

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° :



DOMAINE : Génie électrique
FILIERE :Électromécanique
OPTION :Électromécanique

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER Académique

Spécialité : Electromécanique

Intitulé

**Modèle dynamique d'une génératrice
asynchrone auto excitée**

Proposé et dirigé par :

MABRAK Samir

Présenté par :

BOUZID Abdelhak

Examiné par le jury composé de :

Mr : CHAKROUNE Salim

Mr : MABRAK Samir

Mr : KHODJA Djalal Eddine

Président

Rapporteur

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2021/ 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مُلَخَّص

في هذا العمل قمنا بدراسة مختلف الظواهر المرافقة لعمل المولد اللاتزامني المحرض بمكثفة في دورين أساسين : - الأول كمولد مستقل عن الشبكة الكهربائية و الثاني أثناء ربطه بالشبكة قبل الوقوف على مختلف هذه النتائج المرجوة من هذا العمل قمنا بتمثيل نظام التوليد قيد الدراسة بشكل نموذج رياضي لتسهيل الدراسة.

الكلمات المفتاحية : المولد اللاتزامني ، الآلة اللاتزامنية ، التمثيل الرياضي ، تحريض ذاتي ، مكثفة

تحريض ، التشبع المغناطيسي ، ذاتي التوليد ، الوصل بالشبكة الكهربائية.

Résumé

L'objet de ce travail consiste à étudier le comportement dynamique et statique de la génératrice asynchrone auto-excité par un banc de capacités dans un fonctionnement autonome et raccordé au réseau électrique. Cela passe d'abord par la modélisation de système de production et par une validation expérimentale de modèle utilisé.

Mots clés : génératrice asynchrone, machine asynchrone, modélisation, autoamorçage, batteries d'excitations, saturation magnétique, autonome, raccordé au réseau.

Abstract

The object of this work consists in studying the dynamic and static behavior of the induction generator that can function in autonomous function or connected to the electric network. It first passes by the modeling of production system and by a tentative validation of model used.

Key words: induction generator, excitation capacitor, modeling, self excited, magnetic, autonomous saturation, connected to the network.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, Le tout puissant de nous avoir donnés le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

*Je tiens à exprimer toute notre gratitude et nos sincères remerciements à notre promoteur Monsieur **MABRAK Samir**, pour avoir dirigé ce travail, pour ses grandes compétences scientifiques ainsi que pour ses conseils.*

Je remercie ma famille qui m'a toujours encouragé et soutenu durant toutes mes études.

Mes remerciements s'adressent également, aux membres de jury, qui me font l'honneur d'évaluer mon modeste travail.

Je remercie également l'ensemble des enseignants du département de Génie Electrique qui ont contribué à ma formation dans les meilleures conditions

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail à ceux qui me sont les plus chers

au monde, mes parents BOUZID Abdelkader

Et CHEBILI Keltoum

LISTE DES FIGURES

N°	Titre de la figure	Page
I. 1	Composant d'une machine synchrone.	4
I. 2	a. Machine synchrone à pôles lisses. b. Machine synchrone à pôles saillants.	5
I. 3	Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur –onduleur	5
I. 4	Composants d'une machine asynchrone.	7
I. 5	Vue détaillé d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.	7
I. 6	Stator d'une machine asynchrone triphasée.	8
I. 7	Photo du rotor d'une machine asynchrone.	8
I. 8	Machine asynchrone à moteur à cage.	9
I. 9	Génératrice asynchrone à cage à vitesse fixe.	10
I. 10	Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable.	10
I. 11	Machine asynchrone à rotor bobiné.	11
I. 12	Système éolienne connectés avec génératrice à rotor bobiné.	12
I. 13	couple de la machine asynchrone.	14
I. 14	Machine asynchrone connectée au réseau _banc de capacité_	15
I. 15	Schéma de principe du fonctionnement de la machine asynchrone	18
I. 16	Structure avec convertisseur à diode et hacheur.	20
I. 17	Structure avec convertisseur MLI en parallèle avec la charge	21
II. 1	Représentation schématique de la machine asynchrone triphasée	23
II. 2	Transformation de système triphasé à un système biphasé	26
II. 3	Coïncidence des axes directs de rotor et de stator	29
II. 4	Chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone auto-amorcée	32
II. 5	Schéma bloc de simulation du générateur asynchrone en régime linéaire	33
II. 6	Evolution des courants magnétisants sous hypothèse de linéarité	34
II. 7	Evolution des courants statoriques sous l'hypothèse de linéarité	35
II. 8	Evolution des tensions statoriques sous l'hypothèse de linéarité	35
III. 1	Génératrice asynchrone auto-excité	38
III. 2	Schéma équivalent de la MAS avec circuits couplés	38
III. 3	Schéma équivalent ramené au stator avec les fuites magnétiques totalisées au stator	40
III.4	Schéma équivalent pour l'auto-amorçage à vide	40
III. 5	Détermination de la zone d'amorçage de la GAS	43
III. 6	Schéma équivalent pour l'auto-amorçage en charge résistive	45
III. 7	La génératrice dans le cas amorcé	47
III. 8	La génératrice dans le cas désamorçée	47
III. 9	Schéma équivalent pour l'auto-amorçage en charge inductive	48
III. 10	Résultat simulé	49
III. 11	Résultat simulé	50
III. 12	Résultat simulé	50
III. 13	Insertion d'une charge aux bornes de la génératrice	51
III. 14	Courant(a) et tension(b) statorique lors la connexion d'une charge résistive	52

III. 15	Courant de charge i_{ch} (a) et courant magnétisant (b) lors la connexion d'une charge résistive	52
III. 16	Désamorçage de la génératrice cas d'une charge critique $R=10 \Omega$.	53
III. 17	Tension statorique. (a) charge purement résistive, (b) charge R en série avec une inductance.	54
III. 18	Courant statorique (a) et courant magnétisant (b)	55
III. 19	la tension statorique lors la mis en parallèle d'une capacité C.	56
III. 20	a. Le courant statorique. b. Le courant magnétisant.	56
III. 21a	a. Le courant statorique pour différente valeur de capacité à 1500 tr/mn.	57
III. 21b	b. La tension statorique pour différente valeur de capacité à 1500 tr/mn.	57
III. 22	La valeur max de la tension statorique pour différente valeur de vitesse pour $C=198\mu F$.	58
III. 23	Phénomène d'autoamorçage.	59
III. 24	Enveloppe de la tension statorique pour différentes valeurs de la résistance statorique	59
III. 25	Enveloppe de la tension statorique pour différentes valeurs de la résistance rotorique	60
III. 26	Influence de la résistance de charge sur la tension statorique	60
III. 27	Influence de $\cos \phi$ sur la tension statorique. $Z=50 \text{ ohm}$.	61
III. 28	La tension statorique lors le déséquilibre de la charge.	62
III. 29	La tension statorique lors le déséquilibre des capacités.	62

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
Chapitre I : État de l'art des machines à courant alternatif	
I. 1. Introduction :	3
I. 2. Types de machines électriques à courant alternatif :	3
I. 2. 1. Machine synchrone :	3
I. 2. 2. Machine asynchrone :	5
I. 3. Historique :	6
I. 4. Constitution de la machine asynchrone :	7
I. 4. 1. Stator :	8
I. 4. 2. Rotor :	8
I. 4. 3. L'entrefer :	12
I. 4. 4. Paliers :	12
I. 5. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone :	12
I. 6. Glissement d'une machine asynchrone :	13
I. 7. Auto-excitation de la machine asynchrone:	14
I. 8. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :	16
I. 8. 1. Avantages :	16
I. 8. 2. Inconvénients :	16
I. 9. La vitesse de synchronisme :	16
I. 10. Principe de fonctionnement :	17

I. 10. 1. Fonctionnement en moteur :	18
I. 10. 2. Fonctionnement en générateur :.....	19
I. 11. Utilisation de la Machine asynchrone :	19
I. 12. Structures d'aérogénérateurs asynchrones autonomes :	19
I. 12. 1. Convertisseur unidirectionnel (redresseur à diode ou mixte) :	20
I. 12. 2. Batterie de condensateurs fixes associée à un onduleur en parallèle avec la charge :.....	20
I. 13. Conclusion :	21

Chapitre II : Modalisation d'une machine asynchrone auto-excitée

II. 1. Introduction :	22
II. 2. Modélisation de la machine asynchrone :	22
II. 2. 1. Hypothèses Simplificatrices :	22
II. 2. 2. Équations générales de la Machine Asynchrone :.....	23
II. 2. 3. Équations des flux :	24
II. 2. 4. Mise en équation matricielle :	25
II. 2. 5. Utilisation de la transformation de PARK :	25
II. 2. 5. 1. Application de la transformation de Park sur les tensions et les courants :	25
II. 2. 5. 2. Application de la transformation de Park sur les Flux :	28
II. 2. 6. Expression du couple :	30
II. 2. 7. Expression du couple :	31
II. 3. Modélisation de capacité d'excitation :	32
II. 4. Simulation du générateur asynchrone en régime linéaire :	33
II. 5. Simulation de l'auto-amorçage du générateur asynchrone sous hypothèse de linéarité :	34
II. 6. Conclusion :.....	37

Chapitre III : Fonctionnement Autonome de la Génératrice Asynchrone

III. 1. Introduction :	37
III. 2. Auto-amorçage de la génératrice asynchrone :	37
III. 2. 1. Modélisation de la MAS en régime permanent :	37
III. 2. 1. 1. Schéma équivalent de la machine asynchrone en régime permanent :	38
III. 2. 1. 2. Schéma ramené au stator avec inductance de fuites localisées au stator :	39
III. 2. 2. Étude analytique de l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone :	40
III. 2. 2. 1. Amorçage à vide :	42
III. 2. 2. 2. Amorçage en charge:	45
III. 3. Analyse des performances en régime équilibré :	49
III. 3. 1. Fonctionnement à vide de la génératrice asynchrone :	49
III. 3. 1. 1. Tension d'amorçage de la génératrice :	49
III. 3. 1. 2. Courant d'amorçage statorique :	50
III. 3. 1. 3. Courant d'amorçage rotorique :	50
III. 3. 2. Fonctionnement en charge de la génératrice asynchrone :	51
III. 3. 2. 1. Cas d'une charge résistive :	51
III. 3. 2. 2. Cas d'une charge inductive :	53
III. 3. 2. 3. Cas d'une charge RC :	55
III. 4. Analyse des performances de générateur :	57
III. 4. 1. Influence de la capacité C sur la tension et le courant statorique :	57
III. 4. 2. Influence de la vitesse de rotation sur la tension statorique :	58
III. 4. 3. Influence de la résistance statorique sur la tension statorique :	60
III. 4. 4. Influence de la résistance rotorique sur la tension statorique :	60

III. 4. 5. Influence de la résistance de charge sur la tension statorique :	61
III. 4. 6. Influence de $\cos\phi$ de la charge sur la tension statorique :	62
III. 4. 7. Déséquilibre des trois charges:	62
III. 4. 8. Déséquilibre des trois capacités :	63
III. 5. Conclusion :	64
Conclusion	64
Références bibliographiques	66

Introduction

générale

INTRODUCTION GENERALE

Plus de la moitié de l'énergie électrique totale produite dans le monde développé est convertie en énergie mécanique dans des machines électriques. Parmi les différents types de machines électriques, les moteurs asynchrones triphasés occupent une place non négligeable. En effet, au moins 90% des systèmes de contrôle industriels utilisent des machines asynchrones, qui ont progressivement remplacé les machines à service continu en raison de leur simplicité, de leur robustesse, de leur faible coût, de leur fiabilité et de leurs hautes performances. Cependant, le contrôle des machines asynchrones peut devenir extrêmement complexe. Cette complexité est due, en partie, à leur modèle, inconnu, non linéaire, multi variable et fortement couplé. La nécessité de tenir compte des variations des paramètres dans le temps a obligé les informaticiens à développer des algorithmes de contrôle modernes et robustes pour résoudre leurs problèmes.

Plusieurs techniques de commande de machines électriques asynchrones ont été développées. Parmi celles-ci figurent la commande scalaire, la commande de retour d'état, la commande DTC, la commande vectorielle (FOC), la commande non linéaire, la commande adaptative et la commande adaptative floue. Ces commandes permettent d'améliorer les performances de la machine asynchrone en boucle fermée.

Le but de notre travail est de concevoir une commande vectorielle linéarisante pour la machine asynchrone, avec et sans observateur de vitesse. Des réseaux de neurones adaptatifs sont incorporés, dans l'observateur, pour estimer en ligne le couple de charge.

Cette mémoire est structurée comme suit :

Le premier chapitre fournira une brève introduction aux machines électriques, avec un accent sur les machines asynchrones. En effet, la conception de ces machines, ainsi que leurs avantages et inconvénients par rapport à d'autres machines, seront abordés.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des machines asynchrones dans divers repères. Les résultats des simulations seront présentés afin de valider le modèle de machine.

Le troisième et dernier chapitre examine un dispositif autonome de production d'énergie, qui est une machine asynchrone auto - excitée par un banc de capacité.

Chapitre I

*État de l'art des machines à
courant alternatif*

I. 1. Introduction :

Les machines à courant alternatif sont les machines employées le plus fréquemment dans l'industrie. [18] En fait, elles présentent plusieurs avantages par rapport aux machines à service continu, notamment la simplicité, la robustesse, le faible coût et la facilité d'entretien.

Les forces d'attraction et de répulsion dans les machines électriques sont provoquées par l'interaction de deux champs magnétiques, l'un créé par l'enroulement du stator et l'autre par l'enroulement du rotor. La distinction entre les types de machines découle de la façon dont ces champs magnétiques sont créés et de la façon dont ils interagissent les uns avec les autres.

Une machine synchrone est une machine dont la rotation de l'arbre diffère de la rotation du champ tournant. [27]

Il existe plusieurs types de machines asynchrones : l'une d'elles est la machine à induction, qui est une machine asynchrone dans laquelle le circuit magnétique est relié à deux ou plusieurs circuits électriques qui se déplacent l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transféré de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique.

Parce que cette machine à induction est importante dans la pratique, elle fera l'objet de ce mémoire d'examen final.

I. 2. Types de machines électriques à courant alternatif :

I. 2.1. Machine synchrone:

La majorité de l'électricité produite lors du processus de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est produite par des machines synchronisées. Une machine synchrone, comme son nom l'indique, doit tourner à la vitesse de synchronisme.[19]

Elle a des caractéristiques similaires à celles d'une machine à courant continu, mais avec des performances supérieures. Le stator d'une machine synchrone est identique à celui d'une machine asynchrone ; cependant, le rotor est constitué soit d'un aimant permanent, soit d'un enroulement d'excitation alimenté par une source de tension continue, formant un électro-aimant. En plus de l'enroulement d'excitation, le rotor a trois enroulements court-circuités sur lui-même, semblables à une machine asynchrone, avec 120° entre eux et appelés enroulements d'amortisseur. Pour synchroniser une machine, il faut d'abord l'accélérer jusqu'à la vitesse de synchronisation,

puis établir le courant dans l'enroulement d'excitation si le rotor est dépourvu d'amortisseurs enroulements.

Dans le cas contraire, la machine est démarrée sans la faire tourner (démarrage asynchrone), et lorsque la machine est proche de sa vitesse de synchronisation, le courant s'établit dans l'enroulement du flux. Le mécanisme de production d'un couple dans une machine synchrone est le même que dans une machine asynchrone.

Comme le rotor tourne toujours à la vitesse de synchronisation (c.-à-d. sans glissement), il n'y a pas d'induction dans le rotor et la force magnétique du rotor n'est produite que par l'enroulement d'excitation.

Les machines synchrones sont classées en deux types. Le premier type comprend les machines à rotor cylindrique et à couple constant, dites *machines synchrones à pôles lisses* ; ils sont surtout utilisés à grande vitesse comme turbo-alternateurs. Le deuxième type, le plus courant, est constitué de machines à entrefers non distribués, appelées machines synchrones à pôles saillants, qui sont utilisées à faible vitesse dans les centrales hydrauliques.

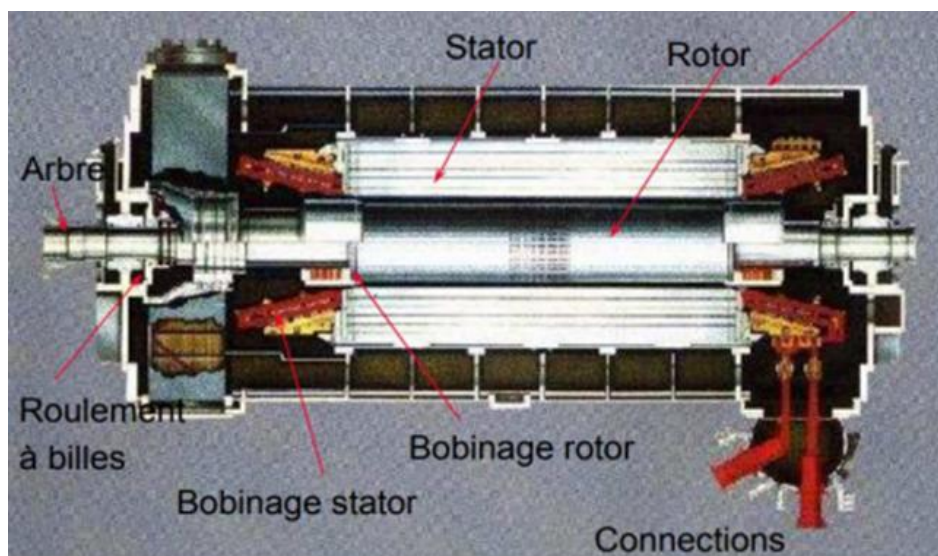


Figure I. 1: Composant d'une machine synchrone.

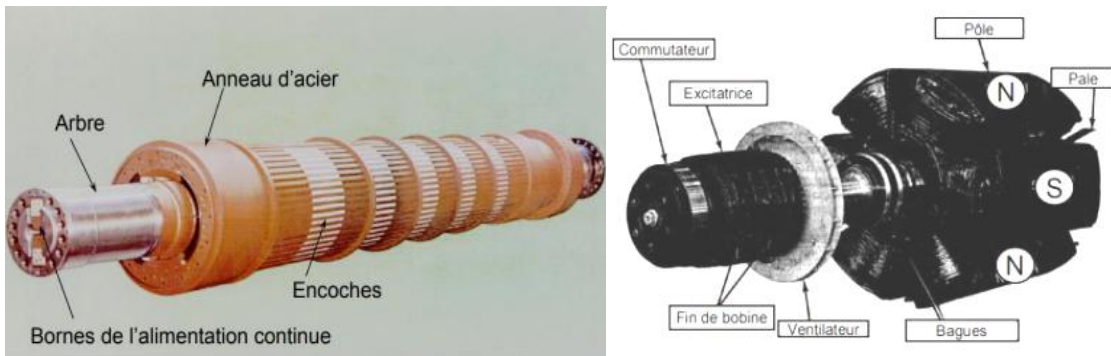


Figure I. 2: a. Machine synchrone à pôles lisses. b. Machine synchrone à pôles saillants.

I. 2.2. Machine asynchrone:

Le générateur asynchrone auto-excité (SEIG) est plus attractif que le générateur synchrone pour diverses raisons, notamment sa robustesse face à la vitesse variable du vent, son fonctionnement sans équilibrage et sans maintenance, sa fiabilité et sa disponibilité, son faible coût de maintenance, et ainsi de suite. C'est le plus utilisé par éolienne et l'un des systèmes énergétiques les plus utilisés en pratique.[26]

Les machines asynchrones à cage continuent de dominer dans le domaine de la production d'énergie éolienne car elles offrent des retours sur investissement favorables, notamment dans les solutions de base lorsqu'elles sont opérationnelles. Les machines asynchrones à cage continuent de dominer dans le domaine de la production d'énergie éolienne car elles offrent des retours sur investissement favorables, notamment dans les solutions de base lorsqu'elles sont opérationnelles.[10]

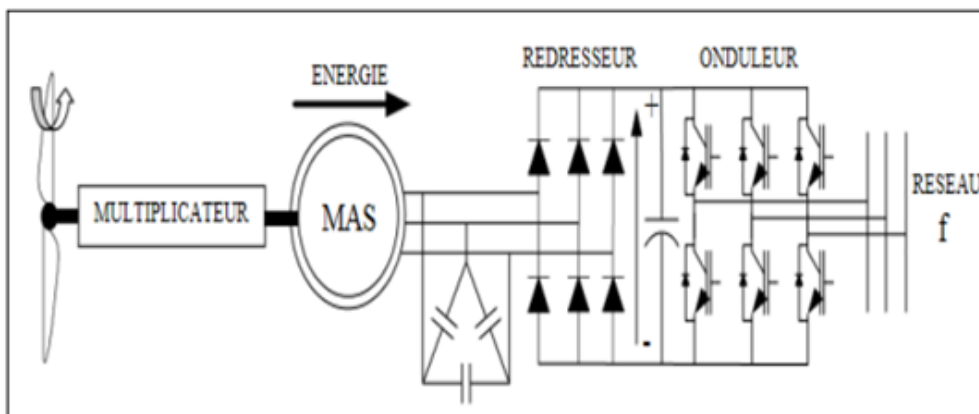


Figure I. 3: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur –onduleur

Tout moteur à induction peut être utilisé comme générateur. Lorsque cette machine est en mouvement, le champ faible résiduel induit une force électromotrice triphasée dans le stator. Ce dernier génère un champ magnétique qui tourne au centre du rotor, augmentant l'aimantation du rotor.

Elle est suivie d'une augmentation de la tension statique, qui fait trembler le système jusqu'à ce qu'il se stabilise. Ce mécanisme de démarrage du générateur asynchrone est connu sous le nom d'auto excitation.[19]

I. 3.Historique :

La paternité de la machine asynchrone est contestée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : Nikola Tesla dépose un brevet pour une machine asynchrone en 1887,[17] suivi de cinq autres brevets en mai de l'année suivante.

Au cours de la même période, Galileo Ferraris publie des articles sur les machines tournantes, commençant par une expérience en 1885 et se terminant par une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888.[19]

Michail Doliwo-Dobrowolski, ingénieur électricien d'origine russe, invente en 1889 le premier moteur écureuil triphasé à courant synchrone, qui sera produit en série à partir de 1891.[13]

Du fait de sa facilité de fabrication, d'utilisation et d'entretien, ainsi que de sa durabilité et de son faible coût de revient, la machine synchrone est aujourd'hui largement utilisée comme moteur dans des gammes de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs millions de kilowatts.

Lorsqu'une machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de modifier sa vitesse. De plus, au début, la paire est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont été proposées pour résoudre ce dernier problème par l'utilisation de rotors à encoches profondes et de rotors à cages jumelles.

En raison des progrès de l'électronique de puissance, l'utilisation d'un onduleur à fréquence variable permet un démarrage et un fonctionnement plus pratiques de la machine avec

une vitesse variable sur une large plage. Il est ainsi utilisé pour alimenter les TGV les plus récents ainsi que les nouvelles lignes du métro parisien.

I. 4. Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone, également appelée moteur à induction, est constituée d'un stator et d'un rotor constitués de tôles en silicium-aluminium avec des encoches dans lesquelles sont placés les enroulements. Le stator est fixe ; voici les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe rotatif. Il existe deux sortes de rotors, selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou verrouillés en permanence sur eux - mêmes. Cependant, on admet que sa construction est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné à enroulements en circuit fermé. La machine asynchrone triphasée se compose d'une partie fixe (stator) et d'une partie tournante (rotor) couplées magnétiquement.

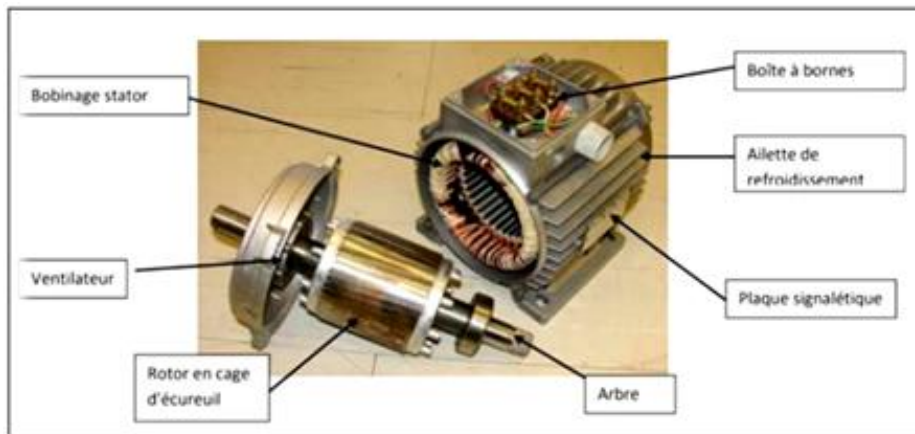


Figure I. 4: Composants d'une machine asynchrone.

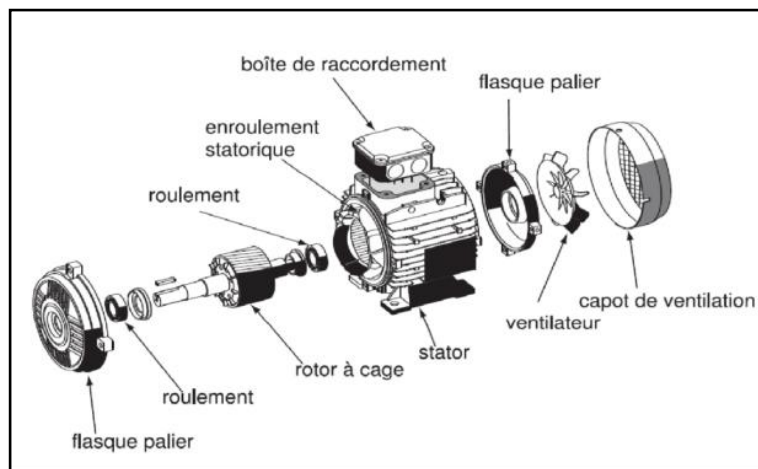


Figure I. 5: Vue détaillé d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. [14]

I. 4. 1. Stator:

Le stator, également appelé primaire, est l'élément fixe de la machine. Elle est parfaitement isolée et a régulièrement remplacé les encoches. Trois enroulements identiques (paires de pôles fictifs) se trouvent dans ces encoches, qui forment un champ tournant lorsqu'elles sont traversées par des courants alternatifs triphasés. Leurs axes sont déviés d'un angle de 120°. [34]

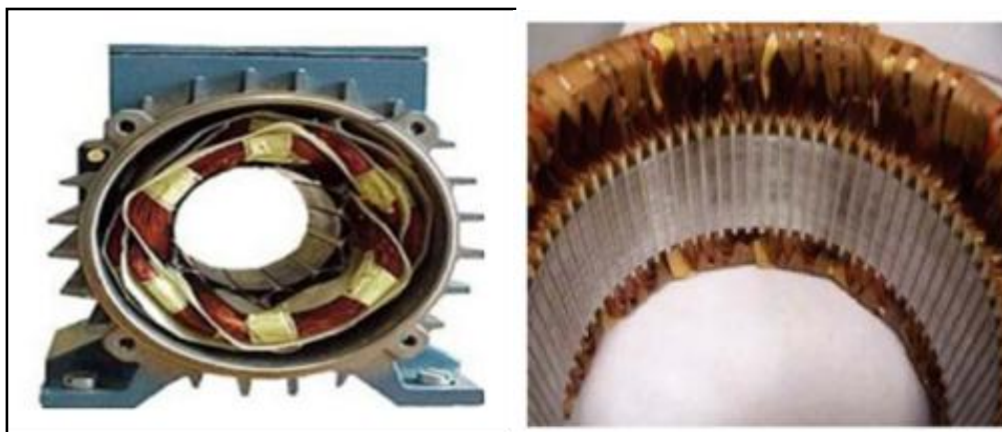


Figure I. 6: Stator d'une machine asynchrone triphasée.

I. 4. 2. Rotor:

Le circuit magnétique du rotor est constitué d'une série de tôles ferromagnétiques rainurées. Les tôles des petits moteurs sont démontées en une seule pièce et montées sur un arbre. Chaque tôle des plus gros moteurs est composée de plusieurs pièces montées sur un noyau.



Figure I. 7: Photo du rotor d'une machine asynchrone.

Il existe deux types de rotors :

- Bobiné , Cage d'écurcule.

A. Rotor à cage :

Le circuit des rotors à cage est constitué de barres conductrices uniformément réparties entre deux extrémités métalliques. Les enroulements sont en cuivre dans le cas des gros moteurs et en aluminium dans le cas des petits moteurs.

Le rotor à cage de sécurité est constitué d'une série de barres rotoriques parallèles qui sont réunies sur chacune des faces de l'induit par un anneau de forte section appelé anneau court-circuit, qui présente une faible résistance électrique.[31]



Figure I. 8: Machine asynchrone à moteur à cage.

Une topologie consiste à connecter directement au réseau une machine asynchrone avec une cage de contrôle d'erreurs. Un multiplicateur est relié à la machine, et une batterie de condensateurs assure son grossissement.

En conséquence, la vitesse de rotation ne peut être que légèrement variée, limitée par la glissière machine asynchrone maximale.

Le principal inconvénient est l'impossibilité de fonctionner à des vitesses variables, ce qui limite la quantité d'énergie pouvant être extraite du vent, d'une part et d'autre part les problèmes d'accrochage / décrochage du réseau.[1]

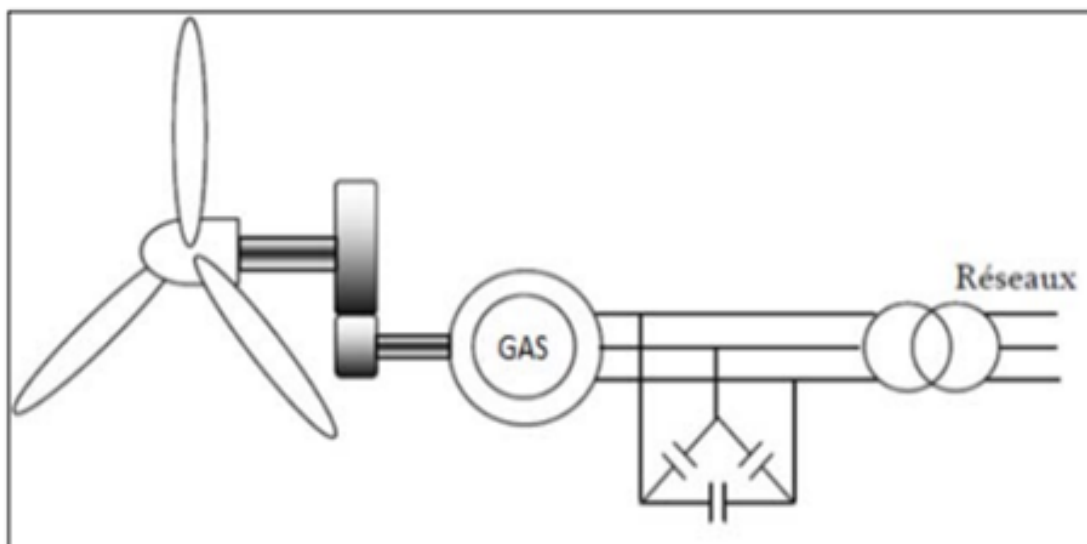


Figure I. 9: Génératrice asynchrone à cage à vitesse fixe.

Le générateur asynchrone à cage peut fonctionner à des vitesses variées grâce à l'utilisation de convertisseurs de puissance, et il peut générer de l'énergie électrique sur une large plage de vitesses de vent.

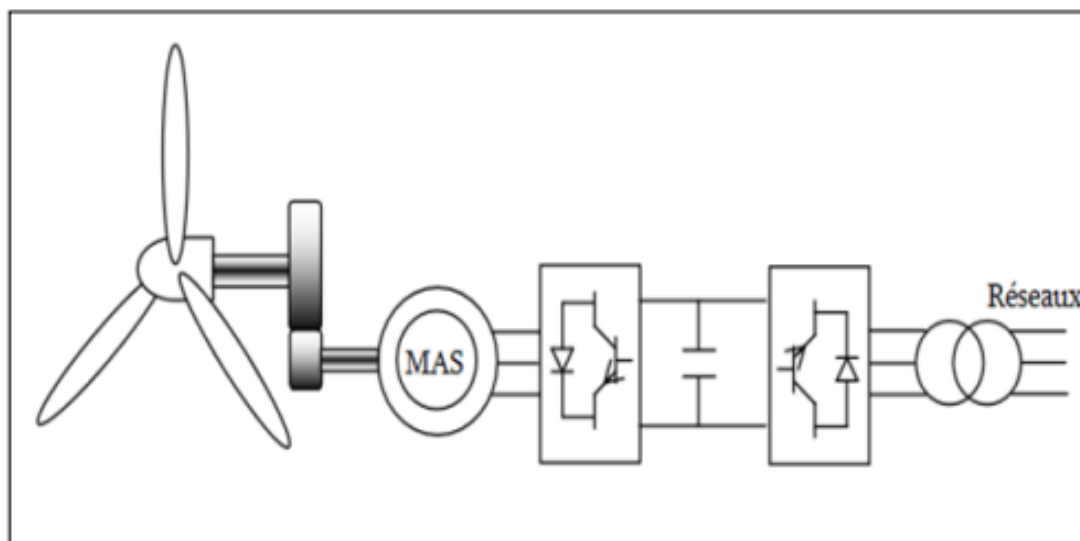


Figure I. 10: Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable.

B. Rotor à bague ou rotor bobiné:

Le rotor est constitué d'un enroulement similaire au stator, qui est toujours triphasé à étoile couplage. Les extrémités des enroulements rotorisés sont reliées à des bagues montées sur l'arbre, lesquelles sont frottées avec des balais en fibre de carbone.

Pour permettre le réglage des caractéristiques de couple/vitesse , des éléments de circuit supplémentaires peuvent être connectés au circuit tournant (résistances...).

Ce type de moteur est surtout utilisé dans les applications où le démarrage est difficile et/ou fréquent (il assure de meilleures conditions de démarrage).[38]



Figure I. 11 : Machine asynchrone à rotor bobiné.

L'inconvénient d'exiger un système de bagues et balais et un multiplicateur pour éoliennes basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné est qu'il induit des coûts de maintenance importants, notamment pour les projets offshore situés en eau salée.

Cette génératrice a des visseurs permanents ; le système de la bague et du balais a été supprimé. L'inconvénient de cette disposition est qu'elle nécessite des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale du générateur pour se connecter au réseau. Cet inconvénient est cependant un avantage en termes de contrôle éolien.[22]

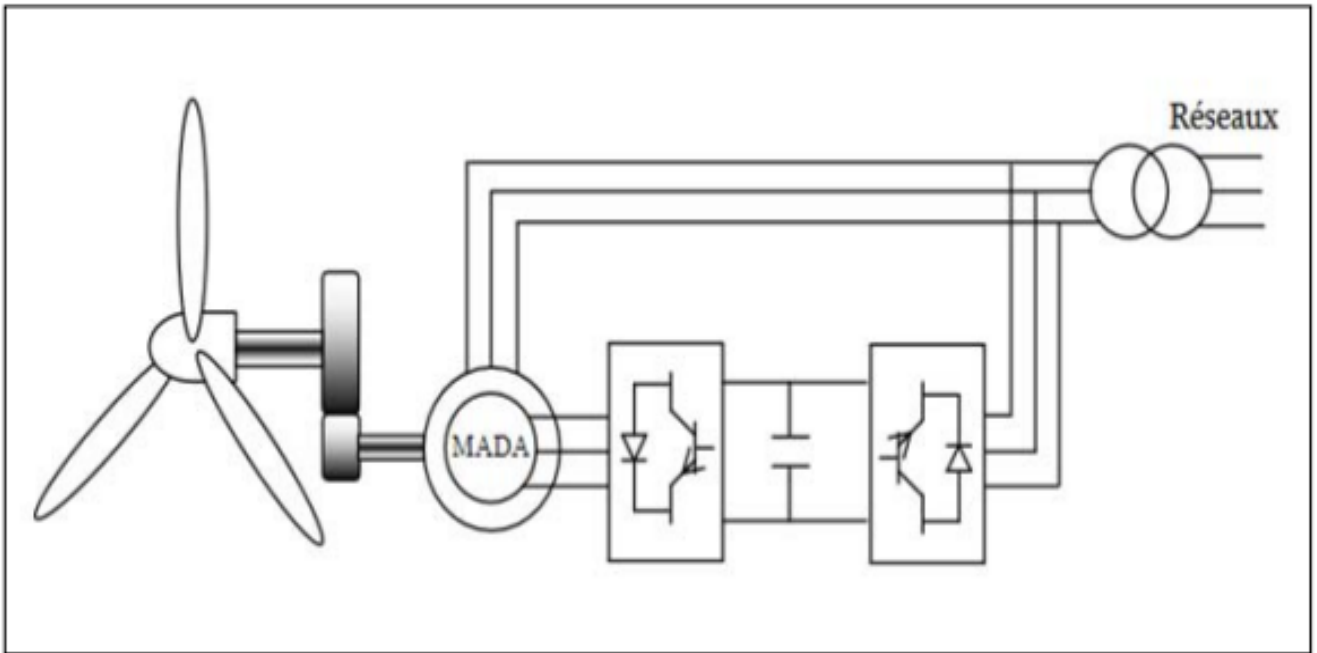


Figure I. 12 : Système éolienne connectés avec génératrice à rotor bobiné.

I. 4. 3. L'entrefer:

L'entrefer permet le mouvement du rotor par rapport au stator. Il est d'une faible épaisseur et sépare le rotor et le stator. La perméabilité magnétique élevée des matériaux ferromagnétiques par rapport à l'air permet de supposer que toute induction dans le stator est normale et donc radiale.[38]

I. 4. 4. Paliers:

Les paliers supportent et font tourner le rotor en rotation ; ils sont constitués de flacons et de roulements de billettes qui sont chauffés et insérés dans le rotor. Les tiges de serrage ou les boulons sur l'écarteur statorique servent à fixer les flacons.[31]

I. 5. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone :

Les courants statoriques génèrent un champ magnétique qui tourne à l'intérieur du stator. La fréquence de rotation de ce champ est déterminée par la fréquence des courants statiques, ce qui signifie que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation électrique ; la vitesse de rotation de ce champ est appelée vitesse de synchronisation.

En conséquence, l'enroulement du rotor est soumis à des variations de flux (dus au champ magnétique).[9] La force électromotrice induite apparaît en générant des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'une paire qui tend à déplacer le rotor pour résister à la variation de flux : la loi de Lenz.

En conséquence, le rotor commence à tourner pour tenter de suivre le champ statique.[18] Sur les moteurs asynchrones triphasés, le champ tournant est produit par trois bobinages fixes à déséquilibre géométrique de 120°, et il est parcouru par des courants alternatifs de même déséquilibre électrique ; les trois champs alternatifs qu'ils produisent se combinent pour générer une rotation d'amplitude constante dans le temps.[20]

La machine est dite asynchrone car il lui est impossible d'atteindre la même vitesse que le champ statique sans la présence d'un lecteur externe. Dans ce cas, les courants s'annulent en même temps que le couple qu'ils produisent et la machine ne sont plus entraînés.

Lorsque la différence de vitesse entre le rotor et le champ statique dépasse la vitesse de synchronisation, la machine fonctionne en génératrice alternative, mais son stator doit toujours être connecté au réseau car c'est le seul capable de créer le champ magnétique nécessaires pour faire apparaître les courants rotoriques.

Cependant, un fonctionnement autonome en tant que générateur alternatif est possible à l'aide de condensateurs connectés.

I. 6. Glissement d'une machine asynchrone :

Le glissement est une grandeur qui rend compte de la différence de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à la vitesse de rotation de son champ statique.

- La vitesse de synchronisme, c'est-à-dire la fréquence de rotation du champ statique dans la machine, est notée Ω_s .
- La fréquence de rotation de la machine est notée Ω_m .

La fréquence de synchronisme est toujours un sous-multiple entier de la fréquence de l'alimentation électrique :

- En 50 Hz c'est un sous-multiple de 3 000 tr/min, soit : 3000 ; 1500 ; 1000 ; 750, etc.
- En 60 Hz c'est un sous-multiple de 3 600 tr/min, soit : 3600 ; 1800 ; 1200 ; 900, etc.

Soit p le nombre de paires de pôles de la machine et f la fréquence de l'alimentation. On a :

$$\Omega_s = 60 f / P \quad (\text{tr/min}) \quad (\text{I. 1})$$

Le glissement correspond à la différence de vitesse entre le rotor et le champ statique , exprimée en pourcentage de la fréquence de rotation .

$$g = (\Omega_s - \Omega_m) / \Omega_s (\text{I. 2})$$

Le taux de variation est toujours faible, de l' ordre de quelques points de pourcentage : 2 % pour les plus grosses machines, 6 % à 7 % pour les petites machines triphasiques et 10 % pour les petites machines monophasiques.

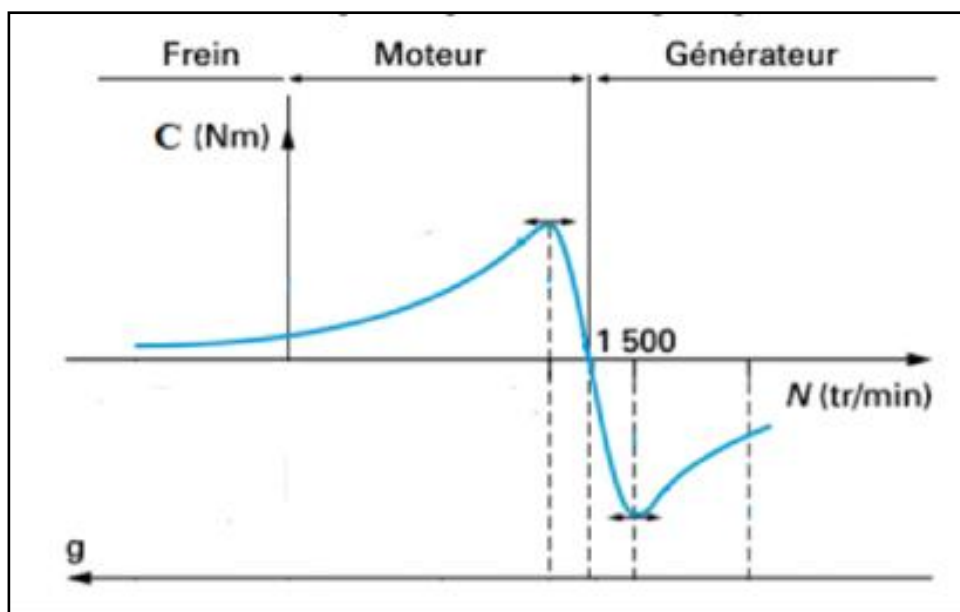


Figure I. 13 : couple de la machine asynchrone.

I.7.Auto-excitation de la machine asynchrone:

Le banc de capacités est nécessaire au fonctionnement du générateur , et les équations d' auto- excitation sont donc les contraintes au niveau des paliers du condensateur.[17]

La forme matricielle suivante est utilisée pour exprimer les équations de tension :

$$[i_{sabc}] = C \frac{d}{dt}[V_{sabc}] + \frac{1}{R}[V_{sabc}] \quad (I.3)$$

L' auto-excitation de la machine asynchrone par banc de capacité est constituée de trois condensateurs fixes reliés aux bornes du générateur soit en triangle soit en étoile , permettant une plus grande sécurité de fonctionnement du système de production d'énergie éolienne , que la charge soit monophasé ou triphasé.

Si une phase ou un condensateur tombe en panne, le système fonctionnera toujours , mais la tension chutera en raison d' une réduction de l' amplitude de la charge. [26]

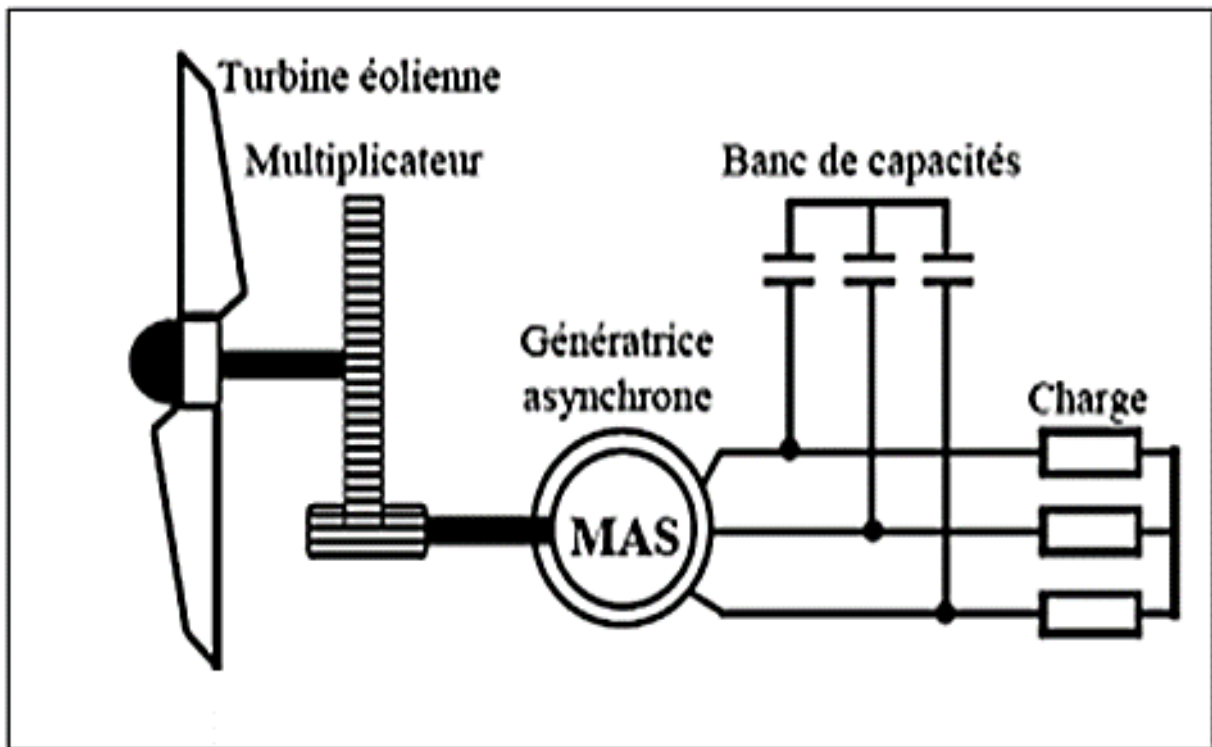


Figure I. 14 : Machine asynchrone connectée au réseau _banc de capacité_

L'utilisation d' un dispositif basé sur une machine asynchrone auto - excitée avec des capacités directement connectées à une charge permet un fonctionnement totalement autonome permettant l'alimentation d' une charge isolée ; cette batterie de condensateurs est correctement dimensionnée pour atteindre le conditions d'auto- amorçage.

La présence d' un flux magnétique résiduel dans le fer du rotor est nécessaire à l'autoamorçage.[24, 16] Le fonctionnement typique d'une génératrice asynchrone nécessite qu'elle soit entraînée au - delà de sa vitesse de synchronisation afin de fournir de l'énergie électrique.[26]

I. 8. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

I. 8. 1. Avantages :

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisée dans la puissance moyenne et élevés.
- Reliée directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Tourne à une vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- La vitesse de rotation peut variable.
- Elle est utilisée pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse. [5]

I. 8. 2. Inconvénients:

- Le couple de démarrage est très élevé par rapport au couple nominal.
- La vitesse dépend de la charge.
- La variation de vitesse nécessite un variateur.
- La structure dynamique est fortement non linéaire avec un fort couplage.[5]

I. 9. La vitesse de synchronisme :

La vitesse de synchronisation des moteurs asynchrones est déterminée par la fréquence d'alimentation et le nombre de paires de pôles p qui composent le stator :[28]

$$N_s = \frac{60 \times f}{p}$$

Avec :

N_s : Vitesse de synchronisme [tr/min]

f : Fréquence [Hz]

p : Nombre de paires de pôles.

I. 10.Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d' une machine asynchrone repose principalement sur trois principes d'induction :

A. Principe I :

Création d'un champ magnétique par un courant équilibré tel que défini par la loi de Ferraris. Lorsqu'une tension triphasique est appliquée aux bornes du stator, un courant alternatif traverse les conducteurs d' enroulement du stator , générant une force électromotrice et créant un champ magnétique qui tourne à une vitesse de ω_s/p par rapport au stator et $(\omega_s - \omega_m) / p$ par rapport à le rotor.

Ω_s : La pulsation des courants statiques est directement liée à la fréquence du réseau , qui est la source d'alimentation de la machine .

Ω_m : Est la vitesse électrique du rotor.

B. Principe II :

La force exercée sur un conducteur dans un champ magnétique, telle que définie par la loi de Laplace ; les conducteurs peuvent être trouvés dans les champs statiques et tournants.Ils sont soumis à des forces électromagnétiques qui feront tourner le rotor dans le sens indiqué sur la figure **I. 13**.

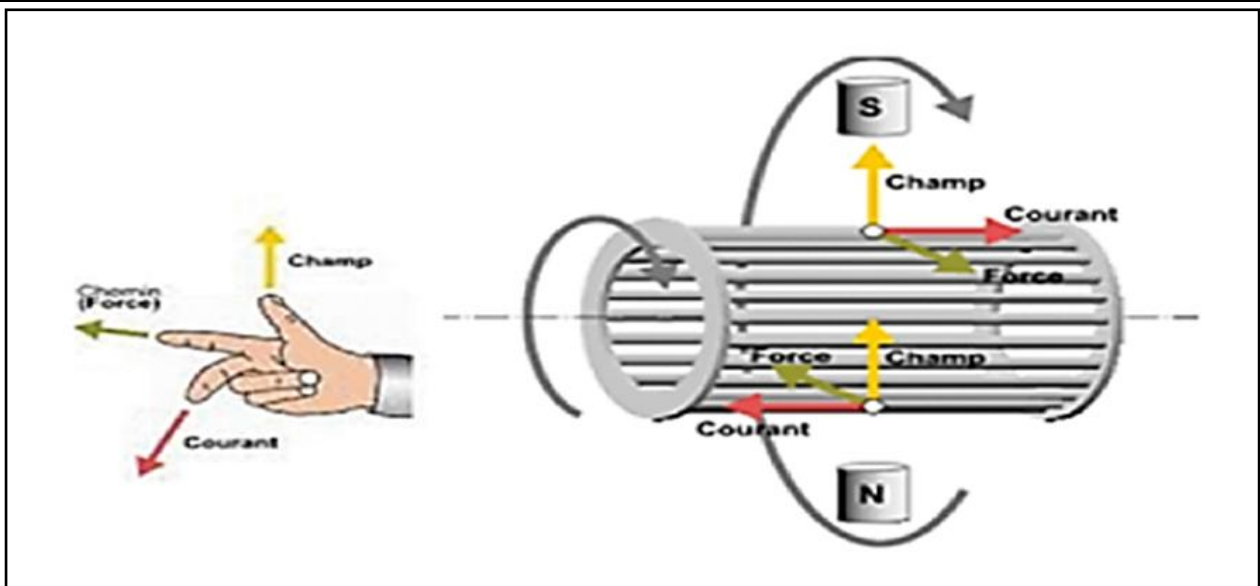


Figure I. 15 : Schéma de principe du fonctionnement de la machine asynchrone. [15]

C. Principe III :

Tension créée par le déplacement de conducteurs dans un champ magnétique (loi de Faraday), les conducteurs du rotor deviennent siège d'un système de forces électromotrices induites de pulsation $\omega_r = \omega_s - \omega_m$.

Quand ils sont coupés par le champ tournant provenant du stator. Cette fréquence varie en fonction du nombre de pôles nord et sud traversant un conducteur. Lorsque le rotor est au repos, la fréquence du réseau reste constante.

Lorsque les conducteurs du rotor sont en circuit fermé à leurs ailettes, ils sont traversés par des courants induits par pulsation ω_r . Selon la loi de Lenz, ces derniers résistent à la cause de leur création (le champ statique) et génèrent un système de forces magnétiques, résultant en un champ magnétique tournant à la vitesse ω_r/p par rapport au rotor et à la vitesse $(\omega_r + \omega_m)/p$ égale à ω_s/p par rapport au stator ce qui fait que les champs statorique et rotorique tournent à la même vitesse. [12]

I. 10. 1. Fonctionnement en moteur:

Lorsqu'un couple résistif est appliqué à l'arbre, la machine cale et le champ du stator accélère le rotor pour atteindre la vitesse de synchronisation, lui permettant d'absorber l'énergie électrique du réseau et de la convertir en énergie mécanique. Dans ce cas la machine fonctionne en moteur.

La vitesse du rotor continue d'augmenter, mais elle ne correspondra jamais à celle du champ tournant, car si le rotor tourne à la même vitesse que le champ (synchronisme), le flux ne coupera plus les conducteurs, ce qui entraînera une augmentation des contraintes et du rotor courants. Dans ces circonstances, les forces agissant sur les conducteurs les rendront inutiles. Pour générer un courant et, par conséquent, un couple suffisant pour éviter les frottements, la vitesse du rotor doit être quelque peu inférieure à celle du synchroniseur.

I. 10. 2. Fonctionnement en générateur:

Lorsqu'un couple moteur est appliqué au rotor de telle manière que la vitesse ω_r est supérieure à la vitesse ω_s , la force statique provoque sa synchronisation. La machine développera alors un couple fort et absorbera de l'énergie mécanique, qu'elle enverra au réseau sous forme d'énergie électrique. Dans ce cas, la machine agit comme un générateur asynchrone.[2]

Et elle aura besoin d'une source réactive pour créer son champ magnétique, qui peut provenir du réseau auquel elle est connectée ou d'une batterie de condensateurs connectés à ses membres.

I. 11. Utilisation de la Machine asynchrone:

En raison de son faible coût, de sa robustesse et de sa simplicité de construction, la machine asynchrone est largement utilisée dans les applications industrielles.

Avec l'arrivée de l'électronique haute puissance, le domaine de l'électronique haute puissance s'est élargi, elle contrôle maintenant une partie importante de l'industrie mondiale des transports (Métros, trains, propulsion des navires...etc), dans l'industrie (machines-outils), ainsi que dans l'électroménager, comme générateur asynchrone on la retrouve généralement dans les applications de puissance limitée, comme la microcentrale hydraulique et à proximité des petites chutes d'eau, comme on la retrouve en grande partie dans le marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à cage de sécurité pour les applications de faible puissance, mais aussi avec des machines à rotor bobiné pour des installations plus importantes.[37]

I. 12. Structures d'aérogénérateurs asynchrones autonomes:

Nous présentons deux structures d'aérogénérateurs isolantes du réseau. Une structure a un convertisseur unidirectionnel, tandis que l'autre a un condensateur fixe connecté à un onduleur de charge :

I. 12. 1. Convertisseur unidirectionnel (redresseur à diode ou mixte):

Les convertisseurs d' énergie de cette configuration sont un redresseur PD3(redresseur triphasé pont de Graëtz) et un hacheur de type survolteur/ dévolteur.Cette adaptation vise à maintenir la tension à un niveau constant aux bornes de charge, même lorsque le système fonctionne dans un environnement dynamique avec des changements de vitesse, de charge et de capacité.

La régulation de la tension de sortie à la valeur souhaitée aux bornes de charge et de charge peut être réalisée en ajustant le signal cyclique α commandant l'interrupteur du convertisseur DC-DC à la valeur appropriée.[7]

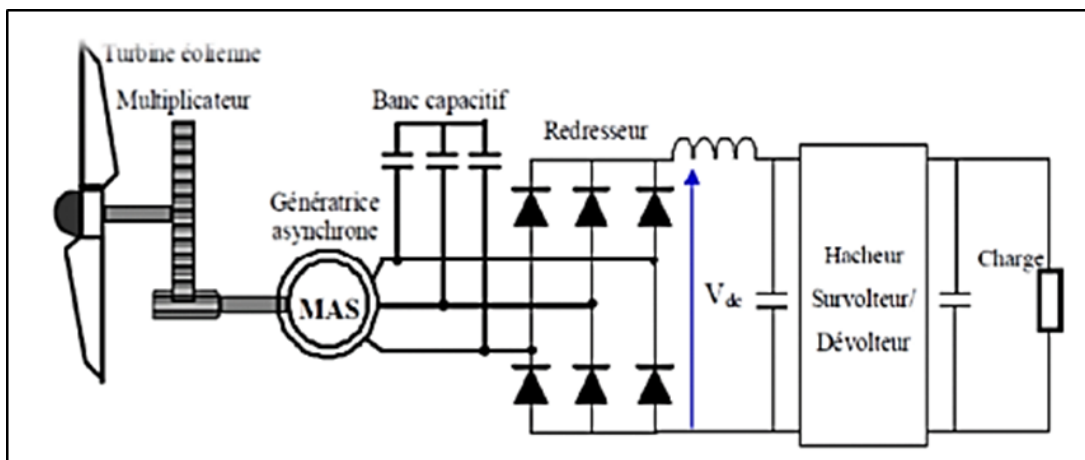


Figure I. 16 : Structure avec convertisseur à diode et hacheur. [7]

I. 12. 2. Batterie de condensateurs fixes associée à un onduleur en parallèle avec la charge:

Dans une structure constituée d' un circuit d' excitation qui comprend une batterie fixe de condensateurs connectés en permanence à la machine asynchrone, assurant un minimum d'excitation associée à un onduleur d' une capacité à son entrée, et jouant le rôle de source de tension n (VSI : Voltage Source Inverser)connectéeen parallèle au stator de la machine.

L'objectif est de maintenir une tension constante au niveau des paliers de la machine avec une amplitude et une fréquence fixes malgré les variations de la vitesse de charge.[7]

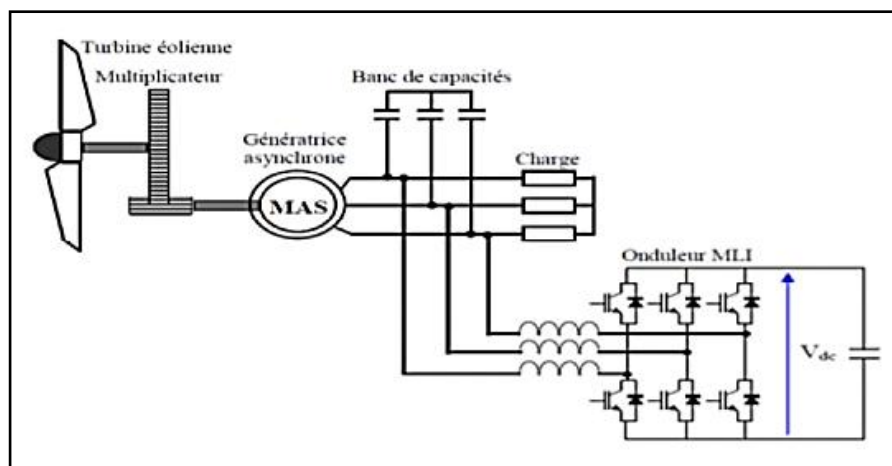


Figure I. 17 : Structure avec convertisseur MLI en parallèle avec la charge. [7]

I. 13. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève introduction de la machine asynchrone et des différentes pièces qui la composent dans le premier chapitre. Une étude sur les machines asynchrones avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement a été présentée, puis nous avons donné un aperçu des deux types de machines (rotor à cage d'écureuil et à rotor bobiné). Le principe de fonctionnement du moteur et de l'alternateur de la machine asynchrone, ainsi que ses avantages et ses inconvénients, ont ensuite été démontrés, suivis des différentes structures de l'aérogénérateur.

Après tout ce que la machine asynchrone a à offrir en termes de performances, elle constitue la majorité des machines opérationnelles ; sa robustesse, son faible coût et sa facilité d'entretien le placent à la pointe de la production d'énergie décentralisée.

L'objectif est de maintenir une tension constante au niveau des paliers de la machine avec une amplitude et une fréquence fixes malgré les variations de la vitesse de charge.

Chapitre II

*Modalisation d'une machine
asynchrone auto-excitée*

II. 1. Introduction :

Le comportement électrique et dynamique de tout système ne peut être étudié que si un modèle mathématique peut être utilisé pour le définir.[6] C'est ce qu'on appelle la modélisation ; il s'ensuit que la modélisation est une étape nécessaire dans le développement de systèmes performants.

Le système électrique considéré est la combinaison d'une machine asynchrone avec des capacités liées au stator de la machine, qui forme la génératrice asynchrone auto-excitée.[14]

A la suite de la description et de la modélisation de la machine dans une relation de référence aux phases statiques, une transformation dite de Park est utilisée ; cette transformation relie les équations statique et rotorique à des axes électriquement perpendiculaires (directe et quadrature) ; à ce modèle, le modèle de l'excitabilité est ajoutée pour compléter le système de production.[32]

II. 2. Modélisation de la machine asynchrone :

Trois encoches identiques sont logées à intervalles réguliers sur la face interne du stator ; leurs axes sont séparés par un angle électrique égal à $(2\pi/3)$.

II. 2. 1. Hypothèses Simplificatrices :

Le modèle mathématique de la machine asynchrone repose sur un certain nombre d'hypothèses, ce qui rend le modèle plus simple mais moins précis.[9-17] Considérez ce qui suit :

- La machine a une conception symétrique et une entrée en douceur.
- Le circuit magnétique de la machine n'est pas encore saturé.
- S'il est alimenté par des courants sinusoïdaux, le bobinage est réparti de manière à produire une Fmm sinusoïdale.
- Les pertes fer, l'hystérésis et le courant de Foucault sont tous négligés.
- L'effet de la température sur les résistances est négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance directe sont constants, les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements, et le flux est additif.[14-33]

II. 2. 2. Équations générales de la Machine Asynchrone :

La machine comporte six enroulements couplés magnétiquement (3 dans le stator et trois dans le rotor).

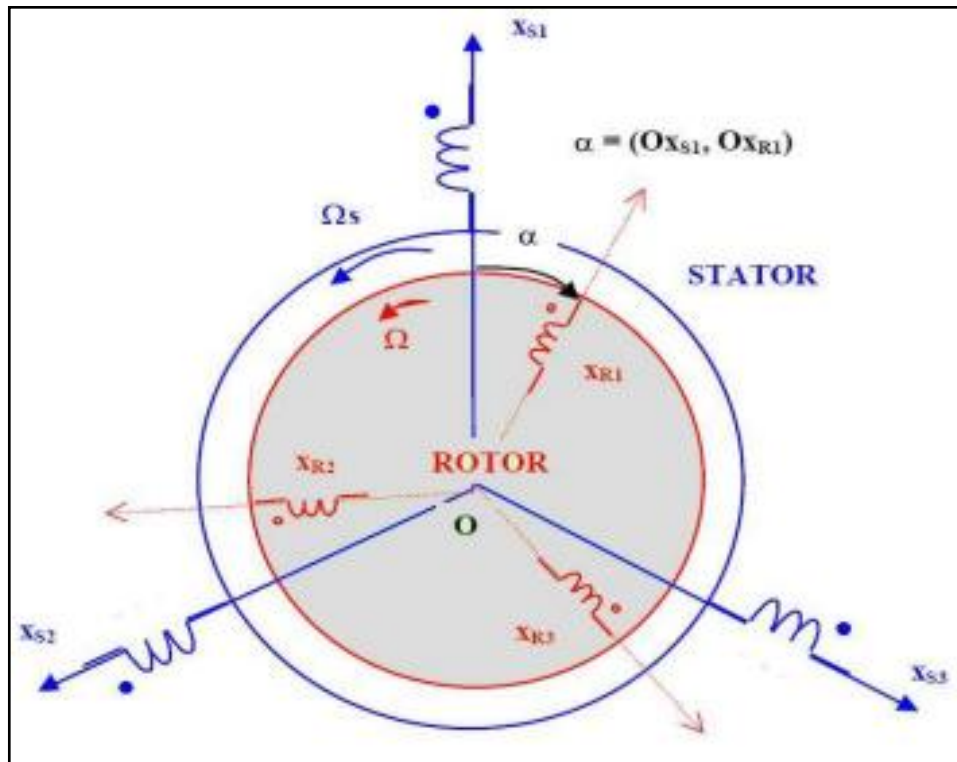


Figure II. 1 : Représentation schématique de la machine asynchrone triphasée.

Pour chacun d'eux on peut écrire une équation :

$$V=RI + \frac{d\Phi}{dt} \tag{II.1}$$

Où Φ représente le flux total à travers l'enroulement.

Pour l' ensemble des enroulements statiques et rotatifs , utilisez la notation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \\ \Phi_{s3} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \\ \Phi_{s3} \end{bmatrix} \tag{II.2}$$

II. 2. 3. Équations des flux :

Il est conçu par :

I_s : Le coefficient d'inductance propre d'un enroulement statorique

M_s : Le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

M_1, M_2 et M_3 : Les coefficients d'inductance mutuelle avec les 3 bobinages rotoriques. En utilisant le schéma ci-dessus comme guide, écrivez :

$$M_1 = \cos(\mathbf{OX}_{s1}, \mathbf{OX}_{R1}) = M \cos(\alpha)$$

$$M_2 = \cos(\mathbf{OX}_{s1}, \mathbf{OX}_{R2}) = M \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) = M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II. 3})$$

$$M_3 = \cos(\mathbf{OX}_{s1}, \mathbf{OX}_{R3}) = M \cos\left(\alpha + \frac{4\pi}{3}\right) = M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)$$

Où M désigne la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenus lorsque les bobinages en cause sont vus l'un de l'autre.

Le flux global via le bobinage statorique 1 s'exprimera comme suit :

$$\Phi_{s1} = I_s i_s + M_s (i_{s2} + i_{s3}) + M_1 i_{R1} + M_2 i_{R2} + M_3 i_{R3}$$

La matrice suivante résume les trois équations de flux statique :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \\ \Phi_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M \cos(\alpha) & M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\alpha) & M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{R1} \\ i_{R2} \\ i_{R3} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 4})$$

De même, il y aura un rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{R1} \\ \Phi_{R2} \\ \Phi_{R3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_R & M_R & M_R \\ M_R & I_R & M_R \\ M_R & M_R & I_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{R1} \\ i_{R2} \\ i_{R3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M \cos(\alpha) & M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & M \cos(\alpha) & M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right) & M \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

II. 2. 4. Mise en équation matricielle :

Prenant les résultats des paragraphes précédents (II.4) et (II.5) (équations de flux), il arrive aux conclusions évidentes suivantes :

$$[V_S] = [R_S][i_S] + \frac{d}{dt} [\Phi_S] \quad (\text{II. 6})$$

$$[0] = [R_R][i_R] + \frac{d}{dt} [\Phi_R] \quad (\text{II. 7})$$

$$\text{Avec : } [RR] = \begin{bmatrix} RR & 0 & 0 \\ 0 & RR & 0 \\ 0 & 0 & RR \end{bmatrix}, [RS] = \begin{bmatrix} RS & 0 & 0 \\ 0 & RS & 0 \\ 0 & 0 & RS \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

Il est clair que ce sont des matrices diagonales.

$$[\Phi_S] = [L_S][i_S] + [M_S R][i_R] \quad (\text{II. 9})$$

$$[\Phi_R] = [L_R][i_R] + [M_S R][i_S] \quad (\text{II. 10})$$

$$\text{Avec : } [L_S] = \begin{bmatrix} I_S & M_S & M_S \\ M_S & I_S & M_S \\ M_S & M_S & I_S \end{bmatrix}, [M_S R] = M \begin{bmatrix} M \cos(\alpha) & M \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & M \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ M \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & M \cos(\alpha) & M \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) \\ M \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & M \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & M \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

La matrice [L_S] est symétrique et l'on a une notation analogue pour [L_R]. La matrice [M_{SR}]^t est la transposée de [M_{SR}].

II. 2. 5. Utilisation de la transformation de PARK :

II. 2. 5. 1. Application de la transformation de Park sur les tensions et les courants:

Pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), un changement de repère PARK sera effectué à la fois pour le stator et le rotor, avec θ_S désignant l'angle pour le stator et θ_R désignant l'angle pour le rotor.

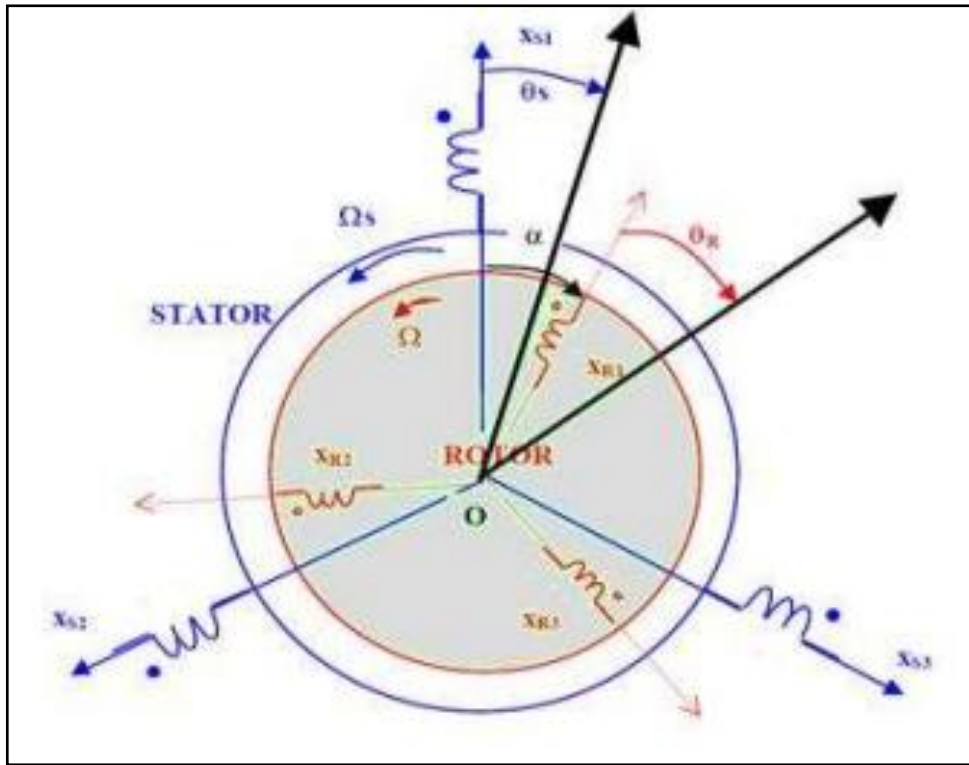


Figure II. 2 : Transformation de système triphasé à un système biphasé.

Loi des mailles:

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \tag{II. 11}$$

En utilisant la formule de changement de base, il arrive à :

$$[P1(\theta_s)][V_{sp}] = [R_s][P1(\theta_s)][i_{sp}] + \frac{d}{dt}[[P1(\theta_s)]\Phi_{sp}] \tag{II. 12}$$

$$\text{Avec : } [P1(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

En multipliant à gauche par $[P1(\theta_s)]^{-1}$:

$$[V_{sp}] = [R_s][i_{sp}] + [P1(\theta_s)]^{-1} + \left(\frac{d}{dt} [P1(\theta_s)]\right)[\Phi_{sp}] \tag{II. 13}$$

$$[V_{sp}] = [R_s][i_{sp}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sp}] + [P1(\theta_s)]^{-1} + \left(\frac{d}{dt} [P1(\theta_s)]\right)[\Phi_{sp}] \tag{II. 14}$$

C'est le dernier terme de la somme qui pose problème. On a :

$$\frac{d}{dt} [\mathbf{P1}(\theta s)] \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\theta s}{dt} \begin{bmatrix} -\sin(\theta s) & -\cos(\theta s) & 0 \\ -\sin(\theta s - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta s - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta s - \frac{4\pi}{3}) & -\cos(\theta s - \frac{4\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{s0} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 15})$$

$$\frac{d}{dt} [\mathbf{P1}(\theta s)] \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \omega s \begin{bmatrix} -\sin(\theta s) \Phi_{sd} & -\cos(\theta s) \Phi_{sd} \\ -\sin(\theta s - \frac{2\pi}{3}) \Phi_{sd} & -\cos(\theta s - \frac{2\pi}{3}) \Phi_{sd} \\ -\sin(\theta s - \frac{4\pi}{3}) \Phi_{sd} & -\cos(\theta s - \frac{4\pi}{3}) \Phi_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 16})$$

$$\text{Avec : } \omega s = \frac{d\theta s}{dt}$$

$$\begin{aligned} & [\mathbf{P1}(\theta s)]^{-1} \left(\frac{d}{dt} [\mathbf{P1}(\theta s)] \right) \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{s0} \end{bmatrix} = \\ & = \frac{2}{3} \omega s \begin{bmatrix} \cos \theta s & \cos(\theta s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta s & -\sin(\theta s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta s - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\theta s) \Phi_{sd} & -\cos(\theta s) \Phi_{sd} \\ -\sin(\theta s - \frac{2\pi}{3}) \Phi_{sd} & -\cos(\theta s - \frac{2\pi}{3}) \Phi_{sd} \\ -\sin(\theta s - \frac{4\pi}{3}) \Phi_{sd} & -\cos(\theta s - \frac{4\pi}{3}) \Phi_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 17}) \end{aligned}$$

Il est alors simple de démontrer en faisant une multiplication matricielle que :

$$[\mathbf{P1}(\theta s)]^{-1} \left(\frac{d}{dt} [\mathbf{P1}(\theta s)] \right) [\Phi_{sp}] = \omega s \begin{bmatrix} -\Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 18})$$

$$\text{D'où le résultat final : } [\mathbf{Vsp}] = [\mathbf{Rs}][\mathbf{isp}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sp}] + \omega s \begin{bmatrix} -\Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 19})$$

Tout en développant des composants PARK pour le stator.

$$\begin{cases} \mathbf{Vs}d = \mathbf{Rs} \mathbf{isd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega s \Phi_{sq} \\ \mathbf{Vs}q = \mathbf{Rs} \mathbf{is}d + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} - \omega s \Phi_{sd} \\ \mathbf{Vs}0 = \mathbf{Rs} \mathbf{is}0 + \frac{d}{dt} \Phi_{s0} \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

On notera le couplage de VSd avec ΦSq et VSq avec ΦSd. [27]

Les mêmes équations s'appliqueront au niveau du rotor en changeant l'indice de "S" à "R" et en annulant les tensions car le rotor est en circuit fermé.

V_{s0} est considérée comme nulle puisque le rotor est tordu en triangle et l' neutre n'est plus accessible.

$$\begin{cases} VRd = R_s iRd + \frac{d}{dt} \Phi Rd - \omega_R \Phi Rq \\ VRq = R_s iRq + \frac{d}{dt} \Phi Rq - \omega_R \Phi Rd \\ VR0 = R_s iR0 + \frac{d}{dt} \Phi R0 \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

Avec : $\omega_R = \frac{d\alpha}{dt}$

Le même pour V_{R0} qui est considéré nul.

II. 2. 5. 2. Application de la transformation de Park sur les Flux:

$$[\Phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{R_s}][i_R] \quad (\text{II. 22})$$

$$[P1(\theta_s)][\Phi_{sp}] = [L_s][P1(\theta_s)][i_{sp}] + [M_{sR}][P1(\theta_s)][i_{Rp}] \quad (\text{II. 23})$$

$$[\Phi_{sp}] = [P1(\theta_s)]^{-1} [L_s][P1(\theta_s)][i_{sp}] + [P1(\theta_s)]^{-1} [M_{sR}][P1(\theta_s)][i_{Rp}] \quad (\text{II. 24})$$

On remarquera ici l'angle θ_s pour le stator et l'angle θ_R pour le rotor

En raison de la formule de changement de base des matrices, il n'y a aucun problème avec la matrice $[P1(\theta_s)]^{-1}[L_s][P1(\theta_s)]$

$$\text{Soit : } [L_s] = \begin{bmatrix} I_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & I_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & I_s - M_s \end{bmatrix} \quad (\text{II. 25})$$

$[P1(\theta_s)]^{-1}[M_{R_s}][P1(\theta_s)]$ est plus difficile à obtenir du fait de la présence de deux angles, θ_s pour le stator et θ_R pour le rotor.

Le calcul est simplifié par la prise en compte des axes directs rotor et stator.

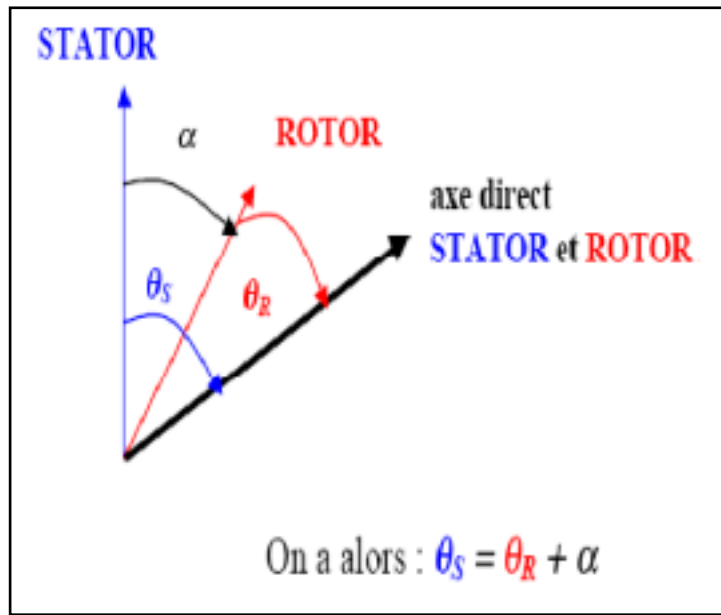


Figure II. 3 : Coïncidence des axes directs de rotor et de stator.

$$[MR_S][P1(\theta_S)] =$$

$$M \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\alpha - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_R) & -\sin(\theta_R) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_R - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_R - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_R - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

(II. 26)

$$[MR_S][P1(\theta_S)] = \sqrt{\frac{2}{3}} M \begin{bmatrix} \cos(\theta_S) & -\sin(\theta_S) & 0 \\ \cos(\theta_S - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_S - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ \cos(\theta_S - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_S - \frac{4\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix}$$

(II. 27)

$$[P1(\theta_S)]^{-1}[MR_S][P1(\theta_S)] = \frac{2}{3} M \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(II. 28)

Où on voit qu'on a aussi une matrice diagonale, ce qui justifie l'importance du PARK transformé. En prenant les notations $L_s = I_s - M_s$ et $M_c = \frac{2}{3}M$, et en développant chaque ligne, on obtient les composantes PARK du flux statique :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_c i_{Rq} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_c i_{Rd} \\ \Phi_{s0} = (I_s - 2M_s) i_{s0} \end{cases} \quad (II. 29)$$

Avec : $\Phi_{s0} = 0$;

Cette fois, l'absence de couplage entre les axes d et q de la transformation est notable.[28]

Les mêmes équations s'appliqueront au rotor si l'indice « S » est substitué à l'indice « R ».

$$\begin{cases} \Phi R d = LR i R d + M c i R q \\ \Phi R q = LR i R d + M c i R q \\ \Phi R 0 = (IR - 2MR) i s 0 \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

Avec : $\Phi R 0 = 0$;

II. 2. 6. Expression du couple :

Parce que la translation PARK orthonormée préserve la puissance instantanée. [9]

$$P_E = [V_s]^t [i_s] = V_{s1} i_{s1} + V_{s2} i_{s2} + V_{s3} i_{s3} = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \quad (\text{II. 31})$$

En gardant à l'esprit que le terme homopolaire sera vidé de son sens.

Faisons intervenir les lois de la poste

$$P_E = (R_s + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq}) i_{sd} + (R_s + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd}) i_{sq}$$

$$P_E = (R_s i_{sd}^2 + R_s i_{sq}^2) + (\frac{d\Phi_{sd}}{dt} i_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} i_{sq}) + \omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{II. 32})$$

Le premier terme entre les honneurs est facilement identifié comme une perte en joules. Le deuxième mot fait référence à la puissance électromagnétique stockée dans le champ. Reste donc le troisième élément : ce terme ne peut représenter que la puissance électrique convertie en puissance mécanique car notre modèle ignore les pertes parasites.[29]

Ce pouvoir peut prendre les formes suivantes :

$$P_{mec} = C_{em} \Omega_s = \omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{II. 33})$$

$$C_{em} = \frac{\omega_s}{\Omega_s} (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) = P (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{II. 34})$$

II. 2. 7. Expression du couple :

Reprenons les équations de système (II. 20) et (II. 21) avec $V_{rq} = 0, V_{rd} = 0$ (rotor en CC)

$$\begin{cases} Vsd = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ Vsq = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} - \omega_s \Phi_{sd} \\ 0 = RR i_{Rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{Rd} - \omega R \Phi_{Rq} \\ 0 = RR i_{Rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{Rq} - \omega R \Phi_{Rd} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

Soit : $(i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq})$ le vecteur d'état choisit:

En remplaçant (II. 28) et (II. 29) dans (II. 35), on obtient :

$$\begin{cases} Vsd = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sd} + M_c i_{Rd}) - \omega_s (L_s i_{sq} + M_c i_{Rq}) \\ Vsq = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sq} + M_c i_{Rq}) - \omega_s (L_s i_{sd} + M_c i_{Rd}) \\ 0 = RR i_{Rd} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sd} + M_c i_{Rd}) - \omega_s (L_s i_{sq} + M_c i_{Rq}) \\ 0 = RR i_{Rq} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sq} + M_c i_{Rq}) - \omega_s (L_s i_{sd} + M_c i_{Rd}) \end{cases} \quad (\text{II. 36})$$

Après avoir arrangé les équations, allez à :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{1}{T_{s\sigma}} i_{sd} + \left(\omega R + \frac{1}{\sigma} \omega \right) i_{sq} + \frac{M_c}{L_s T_R \sigma} i_{Rd} + \frac{M_c}{L_s \sigma} \omega i_{Rq} + \frac{1}{L_s \sigma} Vsd \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\left(\omega R + \frac{1}{\sigma} \omega \right) i_{sd} - \frac{1}{T_{s\sigma}} i_{sq} - \frac{M_c}{L_s \sigma} \omega i_{Rd} + \frac{M_c}{L_s T_R \sigma} i_{Rq} + \frac{1}{L_s \sigma} Vsq \\ 0 = \frac{M_c}{L_R T_{s\sigma}} i_{sd} - \frac{M_c}{L_R \sigma} \omega i_{sq} - \frac{1}{T_{R\sigma}} i_{Rd} + \left(\omega R + \frac{M_c^2}{L_s L_R \sigma} \omega \right) i_{Rq} - \frac{M_c}{L_s L_R \sigma} Vsd \\ 0 = \frac{M_c}{L_R \sigma} \omega i_{sd} - \frac{M_c}{L_R T_{s\sigma}} i_{sq} + \left(\omega R + \frac{M_c^2}{L_s L_R \sigma} \omega \right) i_{Rd} - \frac{1}{T_{R\sigma}} i_{Rq} - \frac{M_c}{L_s L_R \sigma} Vsq \end{cases} \quad (\text{II. 37})$$

Avec :

$\sigma = \left(1 - \frac{M_c^2}{L_s L_R} \right)$: Facteur de dispersion.

$T_s = \frac{L_s}{R_s}$: Constante de temps statorique.

$T_R = \frac{L_R}{R_R}$: Constante de temps rotorique.

II. 3. Modélisation de capacité d'excitation :

Le modèle décrivant le fonctionnement du générateur est obtenu en substituant les équations d'auto-excitation aux équations mécaniques.

La présence d'un champ résiduel est nécessaire à l'apparition de tension aux bornes des enroulements statoriques du générateur. Cette tension d'amplitude assez faible doit être portée à sa valeur nominale en fournissant au générateur une puissance réactive suffisante pour l'aimantation.[7]

Le dispositif qui assure l'auto-excitation de la génératrice asynchrone est une batterie de condensateurs montés sur les paliers du stator. Ainsi, en plus des équations d'état du modèle linéaire (I.37), les équations liées au mode d'auto-excitation doivent être ajoutées. Ces équations d'auto-excitation correspondent aux équations de tension de ces condensateurs.

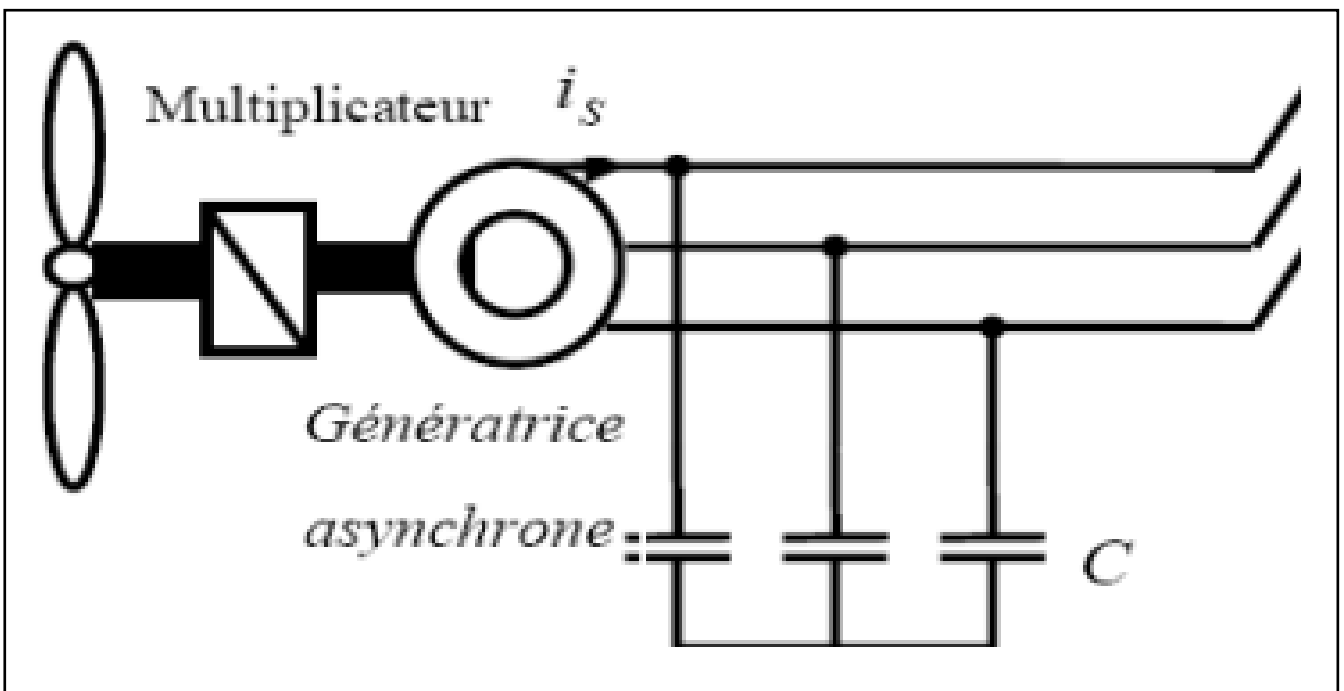


Figure II. 4 : Chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone auto-amorcée.

L' équation du condensateur est ajoutée au modèle de la machine.

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{1}{C} \int i_{as} dt \\ V_{bs} = \frac{1}{C} \int i_{bs} dt \\ V_{cs} = \frac{1}{C} \int i_{cs} dt \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

Il est nécessaire de sélectionner des valeurs de capacité de banque bien déterminées pour qu'il y ait amorçage.

II. 4.Simulation du générateur asynchrone en régime linéaire :

Dans l'analyse des régimes transitoires (démarrage, impact de charge...). Dans la grande majorité des cas, le modèle de machine linéaire asynchrone précédemment développé est suffisant pour obtenir de bons résultats. Étant donné que ce modèle utilise une inductance magnétique constante L_m , cela implique que le matériau magnétique utilisé dans la conception de la machine est linéaire. De ce fait, ce modèle n'est pas réaliste et le bon fonctionnement du générateur dépend de la prise en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine.[37]

De ce fait, ce modèle n'est pas réaliste et le bon fonctionnement du générateur dépend de la prise en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine. Lorsqu'une machine est déclenchée par un dispositif extérieur, la présence d'un champ résiduel dans le circuit magnétique de la machine crée un couple électromagnétique, qui génère une force électromotrice sur les enroulements statiques. La création d'un courant réactif en connectant des capacités sur les phases du stator augmente le champ magnétique de la machine et, par conséquent, les forces électromotrices. Cette réaction cyclique est ce qui permet à la machine de maintenir un état constant dans la zone saturée.[37]

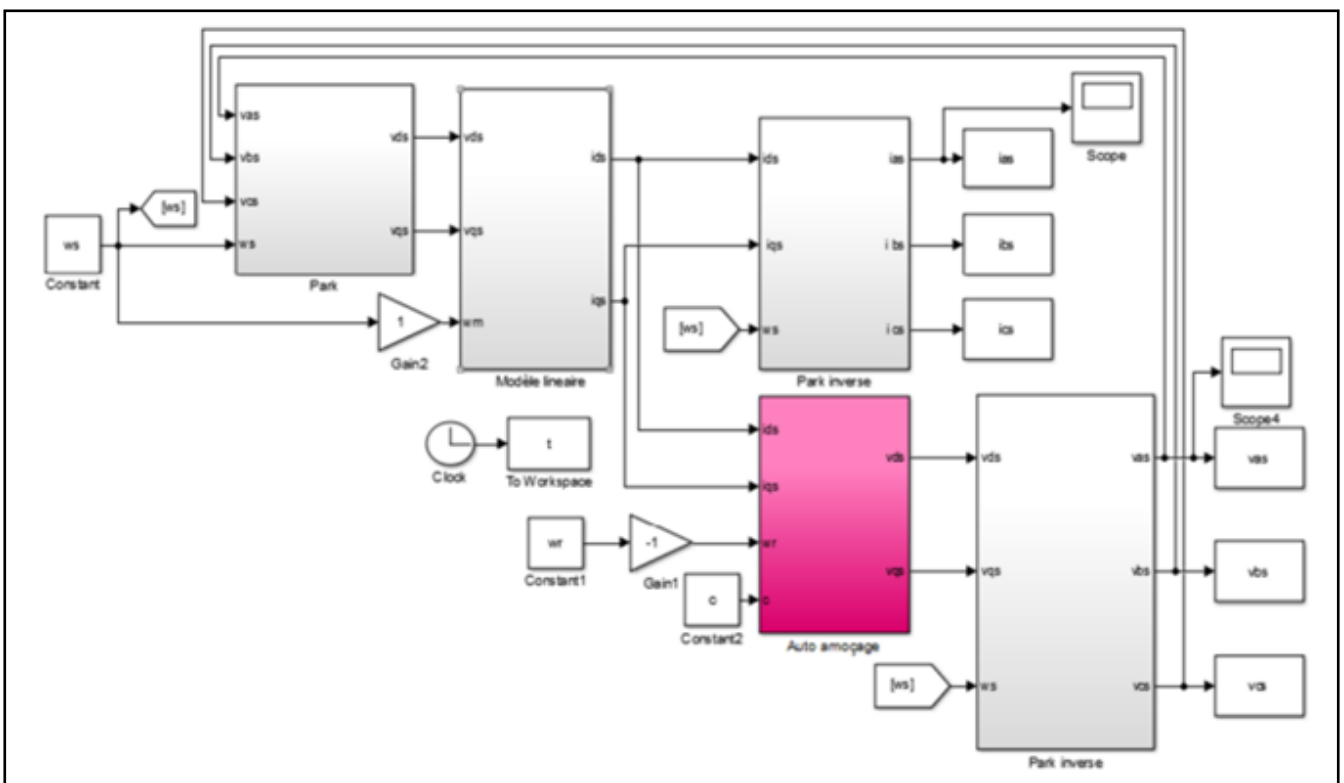


Figure II. 5 : Schéma bloc de simulation du générateur asynchrone en régime linéaire.

II. 5.Simulation de l'auto-amorçage du générateur asynchrone sous hypothèse de linéarité :

Ces résultats ont été obtenus en ignorant le phénomène de saturation du matériau magnétique ; Les figures II. 7 et II. 8 montrent l' évolution des courants et des tensions statiques :

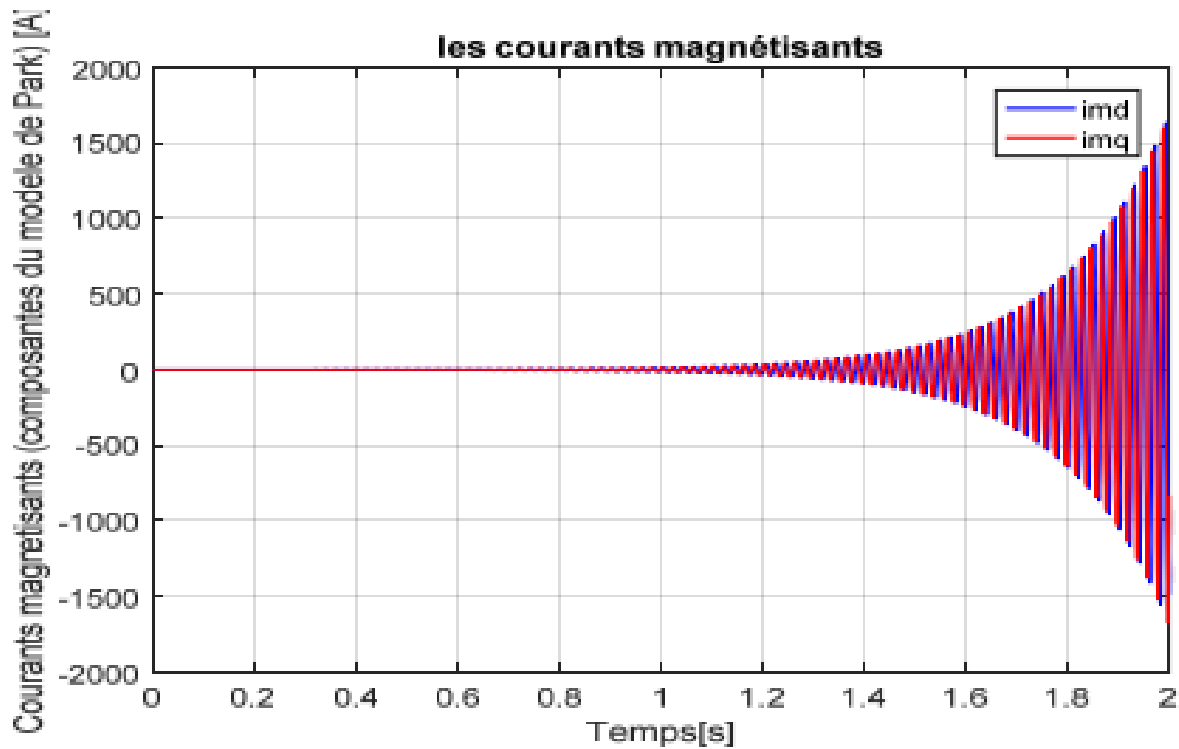


Figure II. 6 : Evolution des courants magnétisants sous hypothèse de linéarité.

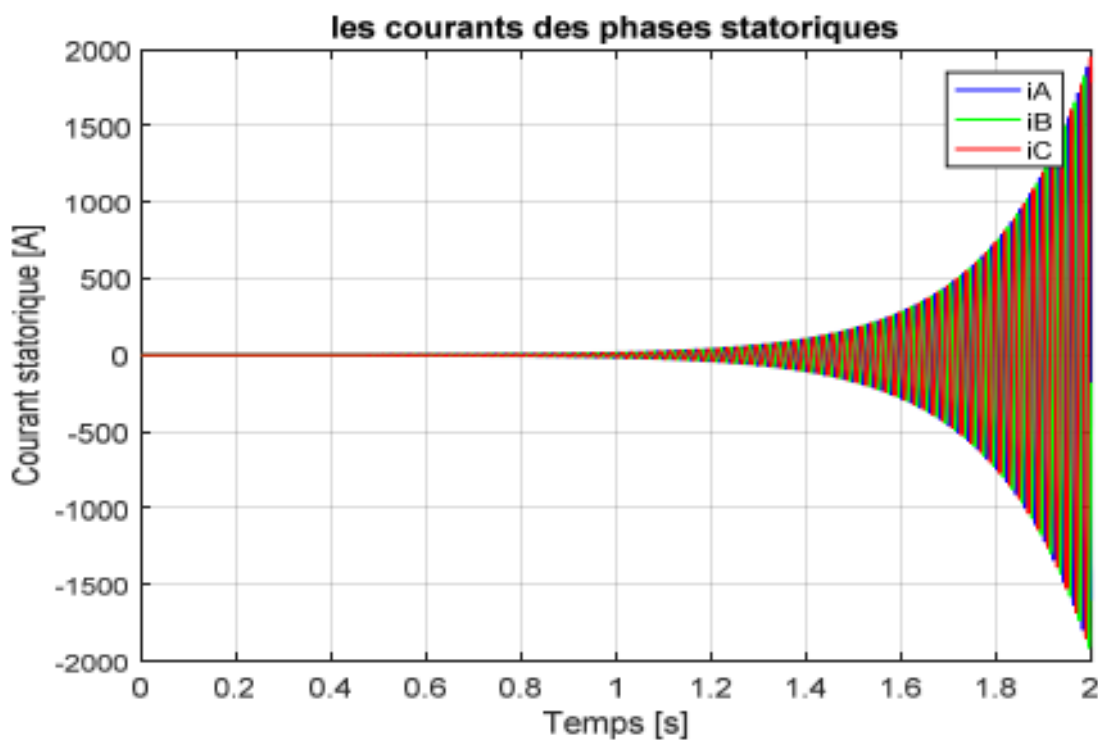


Figure II. 7 : Evolution des courants statoriques sous l'hypothèse de linéarité.

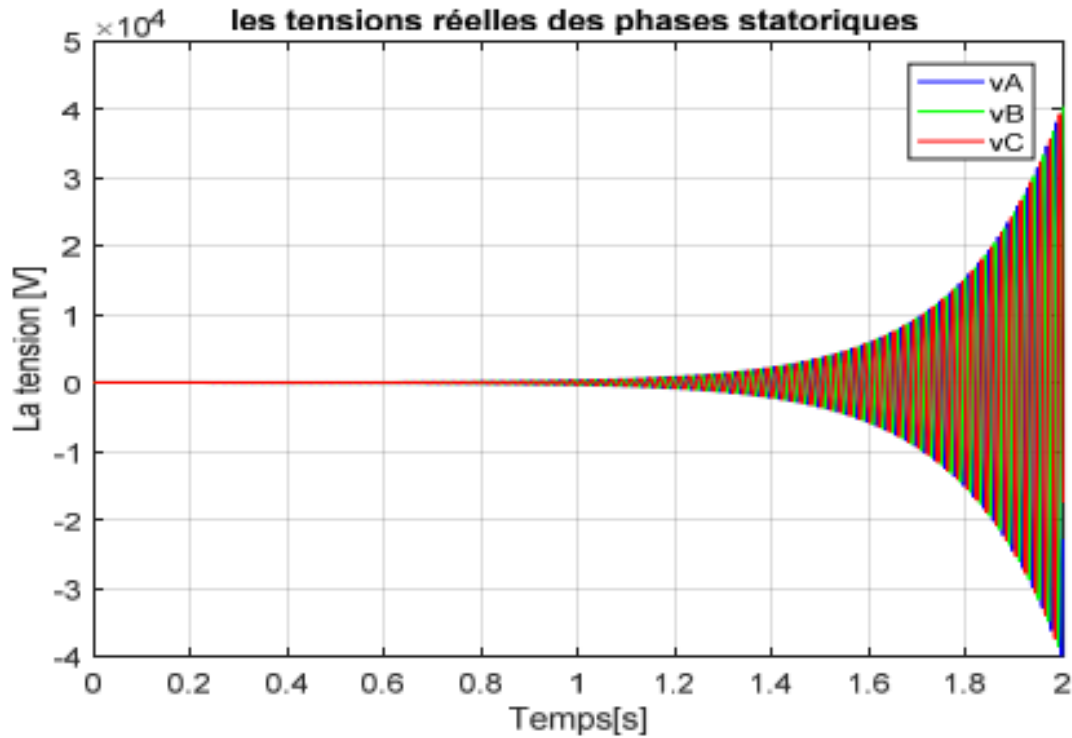


Figure II. 8 : Evolution des tensions statoriques sous l'hypothèse de linéarité.

La simulation du fonctionnement d'une génératrice asynchrone auto-amorçante sur la base d'un modèle linéaire donne des valeurs de tension et de courant statique extrêmement élevées. Après le début de l' autoamorçage figure II. 8, la tension statique a atteint plusieurs milliers de volts. Même constat pour le courant, il atteint 2000 A au bout de 2s figure II. 7.

Ces résultats sont dus au fait d'avoir négligé la saturation. En effet, lorsque la caractéristique d'aimantation est linéaire (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de coude de saturation), le point de fonctionnement ne peut être atteint.

L' auto amorçage est donc envisageable, mais la tension statique monte à des niveaux théoriquement infinis , ce qui fait que le courant atteint rapidement des valeurs inadmissibles .niveaux. Ce ne sont que des résultats théoriques ; la contrainte au niveau des paliers de la machine est en effet limitée par le phénomène de non-linéarité du circuit magnétique dont il faut tenir compte dans des conditions particulières de fonctionnement.

II. 6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle mathématique de la machine asynchrone en transférant les équations de tension exprimées en axe réel vers un système d'équations différentielles en termes de flux en quadrature. Pour ce faire, nous avons utilisé la transformation triphasé-biphasé, qui permet de rendre constants les coefficients dépendant du temps.

Lors de cette étude, nous avons négligé l'effet de la saturation du circuit magnétique. Pour le fonctionnement d'un générateur autonome, le modèle développé sous cette hypothèse produit des résultats fictifs qui ne reflètent aucune réalité physique ; cependant, ce n'est pas le cas pour la simulation de fonctionnement du moteur, où le développement d'un modèle actuel produit des résultats utilisables .résultats.

L'écart des caractéristiques issues de la simulation est justifié par le fait que la caractéristique d'aimantation manque de saturation et ne peut donc pas croiser la caractéristique externe du condensateur. La raison de la disparité des caractéristiques obtenues à partir du modèle linéaire est que le phénomène de saturation magnétique a été négligé alors que ce phénomène est nécessaire au fonctionnement de la génératrice asynchrone. L'hypothèse de linéarité du circuit magnétique doit être rejetée.

Chapitre III

*Fonctionnement Autonome de la
Génératrice Asynchrone*

III. 1. Introduction :

En l'absence de réseau-pilote, il est possible d'auto-exciter la génératrice asynchrone à l'aide d'un condensateur, mais l'amplification et la protection contre les dépassements de résonance nécessitent une étude d'installation minutieuse.

Ce chapitre examine un système autonome de production d'énergie, qui est une machine synchrone auto-excitée alimentée par un banc de capacités.

En premier lieu, les paramètres qui permettent au générateur de dormir sur le sol et de maintenir sa dette en règle sont déterminés.

Afin d'analyser les performances du générateur, un modèle global d'association machine asynchrone + capacités d'auto-excitation + charge a été établi. Des simulations sont ensuite effectuées dans une variété de configurations de charge et de déséquilibre.

III. 2. Auto-amorçage de la génératrice asynchrone :

Avant d'analyser les performances opérationnelles du générateur asynchrone, il faut d'abord déterminer les critères qui permettent au générateur de s'auto-amortir.

III. 2. 1. Modélisation de la MAS en régime permanent :

Une machine asynchrone peut fonctionner en mode isolé du réseau (autonome) si :

- Il y a présence d'un rémanent dans le fer du rotor.
- Un système qui peut fournir la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la génératrice asynchrone. Il peut s'agir d'une batterie de condensateurs correctement dimensionnée pour atteindre et maintenir les conditions d'auto-amorçage, ou il peut s'agir du réseau lui-même dans un état synchronisé.[8]

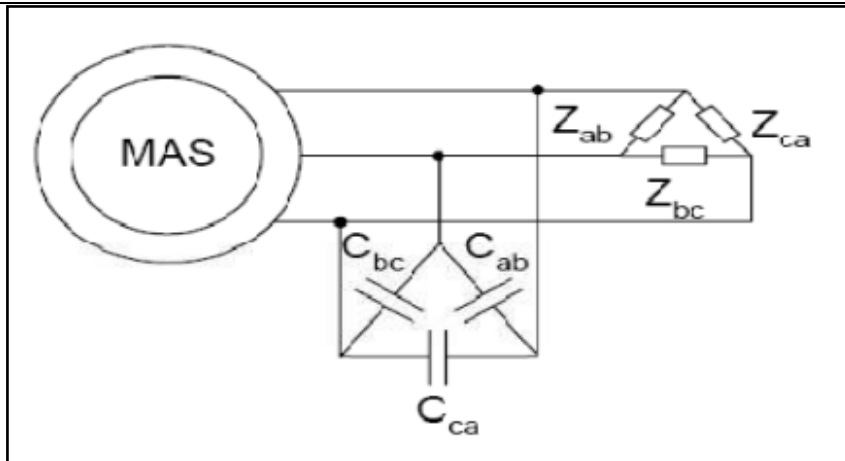


Figure III. 1 : Génératrice asynchrone auto-excité.

III. 2. 1. 1. Schéma équivalent de la machine asynchrone en régime permanent:

La modélisation persistante du générateur asynchrone est utilisée pour déterminer les circonstances d’amorçage. Considérez le schéma suivant du MAS.

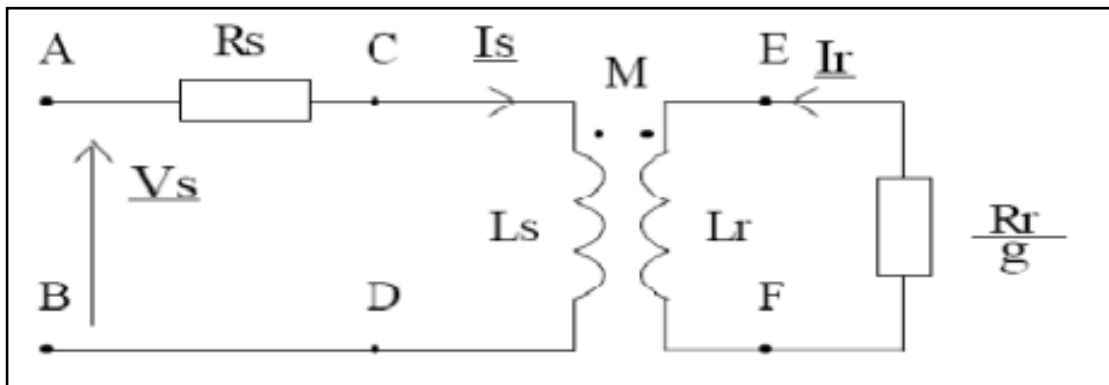


Figure III. 2 : Schéma équivalent de la MAS avec circuits couplés.

$$\begin{cases} \tilde{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\Phi_s}{dt} \\ 0 = \frac{R_r}{g} \bar{I}_r + \frac{d\Phi_r}{dt} \\ \Phi_s = L_{cs} \bar{I}_s + M_c \bar{I}_r \\ \Phi_r = L_{cr} \bar{I}_r + M_c \bar{I}_s \end{cases} \quad (III. 1)$$

$$\Phi_r = M_c(\bar{I}_s + m \bar{I}_r) = M_c \bar{I}_\mu$$

$m = \frac{L_{cr}}{M_c}$: Rapport de transformateur à stator ouvert

$m \bar{I}_r$: Courant rotorique ramené

On peut tirer : $\bar{I}_r = \frac{\Phi_r}{L_{cr}} - \frac{M_c}{L_{cr}} \bar{I}_s$

$$D'où : \Phi_s = \sigma L_{cs} \bar{I}_s + \frac{M_c}{L_{cr}} \Phi_r \quad (\text{III. 2})$$

En remplaçant (III. 2) dans (III.1), on trouve:

$$\bar{v}_s = R_s \bar{I}_s + \sigma L_{cs} \frac{d\bar{I}_s}{dt} + \frac{M_c}{L_{cr}} \frac{d\bar{\Phi}_r}{dt} = (R_s + j\sigma L_{cs} \omega_s) \bar{I}_s + j\omega_s \frac{M_c^2}{L_{cr}} \bar{I}_\mu \quad (\text{III. 3})$$

$$0 = \frac{R_r}{g} \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Phi}_r}{dt} = -\frac{R'_r L_{cr}}{g M_c} \bar{I}'_r + j\omega_s M_c \bar{I}_\mu$$

$$\frac{R'_r}{g} \bar{I}'_r = j\omega_s (1 - \sigma) L_{cs} \bar{I}_\mu \quad (\text{III. 4})$$

Finalement:

$$\begin{cases} \bar{v}_s = (R_s + j\sigma L_{cs} \omega_s) \bar{I}_s + j\omega_s \frac{M_c^2}{L_{cr}} \bar{I}_\mu \\ \frac{R'_r}{g} \bar{I}'_r = j\omega_s (1 - \sigma) L_{cs} \bar{I}_\mu \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

Dans le régime permanent : $\frac{d}{dt} = j\omega_s$

Posons:

$$\omega_g = g \omega_s \quad : \text{vitesse de glissement.} \quad (\text{III. 6})$$

$$\sigma = 1 - \frac{M_c^2}{L_{cr} L_{cs}} \quad : \text{Coefficient de dispersion} \quad (\text{III. 7})$$

$$R_r = R_r \left(\frac{M_c}{L_{cr}} \right)^2 \quad : \text{Résistance du rotor ramenée au stator}$$

III. 2. 1. 2. Schéma ramené au stator avec inductance de fuites localisées au stator:

À partir du système (III. 5), la machine asynchrone à cage peut être modélisée à l'aide d'un schéma d'équivalence basé sur un raménagement de phase à un enroulement statorique, avec une inductance de flux localisée. [3]

$$\begin{cases} \bar{v}_s = (R_s + j\sigma L_{cs}\omega_s)\bar{i}_s + j\omega_s \frac{M_c^2}{L_{cr}}\bar{i}_\mu \\ \frac{R_r}{g}\bar{i}_r = j\omega_s(1-\sigma)L_{cs}\bar{i}_\mu \end{cases} \quad (III.8)$$

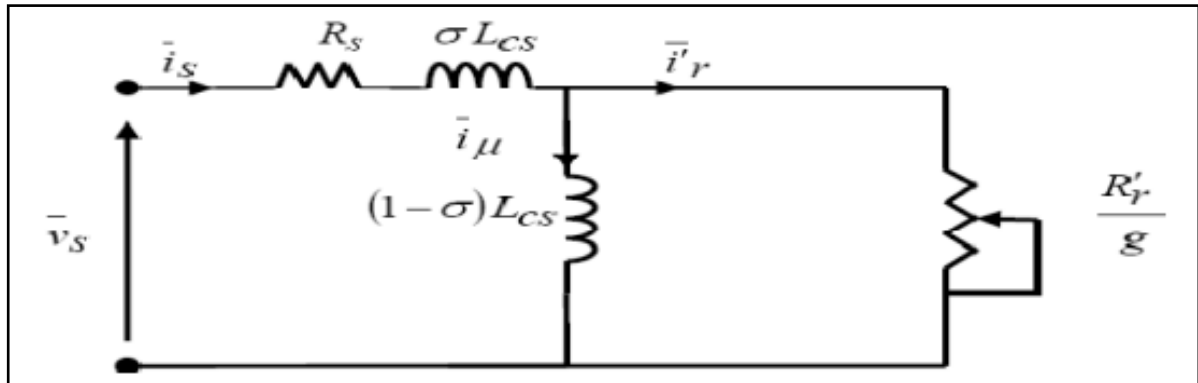


Figure III. 3 : Schéma équivalent ramené au stator avec les fuites magnétiques totalisées au stator.

III. 2. 2. Étude analytique de l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone:

L' autoamorçage d' auto-excitation est le passage d' un état d' équilibre instable (le début de l' amorçage) à un état d' équilibre stable (point de fonctionnement final)[13] défini par des critères qui varient selon que le générateur est allumé ou éteint.

Dans le premier cas, un générateur asynchrone en mode autonome peut Alimenter une charge résistive pure ou une charge R, L.

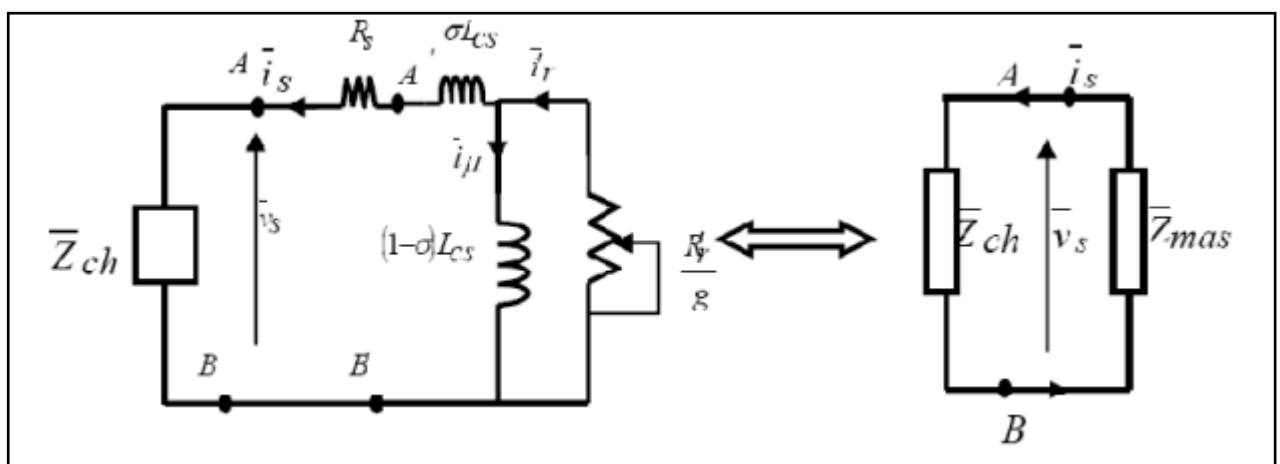


Figure III. 4 : Schéma équivalent pour l'auto-amorçage à vide.

Il convient d'écrire, d'après la loi des mailles (Kirchhoff), que :

$$(\bar{Z}_{mas} + \bar{Z}_{ch})\bar{i}_s = 0 \quad (\text{III.9})$$

Donc :

$$\bar{Z}_{mas} + \bar{Z}_{ch} = 0 \quad (\text{III.10})$$

Ou bien en termes de puissance:

$$(\bar{Z}_{mas} + \bar{Z}_{ch})\bar{i}_s \bar{i}_s^* = 0 \quad (\text{III.11})$$

$$\bar{Z}_{ch} i_s^2 = -\bar{Z}_{mas} i_s^2 \quad (\text{III.12})$$

$$\bar{S}_{ch} = -\bar{S}_{mas} \quad (\text{III.13})$$

D'où :

$$P_{ch} = -P_{mas} \quad (\text{III.14})$$

$$Q_{ch} = -Q_{mas} \quad (\text{III.15})$$

Le signe (-) dans les équations(III.13)(III.14)(III.15) résume l'aspect d'échange d'énergie entre machine et charge. [25]

- Calcul de Z mas

Z mas: impédance d'entrée de la machine vue par une phase et le neutre.

On a: $\bar{Z}_{mas} = R_s + \bar{Z}'_{mas}$ (III.16)

• Où **Z mas** est l'impédance du dipôle A'B' (R_s est considérée du côté charge) :

$$\bar{Z}'_{mas} = j\sigma L_{cs}\omega_s + \frac{j(1-\sigma)L_{cs}\omega_s \frac{R'_r}{g}}{j(1-\sigma)L_{cs}\omega_s + \frac{R'_r}{g}} \quad (\text{III.17})$$

L'impédance d'entrée est normalisée comme suit:

$$\forall \omega_s, \bar{Z}''_{mas} = \frac{\bar{Z}'_{mas}}{L_{cs}\omega_s} = \frac{-\sigma(1-\sigma)L_{cs}\omega_g + jR'_r}{j(1-\sigma)L_{cs}\omega_g + R'_r} \quad (\text{III.18})$$

\bar{Z}''_{mas} est appelée impédance réduite formulée comme:

$$\bar{Z}''_{mas} = \alpha_{mas} + j\beta_{mas} \quad (\text{III.19})$$

Que l'on peut formuler similairement comme suit:

$$\alpha_{mas} = \frac{(1-\sigma)}{\frac{\omega_{gmax}}{\omega_g} + \frac{\omega_g}{\omega_{gmax}}} \quad (\text{III.20})$$

$$\beta_{mas} = \frac{\frac{\omega_{gmax} + \sigma \omega_g}{\omega_g} + \frac{\omega_{gmax}}{\omega_r}}{\frac{\omega_{rmax}}{\omega_g} + \frac{\omega_r}{\omega_{gmax}}} \quad (\text{III.21})$$

$$\omega_{gmax} = \frac{R'_r}{(1-\sigma)L_{cs}} \quad (\text{III.22})$$

III. 2. 2. 1. Amorçage à vide:

Dans le cas où la machine est connectée uniquement à une pure (capacité d'excitation) d'impédance $Z_{ch} = \frac{1}{jC\omega}$, l'égalité des puissances, ou l'échange des puissances dans le dipôle AB, permet d'écrire[4] :

$$\alpha_{mas} = \frac{R_s}{L_{cs}\omega_s} = -r_s \quad (\text{III.23})$$

$$\beta_{mas} = \frac{1}{L_{cs}C\omega_s^2} = Z_c \quad (\text{III.24})$$

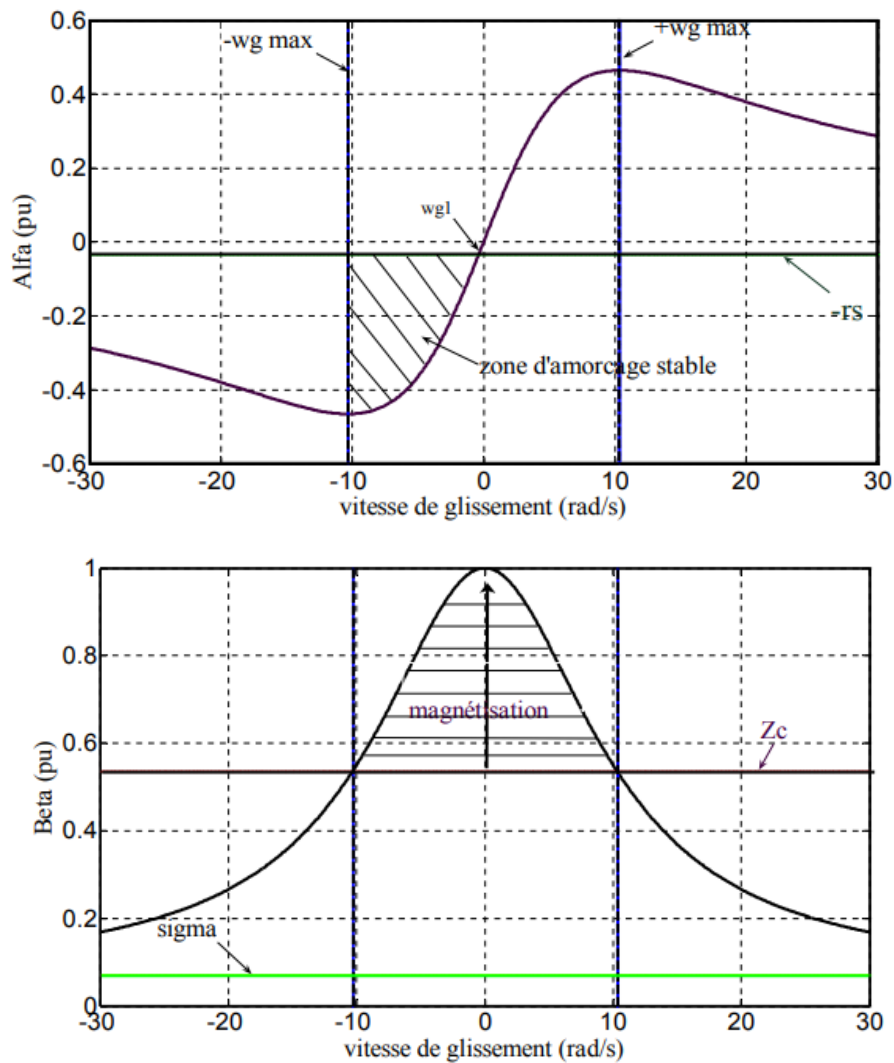


Figure III. 5 : Détermination de la zone d'amorçage de la GAS.

- **Interprétation des courbes:**

Les pulsations ω_{g1} et ω_{g2} détermine le point d'intersection de la droite de charge ($-r_s$) avec l'impédance réduite réelle a_{mas} . La zone dans laquelle le mariage aura lieu est déterminée par : $\omega_{g1} < \omega_g < \omega_{max}$

Le premier point d'intersection correspond à une vitesse de ω_{g1} , résultant en un glissement g_1 qui peut être calculé à l'aide de l'équation

$$\omega_g \ll \omega_{gmax} \Rightarrow g_1 = -\frac{R'_r R_s}{L_{cs}^2 (1-\sigma)^2 \omega_s^2} \tag{III.25}$$

Une application numérique donne $g_1 = -5.6334 \times 10^{-4}$ donc $g_1 \neq 0$ c.à.d. la vitesse de rotation de la machine est autour de synchronisme.

$$\omega_g \rightarrow 0 \Rightarrow R_s \rightarrow 0 \Rightarrow -r_s \rightarrow 0$$

L'intersection sera du synchronisme pur, et c'est à partir de ce point que la machine pourra s'amorcer.

Le deuxième point d'intersection de la caractéristique avec la droite $-r_s$ correspond à un glissement g_2 , qui se calcule comme suit :

$$\omega_g \gg \omega_{gmax} \Rightarrow g_2 = -\frac{R'_r}{R_s} \tag{III.26}$$

L'application numérique donne $g_2 \sim -1$

Pour générer la fréquence nominale, la machine doit tourner à deux fois sa vitesse de synchronisation, ce qui est quasiment impossible.[14]

$$\omega_g \rightarrow \infty \text{ (charge } \infty) \Rightarrow R_s \rightarrow 0 \Rightarrow g_2 \rightarrow \infty$$

Correspond à un fonctionnement instable.

Connaissant les glissements limites, on en déduit les valeurs extrêmes de la capacité C.

La figure III.5 montre que:

- **Pour $\omega_g \ll \omega_{gmax}$** le fonctionnement stable de la génératrice lorsque la phase de magnétisation est limitée entre la droite de magnétisation (Z_c) et la zone d'excitation maximale ou l'impédance réduite β_{mas} égale un 1 c.à.d. $\frac{1}{L_{cs}C\omega_s^2} = 1$ c.à.d. L_{cs} et C en résonance parfaite.
- **Pour $\omega_g \gg \omega_{gmax}$** le fonctionnement instable de la génératrice lorsque la phase de démagnétisation est limitée entre la droite de magnétisation et la zone des fuites ou l'impédance réduite maximale $\beta_{mas} = \sigma$ donc, $\frac{1}{L_{cs}C\omega_s^2} = 1$ c.à.d. L_{cs} et C en parfaite résonance ; de ce fait, toute la puissance réactive du condensateur est dissipée dans les inductances de fuite.[24]

III. 2. 2. Amorçage en charge:

A. Cas d'une charge résistive:

Lorsque le générateur atteint la vitesse de synchronisation et est capable de produire de l'énergie, il est connecté à une batterie. Le schéma équivalent de l'auto-amorçage à charge résistive pure R est représenté par la figure III. 6.

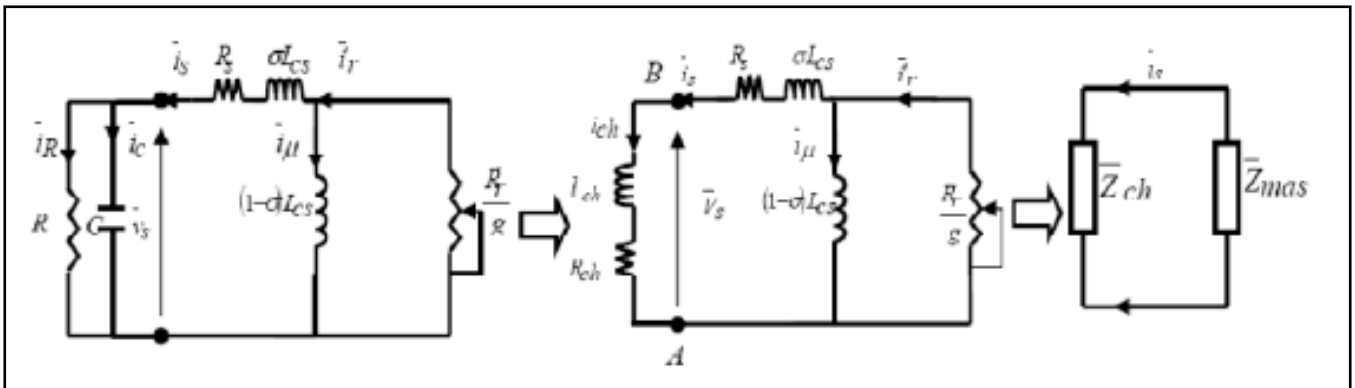


Figure III. 6 : Schéma équivalent pour l'auto-amorçage en charge résistive.

Dans cette représentation, les éléments e, Z_{ch} et Z_{mas} peuvent être exprimés en termes d'éléments d'un schéma traditionnel :

$$\bar{Z}_{mas} = R_s + j\sigma L_{cs}\omega_s + \frac{j(1-\sigma)L_{cs}\omega_s \frac{R'_r}{g}}{j(1-\sigma)L_{cs}\omega_s + \frac{R'_r}{g}}$$

$$\bar{Z}_{ch} = R_{ch} + jX_{ch} \tag{III.27}$$

Considérons X_{ch} = L_{ch} ω_s

$$\bar{Z}_{ch} = R_{ch} + jL_{ch}\omega_s \tag{III.28}$$

$$\bar{Z}_{ch} = \frac{R}{1+(RC\omega_s)^2} - j\frac{R^2C\omega_s}{1+(RC\omega_s)^2} \tag{III.29}$$

Pour L_{ch} > 0 Z_{ch} est inductive

Pour $L_{ch} < 0$ Z_{ch} est capacitive

$$\begin{cases} \bar{Z}_{mas} = R_s + \alpha_{mas}L_{cs}\omega_s + j\beta_{mas}L_{cs}\omega_s \\ \bar{Z}_{mas} = -\bar{Z}_{ch} \end{cases} = -R_{ch} - jL_{ch}\omega_s \quad (\text{III.30})$$

D'où :

$$\alpha_{mas} = -\left(\frac{R}{1+(RC\omega_s)^2} + R_s\right)\frac{1}{L_{cs}\omega_s} \quad (\text{III.31})$$

$$\beta_{mas} = \frac{R^2C}{(1+(RC\omega_s)^2)L_s} = \frac{L_{ch}}{L_s} \quad (\text{III.32})$$

Pendant la variation de la charge résistive reliée à ses bornes, le générateur asynchrone maintient son amorçage, mais seulement si :

$$-\frac{1-\sigma}{2} < -\left(\frac{R}{1+(RC\omega_s)^2} + R_s\right)\frac{1}{L_{cs}\omega_s} < -r_s \quad (\text{III.33})$$

$$\frac{1+\sigma}{2} < \frac{R^2C}{(1+(RC\omega_s)^2)L_{cs}} \leq 1 \quad (\text{III.34})$$

Selon la résistance de charge, le générateur peut conserver ou perdre son amorçage.

On distingue deux possibilités illustrées sur les figures **III. 7**, **III. 8**.

1) La machine maintient son amorçage

2) La machine perd son amorçage.

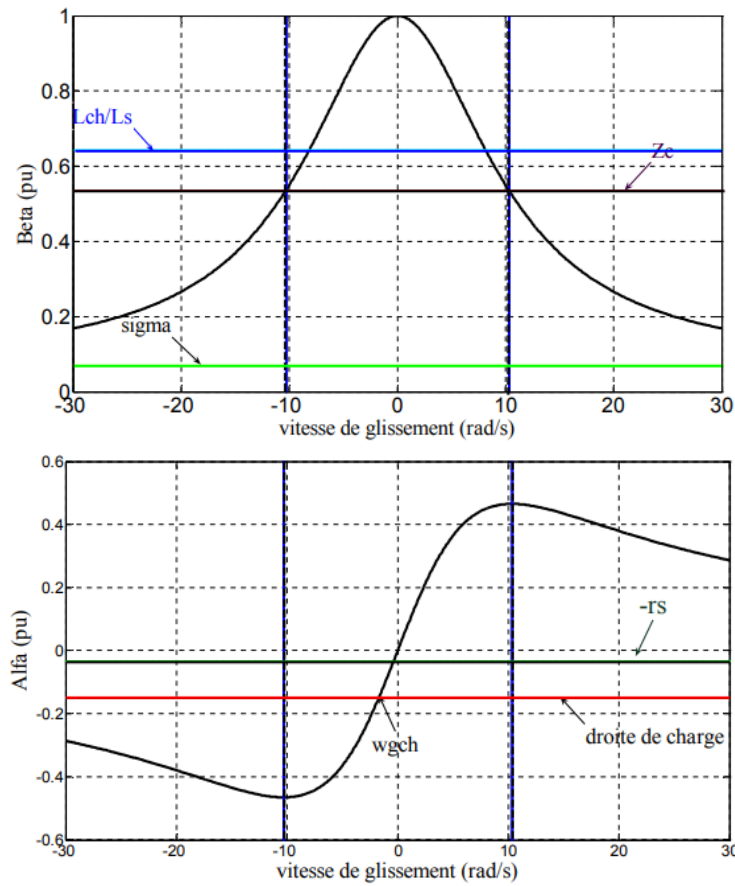


Figure III. 7 : La génératrice dans le cas amorcée.

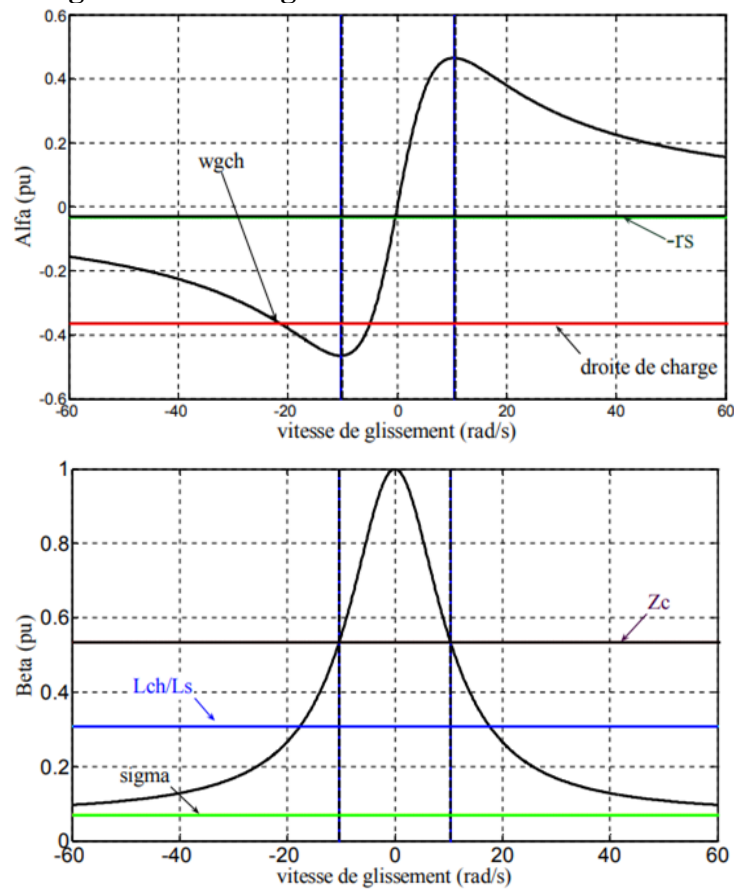


Figure III. 8 : La génératrice dans le cas désamorcée.

Pour une résistance de charge $R > 15 \Omega$, le glissement imposé de la charge ne dépasse pas le glissement maximum (limite de stabilité), et la droite de la charge L_{ch}/L_s se situe dans la zone de grossissement, là où le générateur reste non affecté.

Pour une résistance de charge $R < 15 \Omega$, Le glissement imposé de la charge dépasse la limite de stabilité, et le droit L_{ch}/L_s de la charge se situe dans la zone de faille, indiquant qu'il faut charger le GAZ de manière à ce que le droit L_{ch}/L_s de la charge se situe dans la zone d'amorçage stable définie parla droite d'excitation maximum et la droite de grossissement maximum.

B. Cas d'une charge mixte R-L:

La charge R-L et la capacité C, sont placée en parallèle sur les terminaux du stator.

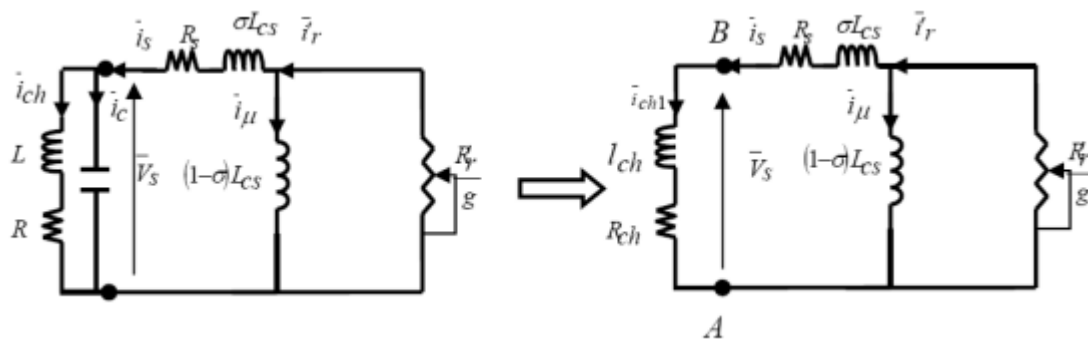


Figure III. 9 : Schéma équivalent pour l'auto-amorçage en charge inductive.

L'impédance de la charge est alors:

$$\bar{Z}_{ch} = R_{ch} + jX_{ch} = \frac{X_c^2 R}{R^2 + (X_c - X_L)^2} + j \left(-\frac{\frac{1}{X_c}(R^2 + X_L(X_c - X_L))}{R^2 + (X_c - X_L)^2} \right) \tag{III.35}$$

$$X_L = L\omega_s \text{ et } X_c = \frac{1}{C\omega_s}$$

Etude analytique de l' amorçage du générateur asynchrone dans le cas d' une charge inductive créée de la même manière que dans la section précédente(A) Et à partir de l'expression(III.35)on obtient:

$$\alpha_{mas} = Z''_r = -\left(\frac{X_c^2 R}{R^2 + (X_c - X_L)^2} + R_s\right) \frac{1}{L_{cs}\omega_s} \tag{III.36}$$

$$\beta_{mas} = Z''_{ima} = \frac{l_{ch}}{L_s} = \frac{X_c(R^2 + X_L(X_c - X_L))}{L_{cs}\omega_s(R^2 + (X_c - X_L)^2)} \tag{III.37}$$

L'auto amortissement du générateur est lié aux conditions suivantes :

$$-\frac{1-\sigma}{2} < \left(\frac{X_C^2 R}{R^2 + (X_C - X_L)^2} + R_S \right) \frac{1}{L_S \omega_S} < -r_S \quad (\text{III.38})$$

$$\frac{1+\sigma}{2} < \frac{X_C(R^2 + X_L(X_C - X_L))}{L_S \omega_S (R^2 + (X_C - X_L)^2)} \leq 1 \quad (\text{III.39})$$

En conséquence, l'énergie réactive du condensateur doit être supérieure à l'énergie requise par la charge et le générateur. On peut conclure que de la génératrice reste amorcée. Si la glissière à charge imposée reste dans la zone d'amorçage stable.

III. 3. Analyse des performances en régime équilibré :

L'impact de diverses sortes de charges insérées sur le comportement du générateur sera examiné dans la prochaine étape de ce projet.

III. 3. 1. Fonctionnement à vide de la génératrice asynchrone:

Avant que l'Asynchrone puisse alimenter les charges connectées à ses bornes, il doit d'abord atteindre son état permanent, il est donc préférable de démarrer le générateur à tension nulle jusqu'à ce qu'il atteigne son état nominal ; c'est le fonctionnement à tension nulle de l'Asynchrone.

III. 3. 1. 1. Tension d'amorçage de la génératrice:

La figure III. 10 montre l'évolution de la tension statique après auto-amorçage au vide sur une batterie de 198µF de condensateurs, avec le rotor tournant à 1500 tr/min.

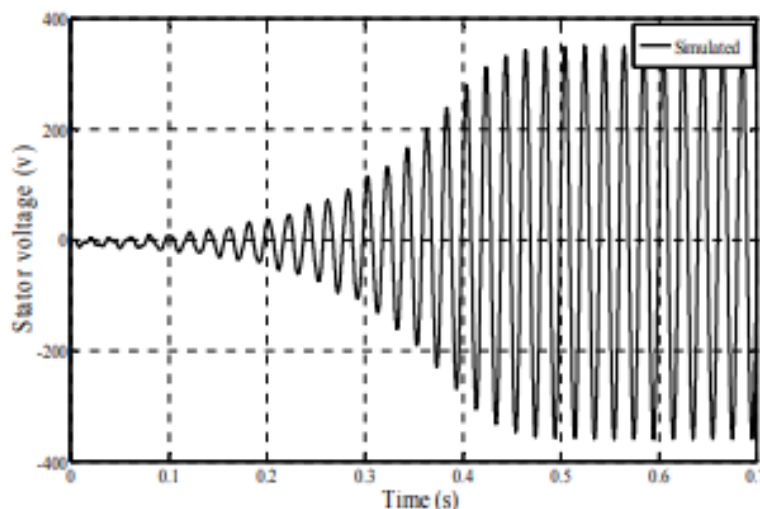


Figure III. 10 : Résultat simulé.

III. 3. 1. 2. Courant d'amorçage statorique :

La figure III. 11 montre l'évolution du courant statique après autoamorçage sur une batterie de condensateurs $198\mu\text{F}$, avec le rotor tournant à 1500 tr/min.

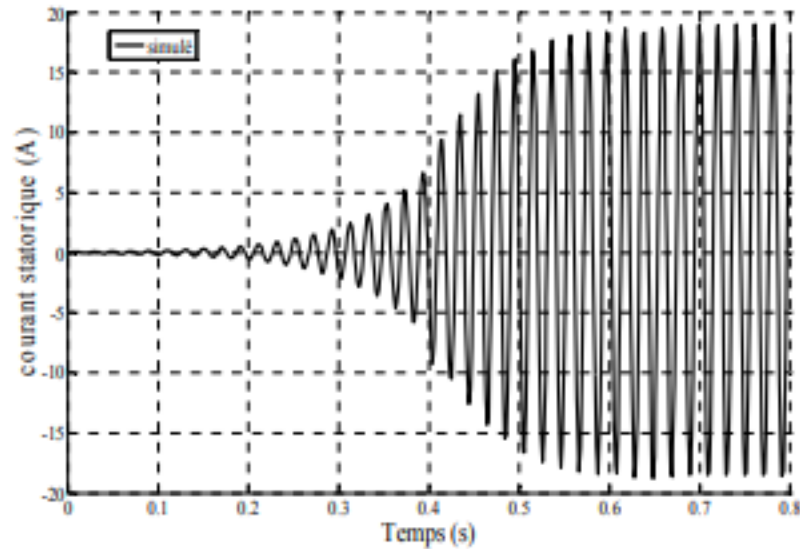


Figure III. 11 : Résultat simulé.

III. 3. 1. 3. Courant d'amorçage rotorique :

La figure III. 12 représente l'évolution du courant rotorique lorsque la génératrice est amorcée.

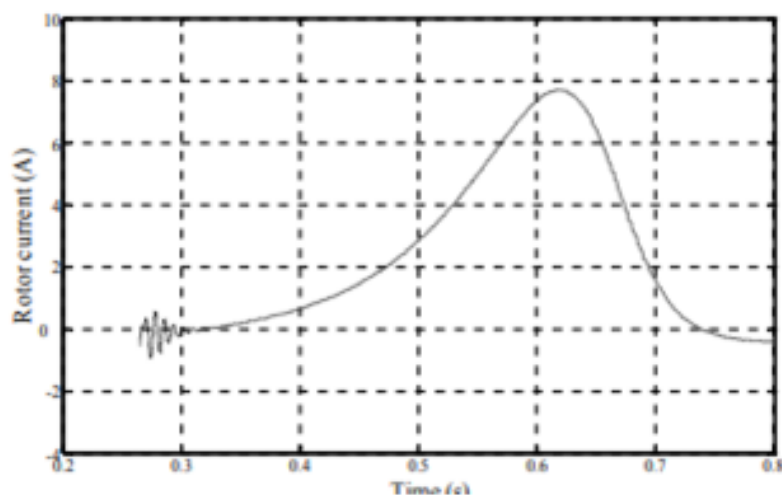


Figure III. 12 : Résultat simulé.

Après un transit de 0,55 seconde, la tension statique, le courant statorique et le courant rotorique atteignent un état permanent (un petit écart par rapport à la simulation). Cet écart s'explique par le fait que l'effet de la température sur les paramètres de la machine, notamment la résistance statique et rotorique, a été négligé.

III. 3. 2. Fonctionnement en charge de la génératrice asynchrone :

Lorsque le générateur asynchrone atteint son état permanent, la charge est triplée et placée sur ses membres.

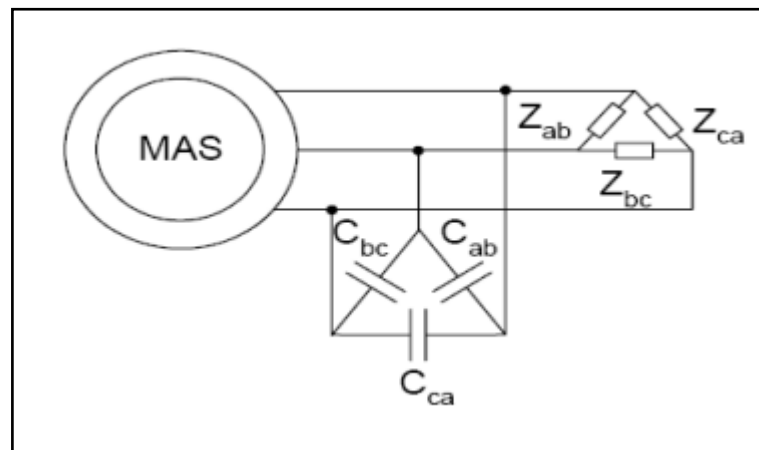


Figure III. 13 : Insertion d'une charge aux bornes de la génératrice.

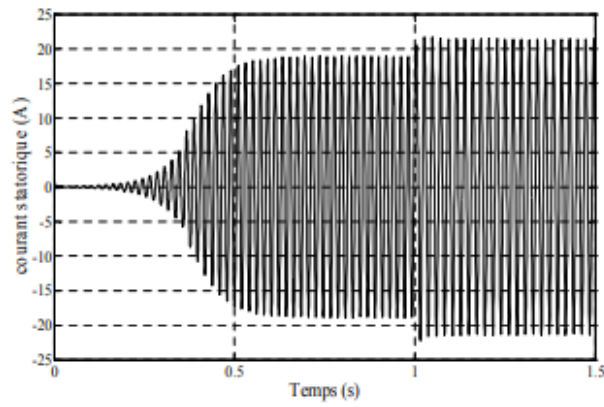
III. 3. 2. 1. Cas d'une charge résistive:

Le stator de la génératrice est couplé en triangle. En ajoutant au modèle de la génératrice autoexcité les équations suivantes :

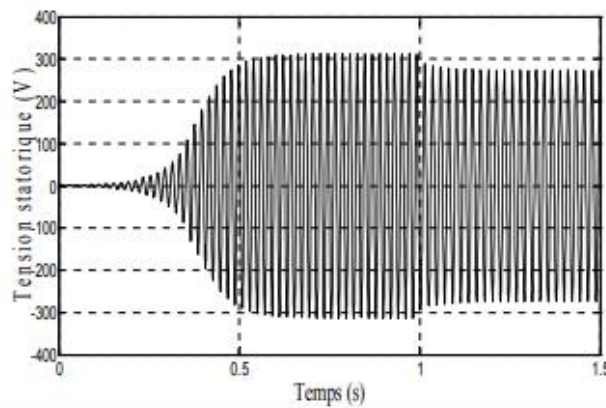
$$\begin{cases} \bar{i}_c = \bar{i}_s - \bar{i}_{ch} \\ \frac{d\bar{V}_s}{dt} = \frac{1}{C} \bar{i}_c \\ \bar{i}_{ch} = \frac{\bar{V}_s}{R} \end{cases} \quad (III.40)$$

\bar{i}_{ch} : Le courant de charge.

La figure III. 14 montre les résultats de simulation pour une charge de résistance $R = 80 \Omega$

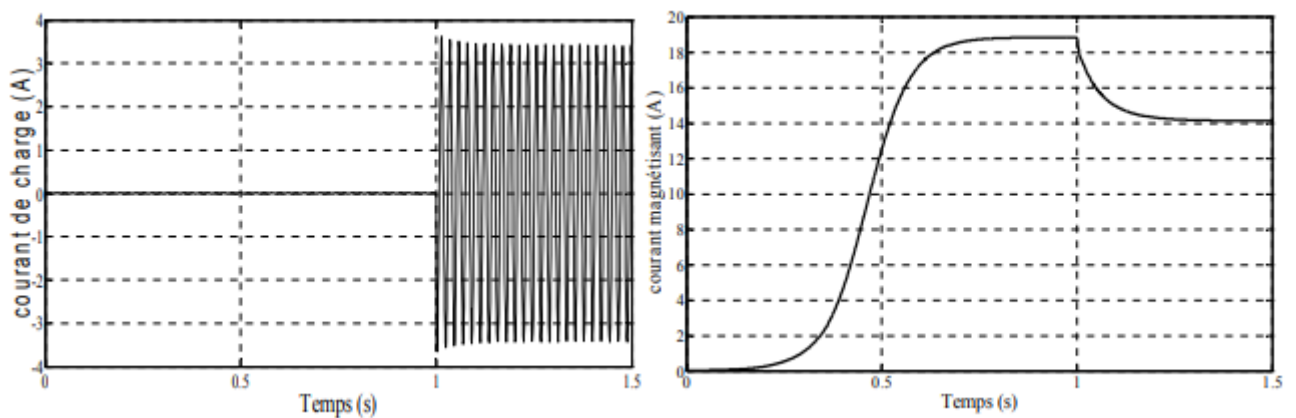


(a)

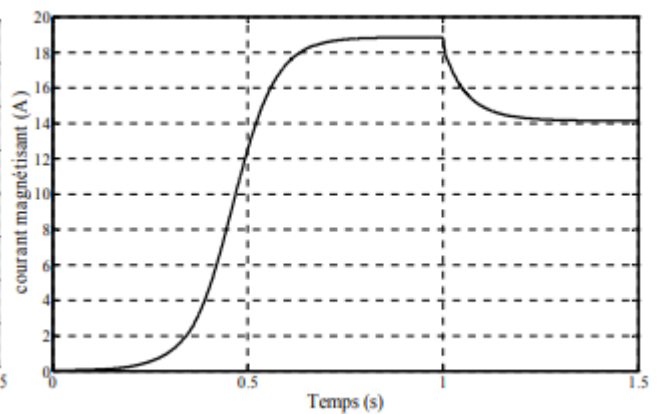


(b)

Figure III. 14 : Courant(a) et tension(b) statorique lors la connexion d'une charge résistive.



(a)



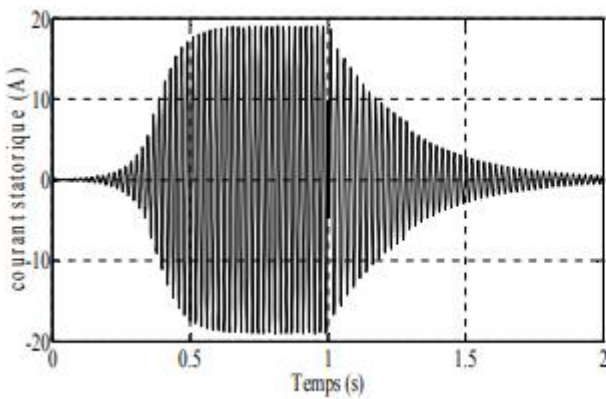
(b)

Figure III. 15 : Courant de charge i_{ch} (a) et courant magnétisant (b) lors la connexion d'une charge résistive.

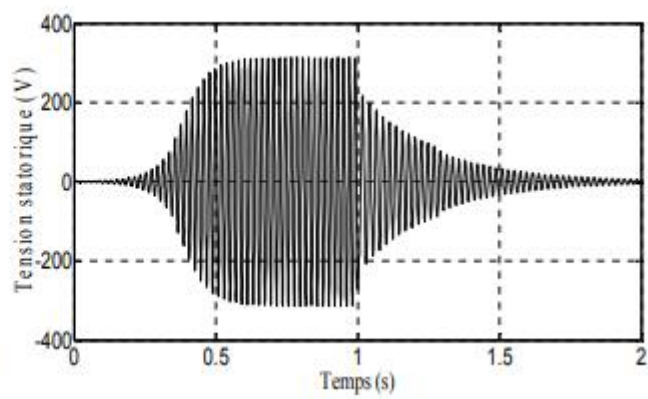
✓ La fréquence calculé est de valeur **f=48.78 Hz**

✓ Lors de l' introduction de la charge résistive , la tension et la fréquence du générateur asynchrone sont réduites.Le courant de la ligne augmente pour fournir le courant de charge, tandis que le courant magnétique chute en même temps que la tension.

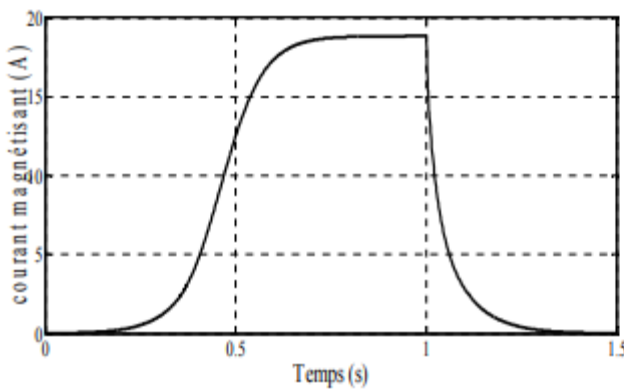
✓ Pour une charge critique (le cas R=10Ω), la fluctuation de tension, ainsi que la fréquence, est très essentielle, car elle conduit au désamorçage du générateur, qui est suivi d' un court - circuit provoqué par cette charge, qui nécessite un contrôle.[30]



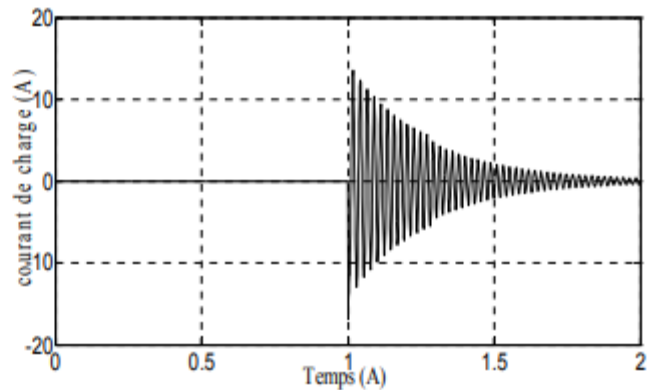
a. Le courant statorique.



b. La tension statorique.



c. Le courant magnétisant.



d. Le courant de charge.

Figure III. 16 : Désamorçage de la génératrice cas d'une charge critique R=10 Ω.

Lorsque le courant de charge augmente, le nombre de goulottes inductives et résistives augmente également.Il en résulte une diminution de la tension dans les bobines d' excitation des condensateurs, et donc une diminution de l' énergie réactive fournie au générateur.[4]

III. 3. 2. 2. Cas d'une charge inductive :

Après avoir considéré le cas d'une charge résistive pure, nous considérons maintenant le cas d'une charge RL. Cette forme de charge se distingue principalement par sa consommation d'énergie réactive.[4]

L'appel d'énergie réactive, pose un problème pour la génératrice asynchrone. Car, même pour ses propres besoins réactifs, il est dépendant d'une source externe (capacités d'excitation).

Pour simuler l'endettement du producteur sur une charge RL, cette charge doit d'abord être modélisée. Nous allons donc donner une représentation du circuit RL triphasé équilibré.

Le circuit est analogue à celui de la Figure III. 17 chaque phase est formée par la connexion séquentielle d'une résistance R_c et d'une inductance L_c . Nous considérons que les trois phases sont magnétiquement couplées. Les inductances sont dites non saturables dans la mutuelle entre phases, comme l'a noté M_c .

La matrice résistance est définie comme dans le cas de la charge résistive. La matrice inductance est définie par :

$$L_c = \begin{bmatrix} L_c & M_c & M_c \\ M_c & L_c & M_c \\ M_c & M_c & L_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.41})$$

$$\begin{cases} V_a = R_c \cdot I_a + (L_c - M_c) \frac{dI_a}{dt} \\ V_b = R_c \cdot I_b + (L_c - M_c) \frac{dI_b}{dt} \\ V_c = R_c \cdot I_c + (L_c - M_c) \frac{dI_c}{dt} \end{cases}$$

On a donc :

(III.42)

Les résultats de simulation sont représentés dans les figures III. 17 et III. 18 avec ($R_c = 50 \Omega$ et $L_c = 0.08 \text{ H}$ et $M_c = 0.02 \text{ H}$).

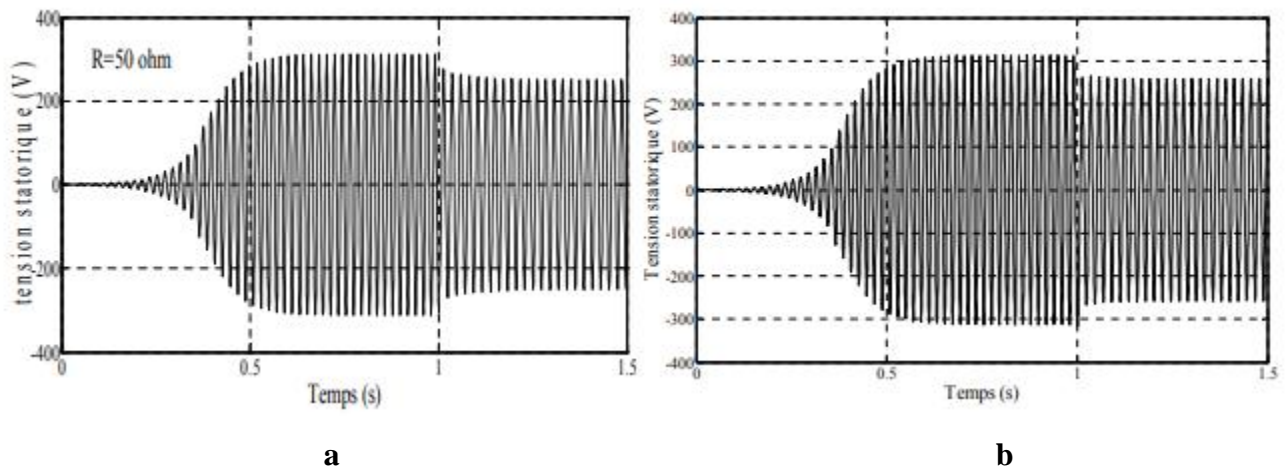


Figure III. 17 : Tension statorique. (a) charge purement résistive, (b) charge R en série avec une inductance.

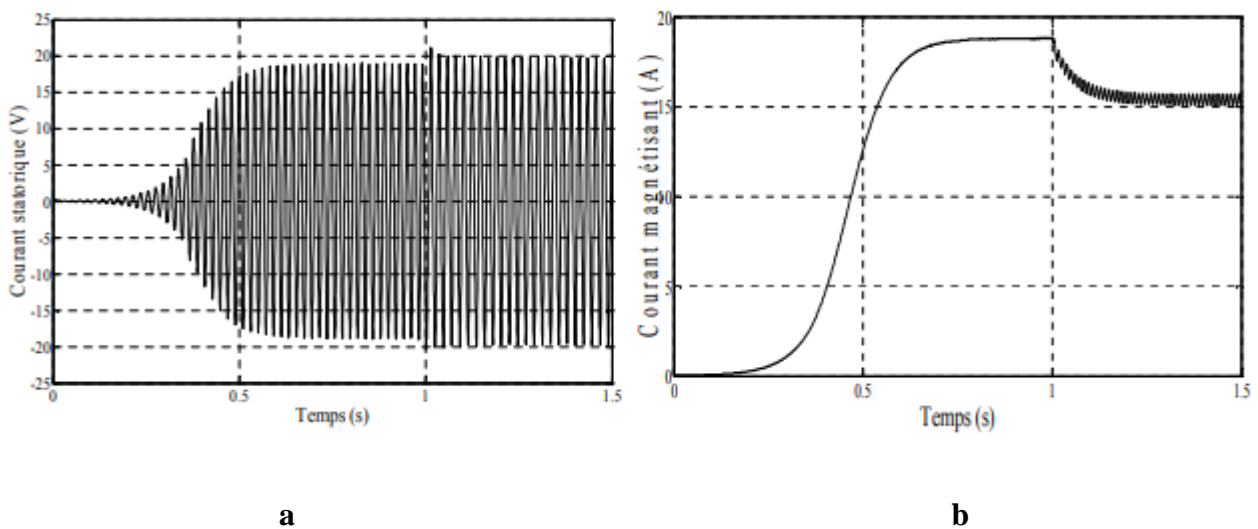


Figure III. 18 : Courant statorique (a) et courant magnétisant (b)

III. 3. 2. 3. Cas d'une charge RC :

Plus le courant de charge est élevé, plus le besoin en énergie réactive de la génératrice asynchrone est important. Pour compenser le supplément réactif demandé par le générateur, une série de condensateurs peut être connectée à la charge. Cette technique de compensation est une méthode simple pour améliorer la régulation de tension du générateur. [6]

Nous avons choisi d'étudier l'effet de ces condensateurs compensateurs sur le comportement du générateur en examinant le déficit RC. En fait, ce fonctionnement en charge (RC) ressemble beaucoup au fonctionnement d'un générateur asynchrone à condensateurs compensateurs, qui repose sur une charge résistive.

En fait, ce fonctionnement en charge (RC) ressemble beaucoup au fonctionnement d'un générateur asynchrone à condensateurs compensateurs, qui repose sur une charge résistive.

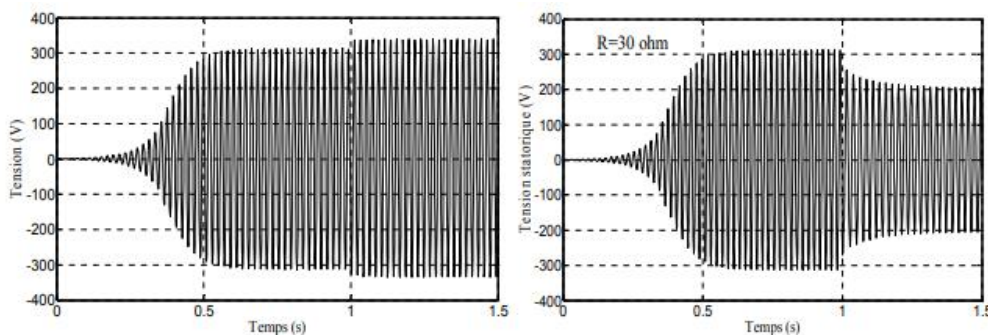
Le circuit RC est analogue à celui de la Figure III. 13 chaque phase est constituée par l'association en série d'une résistance R_c et d'un condensateur de capacité C_c . La matrice capacité du circuit est donné par :

$$C_c = \begin{bmatrix} C_c & 0 & 0 \\ 0 & C_c & 0 \\ 0 & 0 & C_c \end{bmatrix} \tag{III.43}$$

On aura donc :

$$\begin{cases} V_a = R_c.I_a + \frac{1}{C_c} \int I_a.dt \\ V_b = R_c.I_b + \frac{1}{C_c} \int I_b.dt \\ V_c = R_c.I_c + \frac{1}{C_c} \int I_c.dt \end{cases} \tag{III.44}$$

Les figures III. 19 et III. 20 représentent les résultats de simulation de système(III.44) avec ($R_c = 30 \Omega$, $C_c = 15 \mu F$)



a. Avec capacité de compensation. b. Sans capacité de compensation.

Figure III. 19 : la tension statorique lors la mis en parallèle d'une capacité C.

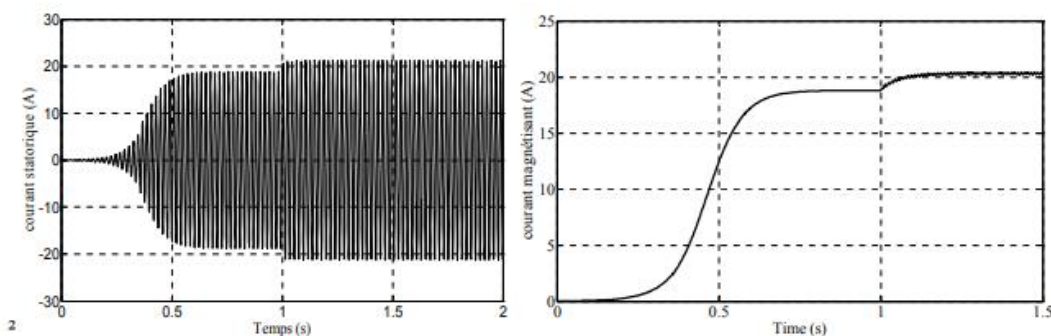


Figure III. 20 : a. Le courant statorique. b. Le courant magnétisant.

Les résultats montrent l'intérêt d'intégrer une capacité de compensation en parallèle avec le générateur asynchrone. La capacité installée permet une augmentation du courant magnétique, répondant ainsi au besoin d'un générateur d'énergie réactive où la tension statique n'est pas affectée par la charge.

III. 4. Analyse des performances de générateur :

Après avoir présenté les différents résultats obtenus lors du démarrage de la génératrice asynchrone à zéro et à pleine charge, il est temps d'étudier l'impact du type et de la valeur de charge, ainsi que l'impact des déséquilibres de charge ou de capacité sur la tension statique.

III. 4. 1. Influence de la capacité C sur la tension et le courant statorique :

La valeur de la capacité d'excitation a un impact sur le point de fonctionnement du générateur et, par conséquent, sur la tension et le courant statoriquement. Les figures III. 21. a et III. 21. b présentent les valeurs de la tension et du courant statorique pour différentes valeurs de capacité.

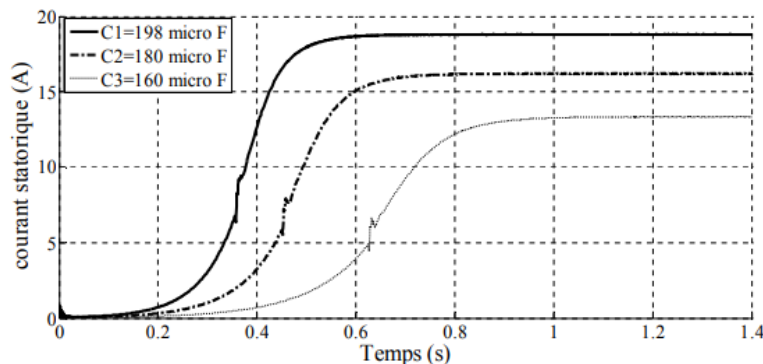


Figure III. 21 : a. Le courant statorique pour différentes valeurs de capacité à 1500 tr/mn.

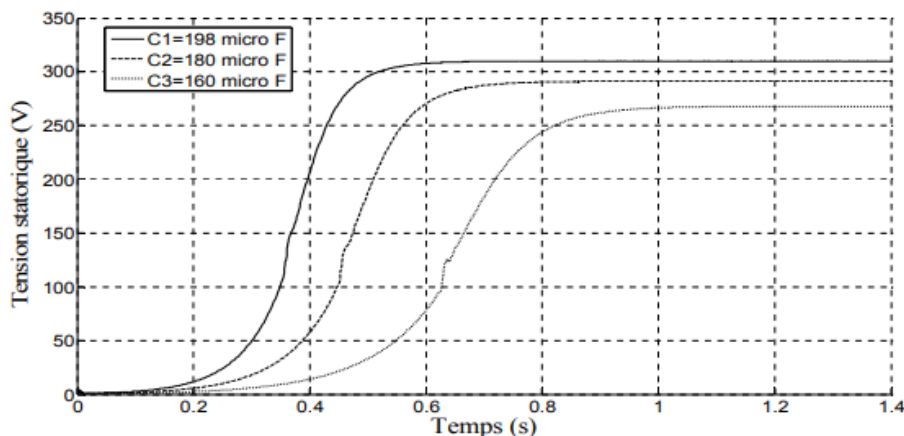


Figure III. 21 : b. La tension statorique pour différentes valeurs de capacité à 1500 tr/mn.

III. 4. 2. Influence de la vitesse de rotation sur la tension statorique :

La figure III. 22 illustre une autre méthode de régulation de la tension statique en intervenant sur la vitesse de rotation du générateur.

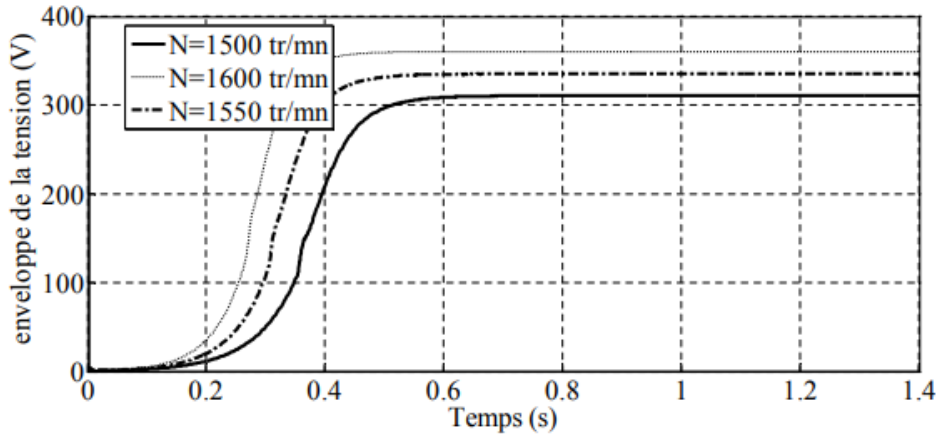


Figure III. 22 : La valeur max de la tension statorique pour différente valeur de vitesse pour C=198µF.

Les figures III.21 et III.22 montrent les possibilités de régler le niveau de tension en jouant sur l valeur de C et de la vitesse de rotation.

La variation de C, ainsi que la vitesse de rotation , doivent toujours se situer dans les plages de variation autorisées décrites dans le chapitre précédent.

La valeur de la capacité, ainsi que la vitesse , augmentent le niveau de tension. LaFigureIII. 23 justifie notre résultat. Nous avons remarqué que le point de fonctionnement correspond à l' intersection de la caractéristique externe de la capacité $(V_c = \frac{1}{C \omega_s} I_m)$ de pente $\frac{1}{C \omega_s}$ avec la F.E.M statorique, change avec la pente.

Lorsque la valeur de C ou ω_s (proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine) diminue, la pente monte jusqu'au point où l' intersection statique avec la FEM est nulle ou la machine ne revient pas à son état d' origine.

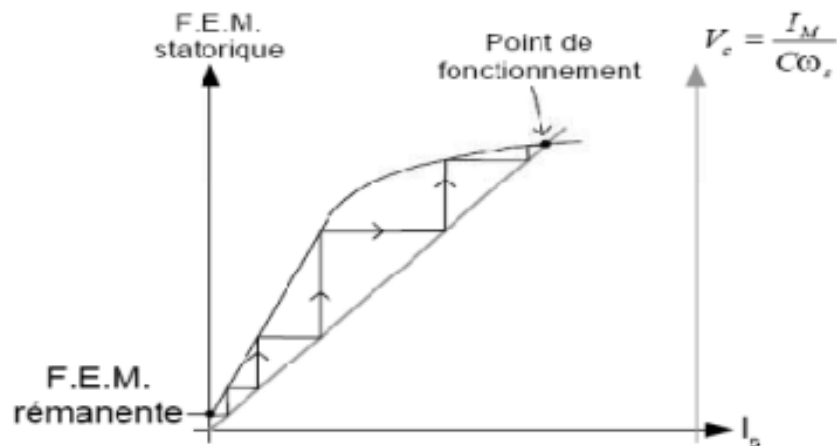


Figure III. 23 : Phénomène d'autoamorçage.

III. 4. 3. Influence de la résistance statorique sur la tension statorique

:

Lorsque la génératrice alimente une charge, elle se chauffe. La température du générateur a un effet sur la résistance statique et donc sur le temps de transit. La sensibilité de la tension statique aux changements de résistance statique est illustrée à la figure III. 24.

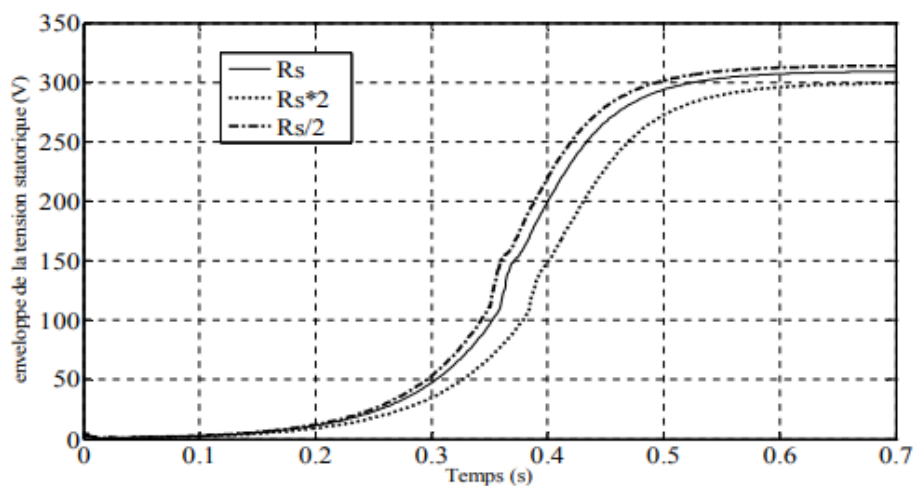


Figure III. 24 : Enveloppe de la tension statorique pour différentes valeurs de la résistance statorique

III. 4. 4. Influence de la résistance rotorique sur la tension statorique :

De la même manière que ce qui s'est passé auparavant, la résistance rotorique est soumise à des changements causés par l'échauffement du générateur. L'effet de la résistance du rotor sur la tension statique est illustré à la figure III. 25.

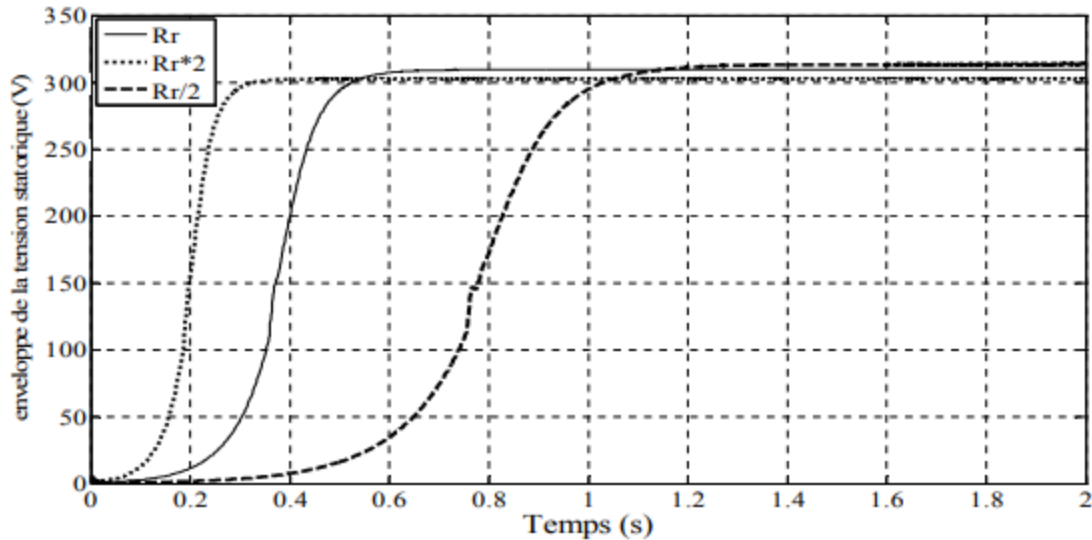


Figure III. 25 : Enveloppe de la tension statorique pour différentes valeurs de la résistance rotorique

D'après les figures III. 24 et III. 25 Lorsque le générateur est allumé et que l'appel de courant est vital, il est clair que la prise en compte de l'effet de la température sur les résistances s'impose.

III. 4. 5. Influence de la résistance de charge sur la tension statorique :

La figure III.26 présente la tension statorique pour différentes résistances.

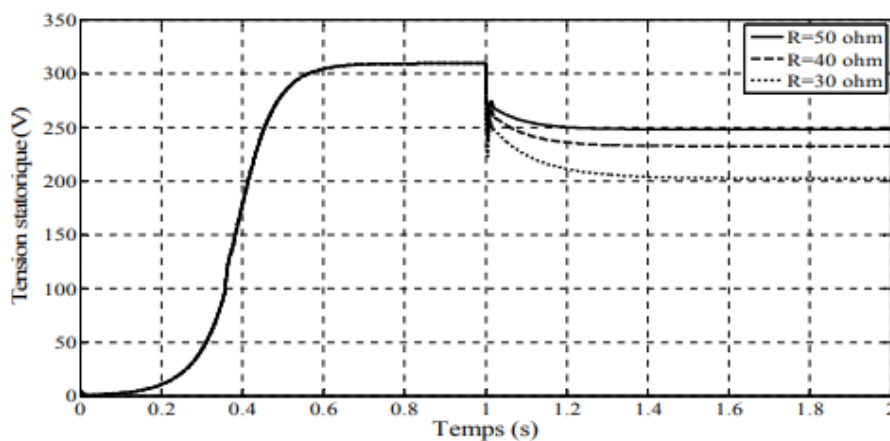


Figure III. 26 : Influence de la résistance de charge sur la tension statorique.

Nous constatons que plus la résistance de charge augmente plus les chutes de tension augmentent. En effet, lorsque la résistance de la charge diminue, le courant de la charge augmente, ce qui augmente les chutes ohmiques (résistance statorique) et inductive (fuite inductance) au niveau du stator, où la tension à la borne de capacité diminue et l'énergie réactive fournie par la capacité, qui est proportionnelle au carré de la tension, diminue ; enfin, la tension statique diminue.

III. 4. 6. Influence de $\cos\phi$ de la charge sur la tension statorique :

La figure III.27 représente les valeurs des tensions à vide et après connexion de différentes charges RL. Ces charges RL ont la même impédance, mais des $\cos\phi$ différents.

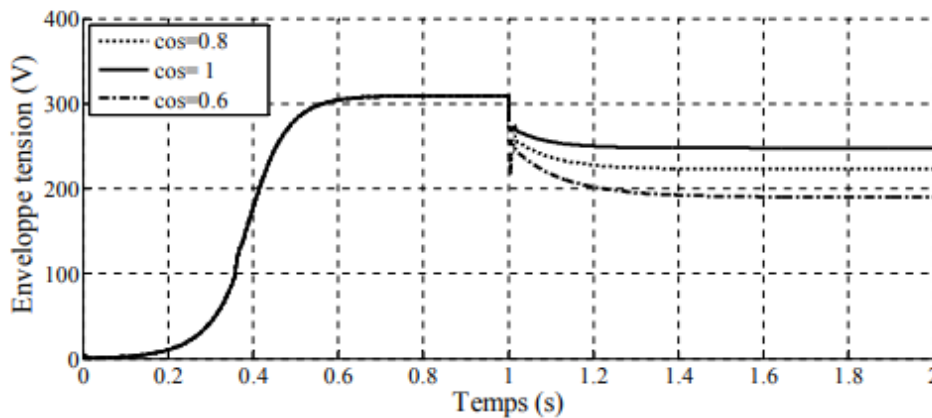


Figure III. 27 : Influence de $\cos\phi$ sur la tension statorique. $Z=50$ ohm.

Nous remarquons que, plus le $\cos\phi$ de la charge diminue, plus la chute de tension augmente. Cette chute de tension s'explique par une augmentation de la consommation de l'inductance à chaque fois que sa valeur augmente, laissant le reste de la puissance réactive produite par les capacités insuffisante pour ramener le générateur à son état de fonctionnement nominal.

III. 4. 7. Déséquilibre des trois charges:

L'analyse du déséquilibre de charge complète le bilan des performances de la génératrice asynchrone. La figure Fig.III.28 montre les tensions statoriques, V_a , V_b et V_c suite à une insertion d'une charge triphasée déséquilibrée de valeurs $R_1 = 50 \Omega$, $R_2 = 40 \Omega$ et $R_3 = 30 \Omega$.

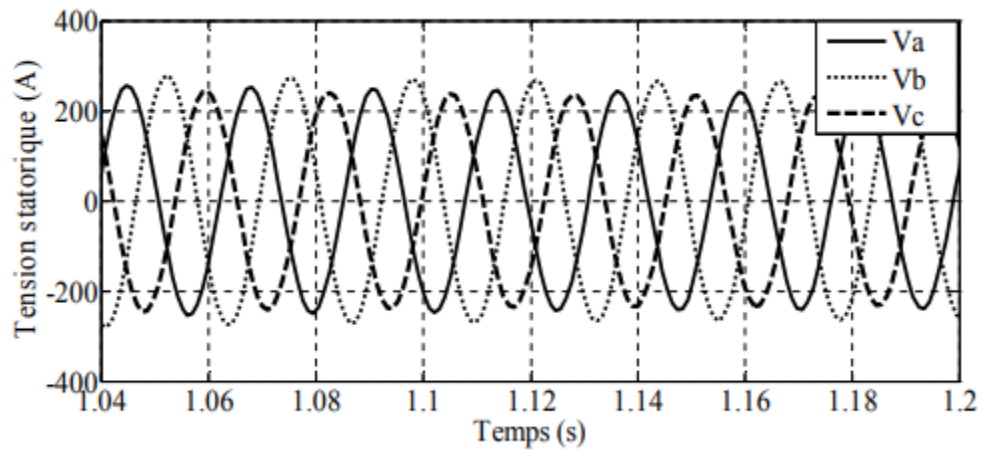


Figure III. 28 : La tension statorique lors le déséquilibre de la charge.

III. 4. 8. Déséquilibre des trois capacités :

Le déséquilibre des capacités rend aussi les tensions statoriques, V_a , V_b et V_c déséquilibrés ce qui est présenter sur la figure III. 29. $C_1= 190 \mu\text{F}$, $C_2= 170 \mu\text{F}$ et $C_3= 150 \mu\text{F}$.

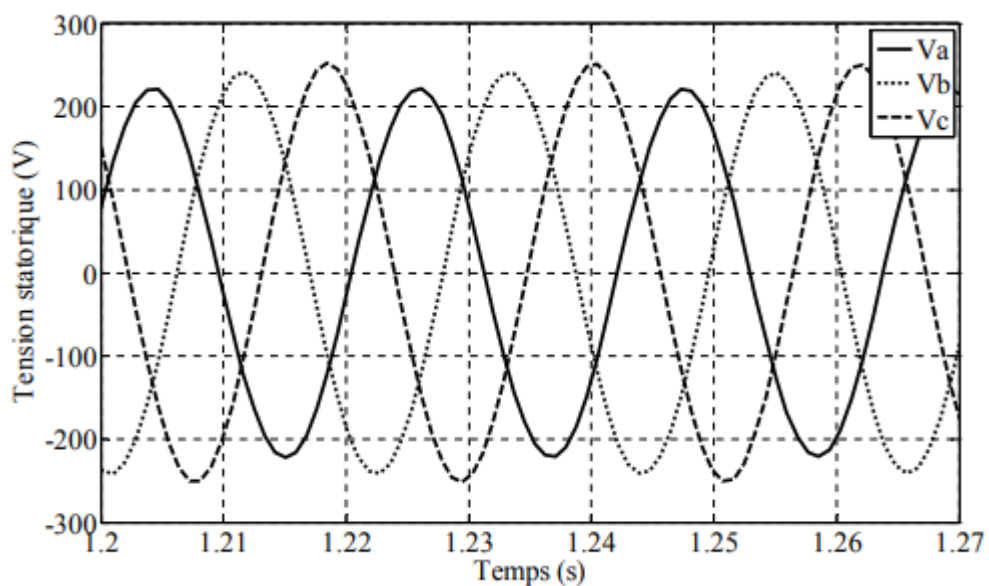


Figure III. 29 : La tension statorique lors le déséquilibre des capacités.

III. 5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons examiné le fonctionnement d' un groupe électrogène lorsqu'il est déconnecté du réseau électrique. La vitesse de rotation et la capacité d'excitation doivent être choisies de manière à ce que le générateur ne surchauffe pas et atteigne le point de fonctionnement nominal.

Les risques de désamorçage en cas de surcharge du groupe électrogène doivent également être pris en compte, limitant le fonctionnement du groupe électrogène à des zones plus précises.

Les résultats montrent que la valeur de la charge, le type de charge (résistive pure , RL, RC) et la nature de la charge (équilibrée ou déséquilibrée) ont tous un impact significatif sur le comportement du générateur.

Sur la base des données que nous avons recueillies, nous avons découvert que la charge résistive n'a aucun effet sur le fonctionnement du générateur de la même manière que la charge RL ou RC. L'effet de la charge résistive, diffère aussi, suivant la valeur de la résistance de charge.

Le principe du générateur d'auto-excitation asynchrone peut cependant être amélioré avec un dispositif d' électronique de puissance.

La comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats de simulation valide le modèle saturé de la machine asynchrone développé dans le chapitre précédent.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Nous avons étudié le fonctionnement d'un générateur asynchrone en mode autonome et connecté à un réseau électrique dans ce mémoire. Cela commence par la modélisation du système de production, qui est la combinaison d'une machine asynchrone entraînée au-delà du synchronisme et d'un banc d'excitation. En premier lieu, la modélisation repose sur un certain nombre d'hypothèses simplifiées, dont la linéarité de la caractéristique magnétique. Comme indiqué précédemment, le modèle simulé ne produit pas de résultats cohérents avec les résultats expérimentaux.

L'introduction de la saturation dans le modèle précédent résout ce problème et produit des résultats conformes à la pratique, démontrant l'utilité du phénomène de saturation.

Le développement d'équations modèles saturables a permis de mettre en évidence le phénomène d'effet croisé de saturation, qui est inextricablement lié au phénomène de saturation. L'apparition explicite de l'inter-saturation dans les équations du modèle actuel est due à l'opération de dérivation de l'inductance de magnétisation. Les résultats montrent que l'inductance magnétique n'est plus constante, mais varie plutôt avec le courant électrique.

La validation expérimentale d'un modèle développé a été présentée. Contrairement au modèle linéaire, le modèle saturé converge et produit des résultats qui décrivent avec précision le comportement réel du générateur asynchrone autonome. La prise en compte de la saturation magnétique de la branche magnétique est donc nécessaire pour une bonne analyse du fonctionnement autonome de la génératrice asynchrone.

L'étude du régime d'auto-amorçage transitoire de ces machines dans toutes les configurations possibles de liaisons entre la machine, les condensateurs et la charge, y compris sous vide (sur des condensateurs par exemple), afin d'obtenir le fonctionnement permanent souhaité. De plus, pour que ce régime existe, il faut que la génératrice asynchrone soit correctement amorcée, et nous pensons qu'il faut porter une attention particulière à cette phase transitoire afin de la maîtriser en pratique.

En conséquence, les conditions d'auto-excitation sont examinées en fonction du flux magnétique restant et de la capacité à s'adapter aux charges potentielles (R, L).

Il faut également tenir compte des risques de désamorçage en cas de surcharge du groupe électrogène, ce qui limite le fonctionnement du groupe électrogène à des zones plus spécifiques.

Les résultats montrent que le comportement du générateur est fortement influencé par la valeur de la charge, son type (résistive pure, RL, RC), et si elle est équilibrée ou déséquilibrée.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

1. A. Davigny, « **Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie** », Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France 2007.
2. A. Fouille, « **ELECTROTECHNIQUE A L'USAGE DES INGENIEURS, Machines électriques à courants alternatifs, TOME II** », École nationales d'ingénieurs, instituts universitaires de technologie, section de techniciens supérieurs. BORDAS, Paris, 1973.
3. Alain Cuniere et Gilles Feld, « **MACHINE ASYNCHRONE** », ENS de CACHAN
4. Ali M. Eltamaly, PhD, « **New Formula to Determine the Minimum Capacitance Required for Self-Excited Induction Generator** », Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering Elminia University, Elminia, Egypt.
5. Benslimane Mestafa⁵ Mr .HAFI Djafar, « **Etude et Modélisation d'une Génératrice Asynchrone double cage** », mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merboh Ouargla, 2016.
6. Boughermi Brahim et Douali Belkacem, « **Commande et Modélisation de générateurs asynchrone dans une installation éolienne autonome ou connecte à un réseau stable** », PFE, Université de Medea, 2007
7. F.Brahime, N.Ould Belkacem, « **Modélisation identification et régulation de tension d'une Génératrice Asynchrone auto-excité** », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016/2017.
8. Gregory Peset, « **Nouvelle approche pour la prédétermination des caractéristique externes des génératrice asynchrone fonctionnant dans le cadre de l'ilotage, exigence partielle de la maîtrise en ingénierie** », Université du Québec à Rimouski, Mars 2003.
9. Guy. Séguier et Francis. NOTELET, « **Electrotechnique industrielle** », Technique et documentation Lavoisier, Paris, 3ème édition, 2006.
10. H. Ben Ahmed, B. Multon, C. Nichita, X. Roboam, O. Gergaud et B. Dakyo, « **Aérogénérateurs électriques** », Techniques de l'Ingénieur, D3960, Nov. 2004
11. H.Chekireb. « **Investigation sur les modèles de commande non linéaire de la machine asynchrone** », thèse de doctorat, ENP, 2003.
12. I.Z.Mohammed I. Bouray, « **Modélisation d'un Générateur Asynchrone a vitesse fixe** », mémoire de fin d'étude, École Nationale Polytechnique, Département d'électrotechnique, ENP 2013.
13. J. Caron, « **Modélisation et commande de la machine asynchrone** », vol.7, TECHNIP, coll. 'Méthodes et pratique', 1995.

- 14.
15. J.Chatlain, « Machines Electriques », Tome1, Dunod 1983.
16. J. Ouidir M.Diabi, « Modélisation et Simulation du Générateur Asynchrone Autonome », mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 06/07/2017
17. J.P.caron,J.P.hautier, « modélisation et commande de la machine asynchrone », Edition technip, France, paris, 1995
18. Lamri louze, « Production décentralisée de l'énergie électrique, « Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto-excitée », thèse de doctorat, université Mentouri-Constantine, faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique. 08/07/2010.
19. Lotfi. BAGHLI, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I.
20. M. Kostenko et L. piotrovski, « Machines électriques », Tomes I et II, édition de Moscou (Mir), 1969, (réédité en 1979).
21. M. Mohamed machmoum, « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de doctorat. Université de nante secole doctorale sciences et technologies de l'information et des matériaux .14 janvier 2006
22. M. Pinard. « Commande électronique des moteurs électrique », Edition DUNOD, année 2004.
23. M.Poloujadoff, « Machine asynchrone -Régimes quelconques », Encyclopédie de techniques de l'ingénieur, 2000.
24. M. kassa idjdrene, « contribution à l'étude de la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éolienne autonomes », thèse .université abderahmane mira bejaia. faculté science et technologie .electrotechnique .soutenu 23 mai 2010
25. Mateo Basic, Dinko Vukadinovic, Goran Petrovic, «Dynamic and pole-zero analysis of self-excited induction generator using a novel model with iron losses», Electrical Power and Energy Systems,
26. Elsevier, 42, 2012, pp 105-118.
27. M.S. Naït-Saïd, « Modélisation Vectorielle d'une Machine à Courant Alternatif », Notes de Cours éditées à Université de Batna, Avril 2006.
28. Mekkaoui Naïma. «Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini Centrale Éolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double ». Université de Batna faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique. Mémoire de Magister Spécialité : Maîtrise d'Énergie et Énergies Renouvelables Alimentée. 2004
- 29.

30. Metin Demirtasa, Haris Calgana, Amieur Toufik, Moussa Sedraoui, « Small-signal modeling and robust multi-loop PID and H_{∞} controllers synthesis for a self-excited induction generator ». Université belkicir. 28 janvier 2021.
31. Mourad Hellal, Mr. Salim Ramdane, « Etude des Performances de la Machine Asynchrone sous Défauts », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 25 septembre 2017.
32. N. Boudermine et M. Chaibdour. « Régulation Automatique D'une machine asynchrone par un convertisseur statique », PFE, Université de Jijel, 2016.
33. Naïma. Mekkaoui, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée »
34. O. Alik, « Étude et commande d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009/2010.
35. Patrick BRUNET et LTEG Henri BRISSON, « cours Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrones », VIERZON, France.
36. Philippe. BARRET, « Régimes Transitoires des Machines Electriques », Edition EYROLLES, 1982.
37. Razik. HUBERT, « La machine Asynchrone à Vitesse Variable », Tome 1, Hermmes Sciences Lavoisier.
38. R. Meziane, N. Ouerdi, « Etude et Commande de la machine Asynchrone », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2007/2008.
39. R. C. Bansal, « Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 2, June 2005
40. W. Redjai, H. Bensabra, mémoire de fin d'étude, Université Kabdi Merbah Ouargla, 2011/2012.
41. Z. Khennache, O. Melloul, « Identification Paramétrique d'une Génératrice Asynchrone autoexcitée dédiée à la Conversion d'Energie Eolienne et Micro-hydraulique dans un Site Isolé », mémoire de fin d'étude, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2013