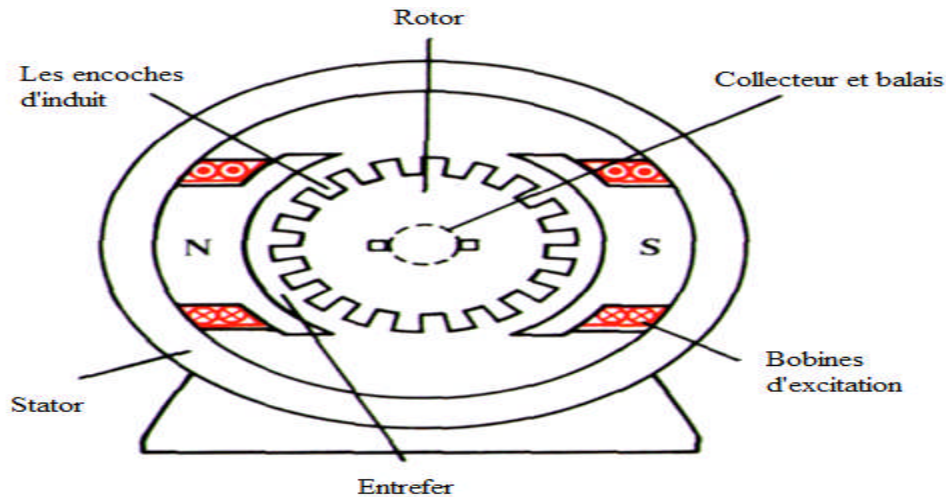


Figure IV-1 : Schéma d'un moteur à courant continu.

IV.3. Principe de fonctionnement

Dans la machine à courant continu, le champ magnétique est produit par un inducteur. Lorsqu'on alimente les spires embrassées par le flux magnétique de l'inducteur il se crée sur celle-ci des forces électromagnétiques qui entraînent un déplacement angulaire de l'induit. Le collecteur alimente ensuite une autre spire et ce phénomène se produit tant que le moteur est alimenté. L'induit entraîne alors le rotor en mouvement en lui transmettant son couple.

Pour inverser le sens de rotation d'un Moteur à courant continu, il suffit d'inverser le sens du courant dans l'induit ou dans l'inducteur.

IV.4. Modélisation de la machine a courant continu

La machine à courant continu peut être modélisée par le biais d'équations électriques, électromagnétiques et mécaniques. Ces trois groupes d'équations nous permettront de mieux comprendre le fonctionnement réel de la machine à courant continu.

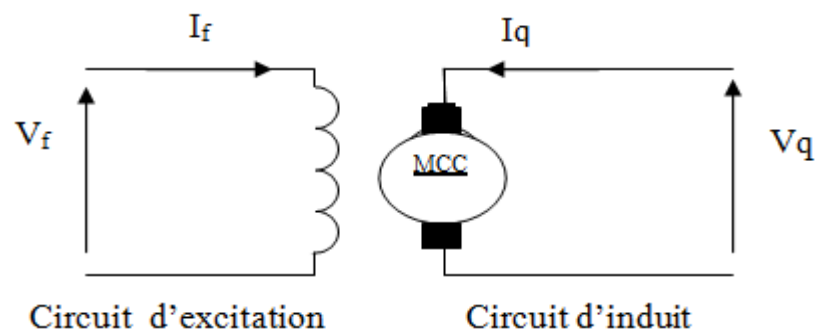


Figure IV-2 : Schéma synoptique de la Machine à courant continu à excitation indépendante

Équations électriques :

$$V_f = R_f \cdot i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \Rightarrow \frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_f - R_f \cdot i_f) \quad (IV.1)$$

$$V_q = M_{fd} \cdot \omega_r \cdot i_f + R_q \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \Rightarrow \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (V_q - M_{fd} \cdot \omega_r \cdot i_f - R_q \cdot i_q) \quad (IV.2)$$

Expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q \quad (IV.3)$$

Equation du mouvement du moteur entraînant une charge de couple résistant Cr :

$$C_{em} - C_r - K_f \cdot \omega_r = J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \Rightarrow \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_{fd} \cdot i_f \cdot i_q - C_r - K_f \cdot \omega_r) \quad (IV.4)$$

A partir de ces équations, nous obtenons le schéma bloc permettant de construire le modèle du moteur à courant continu sous Matlab-Simulink.

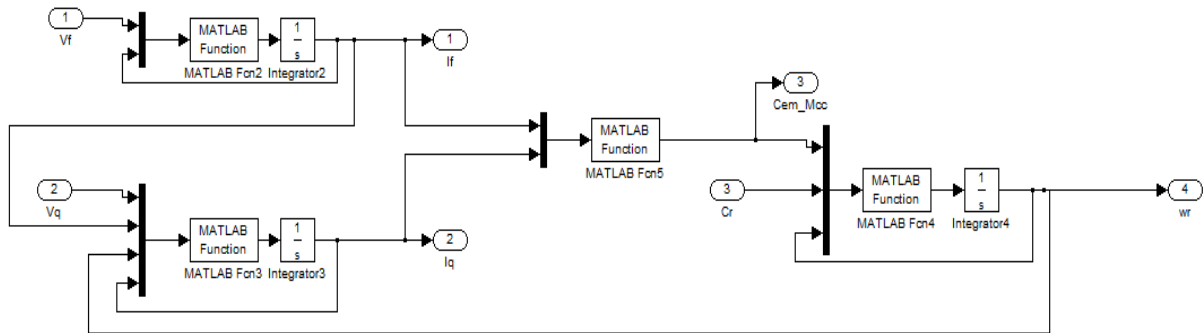


Figure IV-3 : Schéma Matlab-Simulink d'un moteur à courant continu

Lorsque la génératrice est entraînée par une machine à courant continu, le couple électromagnétique développé par la génératrice (C_{em_GAAE}) devient le couple résistant de la Mcc avec :

$$C_{em_GAAE} = \phi d_s \cdot i_{q_s} - \phi q_s \cdot i_{d_s} \quad (IV.5)$$

Donc l'équation du mouvement du moteur à courant continu qui entraîne une génératrice s'écrit sous la forme suivante :

$$C_{em_Mcc} - C_{em_GAAE} - K_f \cdot \omega_r = J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \Rightarrow \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em_Mcc} - C_{em_GAAE} - K_f \cdot \omega_r) \quad (IV.6)$$

Basé sur les équations précédentes, un modèle Matlab-Simulink du moteur à courant continu est construit. Ce modèle est connecté avec le modèle de la GAAE construit dans le

deuxième chapitre pour constituer un schéma Matlab-Simulink de l'ensemble MCC-GAAE comme montré dans la figure ci-dessous.

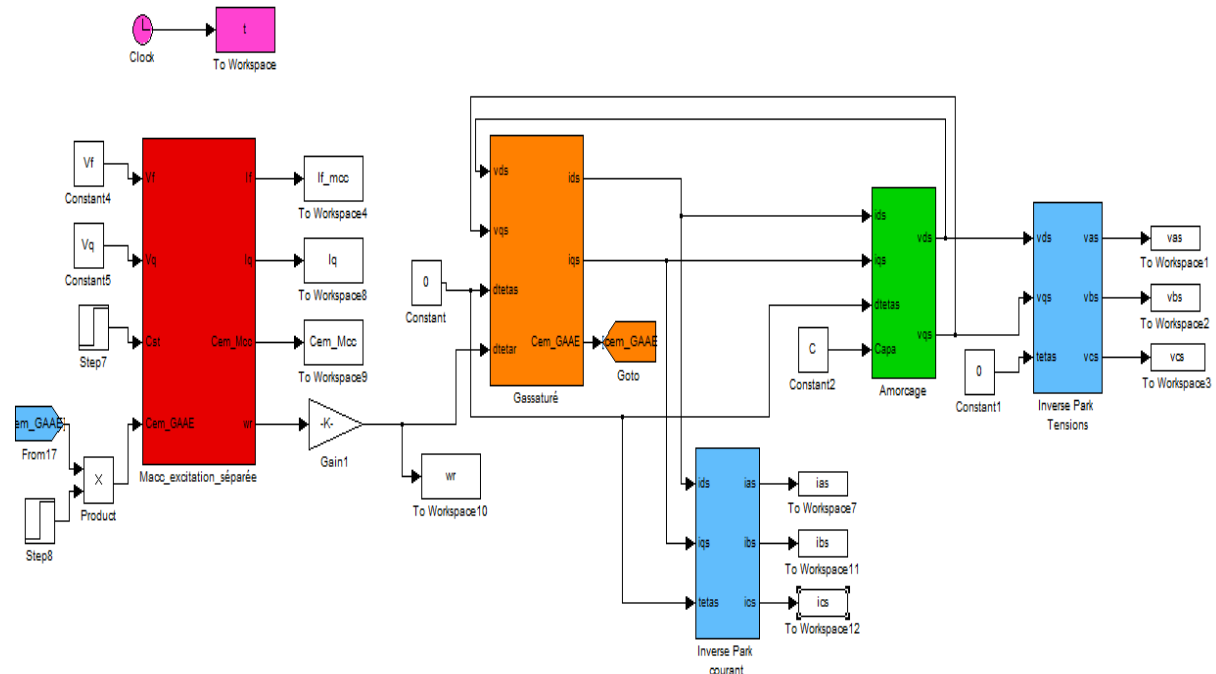


Figure IV-4 : Schéma Matlab-Simulink de l'ensemble MCC-GAAE

IV.5. Résultats de simulation et interprétation

Dans ce qui suit, nous montrons les résultats de simulation des tests que nous avons mentionnés en introduction. Il s'agit d'introduire la prise en compte du couple électromagnétique de la génératrice à un instant donné correspondant au moment où l'auto-amorçage de la GAAE est considéré comme ayant atteint son régime permanent.

En réalité, le couple électromagnétique intervient dès le début de la simulation (à $t=0$). Il est nul avant l'auto-amorçage et devient brusquement résistant à l'auto-amorçage. Nous avons voulu montrer dans un même graphe, la vitesse de rotation du MCC avant et après auto-amorçage de la GAAE. En pratique, cela revient à placer un contacteur ou un disjoncteur triphasé entre le stator de la GAAE et le banc capacitif et l'enclencher une fois la vitesse nominale du MCC atteinte.

Nous allons étudier en même temps, l'influence de la vitesse de rotation de l'ensemble MCC-GAAE sur la tension et le courant statorique.

Les figures ci-dessous montrent les résultats de la tension et du courant statorique, ainsi que ceux de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique de la GAAE. Nous avons regroupé ces courbes dans la même figure pour avoir une vue d'ensemble et mieux interpréter les résultats.

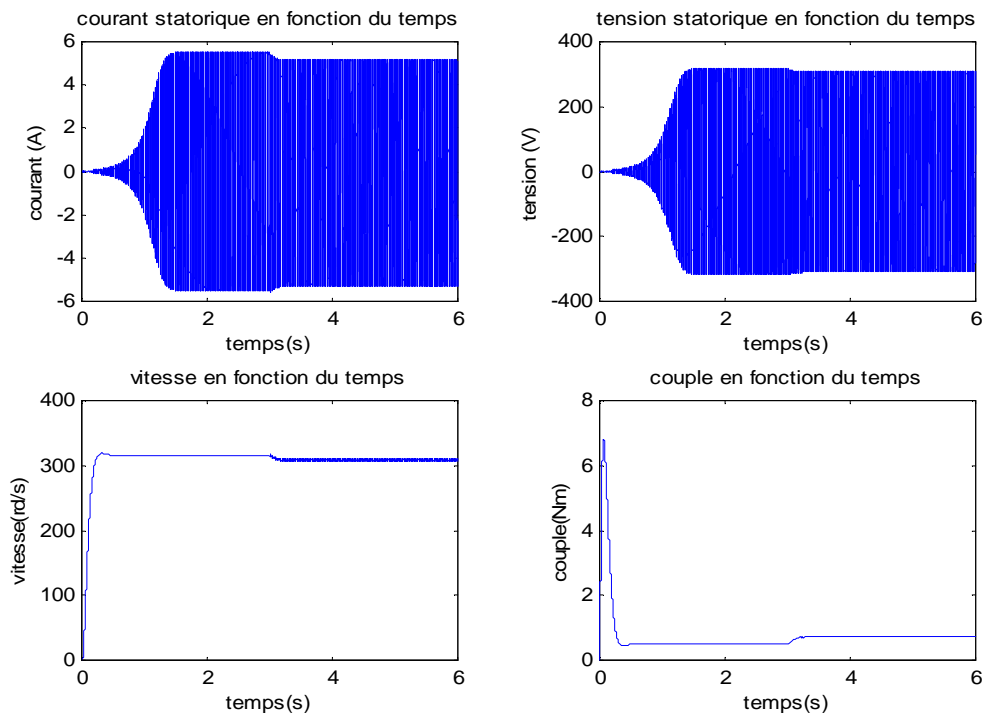


Figure IV-5 : Évolution de la tension statorique, du courant statorique, de la vitesse de rotation et du couple moteur

Au début de la simulation la génératrice fonctionne à vide et le couple résistant est nul, la tension statorique passe par un régime transitoire jusqu'à ce qu'elle atteigne le régime permanent, la même chose est constatée pour le courant statorique et la vitesse de rotation.

A l'instant ($t=3s$), on remarque une légère chute dans la tension et le courant statorique, cela est dû à l'introduction du couple électromagnétique de la génératrice pour laquelle le moteur à courant continu répond par une augmentation de son couple moteur et une légère diminution de sa vitesse d'entraînement.

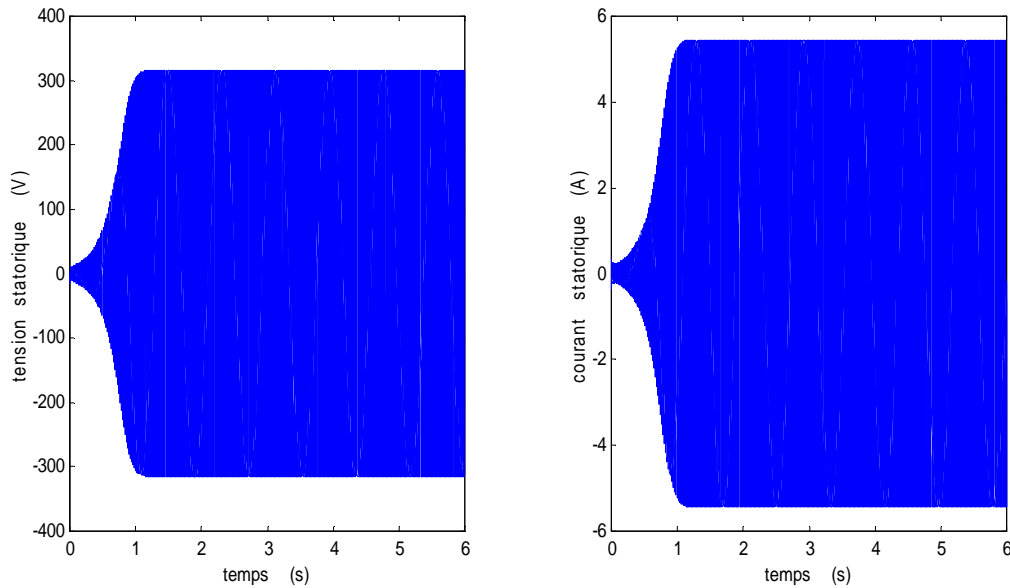


Figure IV-6 : Évolution de la tension et du courant statorique de la GAAE à vitesse de rotation constante

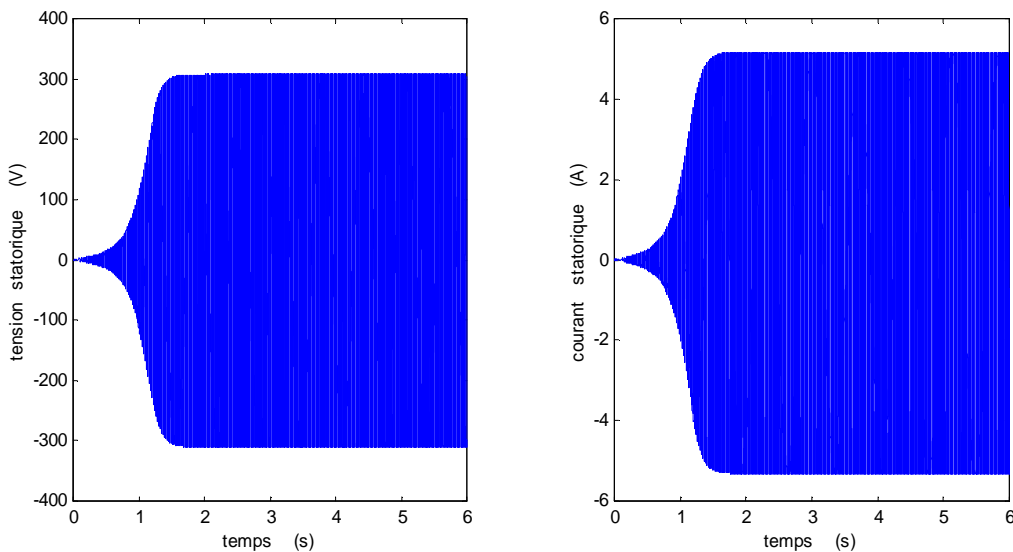


Figure IV-7 : Évolution de la tension et du courant statorique de la GAAE avec prise en compte de la vitesse réelle du moteur d'entraînement (C_{em_GAAE} à partir de $t=0s$)

D'après les résultats obtenus on remarque que lorsqu'on introduit le couple électromagnétique (C_{em_GAAE}) au début de la simulation l'amplitude de la tension et du courant statorique diminue légèrement, et le délai d'amorçage est plus grand par rapport à l'essai à vitesse constante. Cela est dû à la vitesse de rotation qui passe d'abord par un régime transitoire, puis se stabilise à une valeur légèrement plus faible que dans le premier cas.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons construit un modèle Matlab-Simulink d'un moteur à courant continu que nous avons adjoint à celui de la GAAE pour construire le modèle d'un ensemble MACC-GAAE qui s'approche mieux de la réalité.

Nous avons ensuite testé cet ensemble pour étudier le comportement de la vitesse considérée jusqu'ici comme étant constante. Les tests ont montré que cette dernière chute légèrement entraînant à son tour une légère chute de la tension statorique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire a consisté à la modélisation de la génératrice asynchrone auto-excitée utilisée dans les sites isolés et automnes. L'étude des différentes caractéristiques de la machine passe par l'élaboration du modèle analytique de cette dernière dans le cas linéaire et saturé.

Dans le premier chapitre nous avons donné une vue générale sur les systèmes éoliens, en commençant par présenter la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent et donner quelques notions sur ce dernier, ensuite et après avoir cité les différents types d'éoliennes nous avons donné une description générale sur les principaux composants qui constituent cette dernière.

Le second 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 de notre génératrice, celui-ci fait appel à des matrices inductances constantes. Par la suite, Nous avons présenté la procédure de prise en compte de l'effet de la saturation magnétique de la génératrice en régime dynamique, en introduisant dans le modèle linéaire une inductance magnétisante variable en fonction du courant magnétisant, en fin nous avons rajouté les équations d'auto-amorçage à vide et en charge.

Dans le troisième chapitre nous avons développé des programmes sous Matlab-Simulink à l'aide des équations décrites dans le chapitre précédent, et nous avons effectué plusieurs tests de simulation.

Dans le premier cas on a simulé un fonctionnement à vide pour étudier l'influence de la capacité d'auto-amorçage sur l'amplitude et la dynamique de la tension statorique, et dans le deuxième cas on a fait des tests de fonctionnement avec des charges équilibrées et déséquilibrées (R et RL).

Dans le dernier chapitre on a introduit une machine à courant continu pour entraîner notre génératrice. Après avoir établi les équations électriques et mécaniques de la machine, nous avons développé un schéma sous Matlab-Simulink de l'ensemble MCC-GAAE et on a montré l'influence du couple électromagnétique de la génératrice sur la vitesse de rotation et donc sur l'amplitude de la tension et du courant statorique.

Certaines remarques relatives au fonctionnement de la génératrice asynchrone auto-excitée doit être citées :

Conclusion générale

- La prise en compte de la saturation dans le modèle de la génératrice asynchrone auto-excité est une nécessité.
- Les capacités du condensateur et la vitesse de rotation ont une influence sur l'amplitude en régime permanent et sur la durée du régime transitoire de la tension et du courant statorique.
- L'introduction de la charge fait chuter la tension et le courant statorique, donc il existe une charge critique au-delà de laquelle la machine se désamorce.

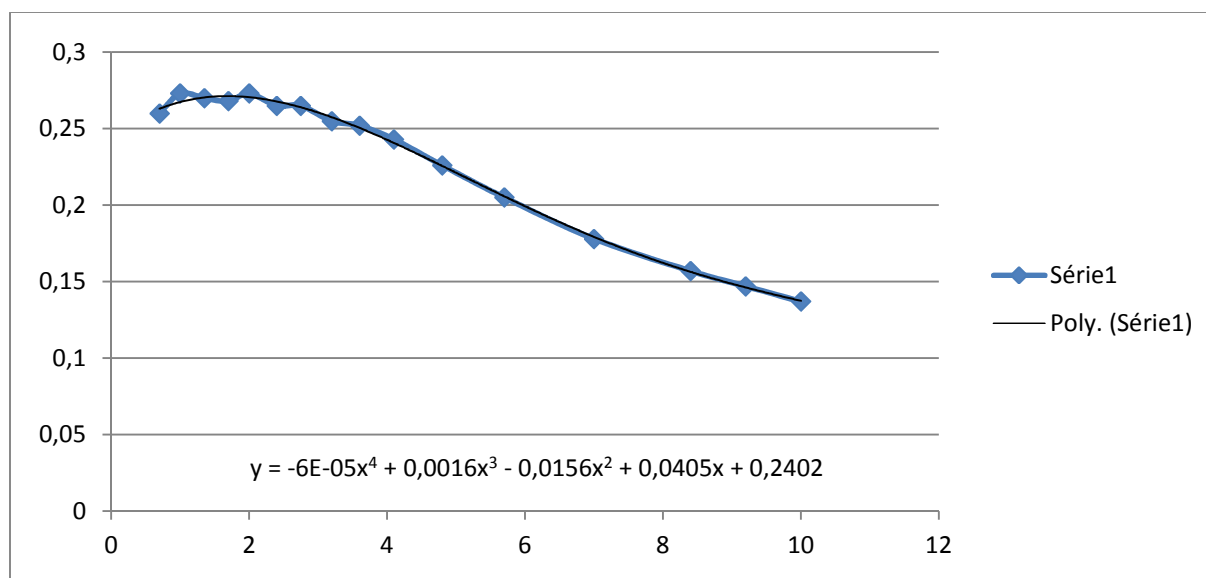
Annexes

Annexe a

A.1. Approximation polynomiale de l'inductance magnétisante en fonction du courant de magnétisation

La courbe de l'évolution de l'inductance magnétisante est obtenue à partir des valeurs relevées lors d'un essai expérimental à rotor ouvert.

Afin d'avoir une meilleure approximation polynomiale de l'inductance magnétisante en fonction du courant de magnétisation, on a testé plusieurs polynômes. Nous avons opté pour le polynôme de degré 4. Dans ce qui suit, nous présentons la caractéristique $L_m=f(i_m)$.



Les équations suivantes représentent respectivement les approximations polynomiales choisies pour la variation de l'inductance de magnétisante et de sa dérivée en fonction du courant magnétisant.

$$L_m = -6 \cdot 10^{-5} \cdot i_m^4 + 0.0016 \cdot i_m^3 - 0.0156 \cdot i_m^2 + 0.0405 \cdot i_m + 0.2402$$

$$L_m' = -24 \cdot 10^{-5} \cdot i_m^3 + 0.0048 \cdot i_m^2 - 0.0312 \cdot i_m + 0.0405$$

A.2. Tension d'auto-amorçage à vide de la GAAE avec et sans prise en compte de Lm'

Les figures suivantes représentent les deux résultats de simulation d'un fonctionnement à Vide avec et sans prise en compte de Lm' .

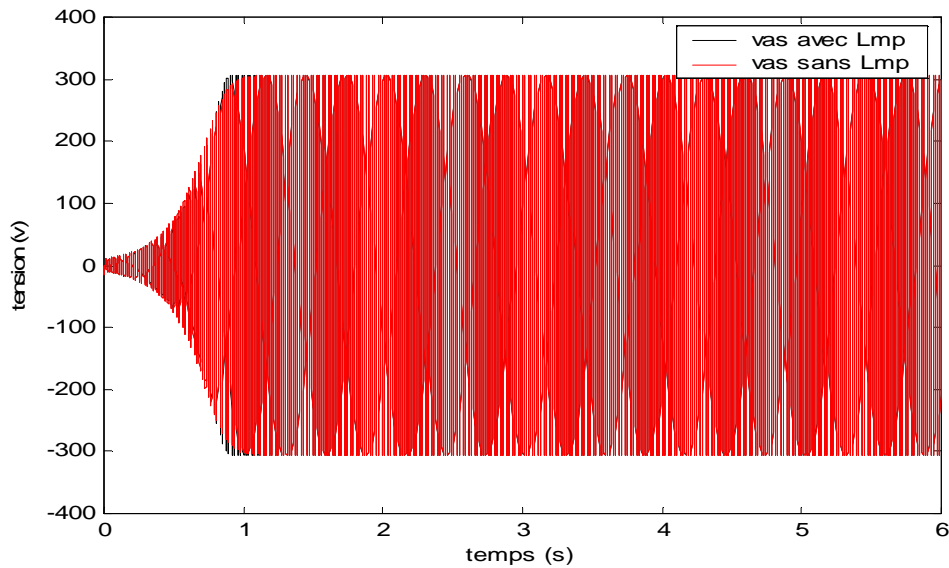


Figure a-1: Evolution de la tension statorique d'autoamorçage à vide avec et sans Lm'

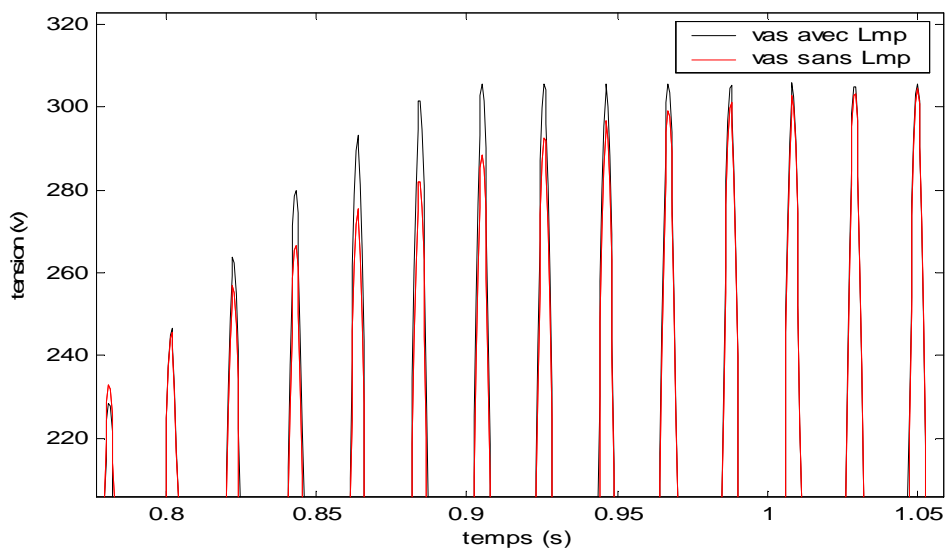


Figure a-2 : zoom sur l'évolution de la tension statorique d'auto-amorçage avec et sans Lm'

Annexe b

Paramètres de la Génératrice asynchrone

$P_n = 3.5$	kw	Puissance nominale
$V_n = 400/230$	V	Tension nominale
$I_n = 6.3/11$	A	Courant nominal
$f = 50$	Hz	Fréquence
$p = 2$		Nombre de paires de pôles
$R_s = 1.615$	Ω	Résistance statorique
$R_r = 1.9268$	Ω	Résistance rotorique ramenée au stator
$L_{s\sigma} = 0.0126$	H	Inductance de fuites statorique
$L_{r\sigma} = 0.0126$	H	Inductance de fuites rotorique ramenée au stator
$L_m = 0.126$	H	Inductance magnétisante

Paramètres de la machine à courant continu à excitation indépendante

$P_n = 3$	kw	Puissance nominale
$P = 1$		Nombre de paires de pôles
$V_f = 220$	V	Tension d'inducteur
$R_f = 65.15$	Ω	Résistance de l'inducteur
$L_f = 8.35$	H	Inductance propre d'inducteur
$V_q = 220$	V	Tension d'induit
$R_q = 1.35$	Ω	Résistance de l'induit
$L_q = 0.0059$	H	Inductance propre d'induit
$M_{fd} = 1.07$	H	Inductance mutuelle entre induit et inducteur
$k_f = 0.0045$	N.m.s/rad	Coefficient de frottements
$J = 0.036$	kg.m ²	Inertie des masses tournantes

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] K. Idjdarene, « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion à énergie éolienne basée sur une génératrice asynchrone en fonctionnement autonome », Thèse de doctorat à l'université Abderrahmane MIRA – Béjaïa, 2010.

- [2] Frédéric Poitiers, « Etude et Commande de Générateurs Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne », Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.

- [3] AHMED SID Farid, «Modélisation et commande du Générateur éolien a double alimentation avec filtrage actif de réseau », Mémoire de Magister, ENP, 2009.

- [4] A.MOUSSA SIDDO, «Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur , ENP, 2007.

- [5] A.SAKI et M.DELAIDI, «Etude d'un Générateur Asynchrone dans la production d'énergie électrique par éolienne », Mémoire d'ingénieur , ENP, 2006.

- [6] I.SEBIHI et K.HAFSI, «Etude du générateur asynchrone auto-excitée pour l'utilisation dans le système éolienne », Mémoire Master académique, U K M O, 2014.

- [7] W.REDJAI et H.BENSABRA, «Commande d'une génératrice asynchrone auto-excite application éoliennes», Mémoire Master professionnel, U K M O, 2012.

- [8] M.MALKI et S.BELARBI, « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret», Mémoire de Master, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen , 2014.

- [9] M. Abbas et M, Mechentel, « Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux Application à l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur , ENP, 2006.

- [10] N. Mekkaoui, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini- Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », Mémoire de Magister à l'université de Batna, 2004.
- [11] R. Redjem, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magister à l'université Mentouri de Constantine, 2009.
- [12] Y. NAIT MOHAND et Y. GHEZALI, « Etude de la conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) », Mémoire de Master académique, UMMTO, 2011.
- [13] GH. BARA et Y. HACHREROUF, « Modélisation et simulation de la génératrice asynchrone auto-excitée, application à la conversion de l'énergie éolienne », Mémoire de Master académique, UMMTO, 2012.
- [14] G. LEGHLID, « Modélisation et simulation d'une génératrice asynchrone autonome », Mémoire de Master, UMMTO, 2011.
- [15] GH. YAKOUBI et R. CHAIB, « Etude théorique et expérimentale d'une génératrice asynchrone auto-excitée », Mémoire de Master académique, UMMTO, 2013.