

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

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Électrotechnique**

Spécialité : **Électrotechnique Industrielle**

Présenté par

Thinhinane GAYA
Sabah BACHENE

Thème

Impact des variations de la charge et de la vitesse sur la tension du générateur asynchrone auto-excité

Mémoire soutenu publiquement le 02 / 07 / 2024 devant le jury composé de :

M Rabah ROUAS
MCB, UMMTO, Président

M Azzouz MIOUAT
MAA, UMMTO, Encadrant

Melle Nadia RADJA
MCB, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu Tout
Puissant, Pour toute la puissance qu'il nous a donné*

D'évaluer ce modeste travail

*Nous adressons nos remerciements les plus sincères à notre promoteur,
Mr [A. Miouat] Enseignant au département d'électrotechnique à
l'UNMCM70, pour sa patience et ses conseils précieux qui ont
grandement contribué à la réussite de ce travail.*

*Nous tenons également à remercier les membres du jury examinateurs
pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce travail.*

*Enfin, nous remercions chaleureusement tous les enseignants et
camarades de notre promotion qui nous ont soutenus dans la
réalisation de ce projet.*

B. Sabah

G. Thinhinane

Dédicace

A ma Maman qui m'a tant soutenue pendant toutes

Ces longues années d'études

A mon père

A mes sœurs

A mon frère

A tous mes amis

A toute ma famille Gaya

A tous mes camarades

A tous ceux que j'ai connu durant

Toutes mes études ;

A tous ceux pour qui je compte et qui comptent pour moi

Je dédie ce travail.

G. Thinhinane

Dédicace

A ma maman qui m'a tant soutenue pendant toutes

Ces longues années d'études

A mon père

A mes sœurs

A mes frères

A tous mes amis

A toute ma famille Bachene

A tous mes camarades

A tous ceux que j'ai connu durant

Toutes mes études :

A tous ceux pour qui je compte et qui comptent pour moi

Je dédie ce travail.

B. Sabah

Mots clés

Génératrice asynchrone auto-excitée, auto-amorçage, modélisation, régime saturé, charge déséquilibrée, l'inductance magnétisante.

Résumé

L'essor des énergies renouvelables, en réponse à la crise climatique et à la raréfaction des ressources fossiles, met en avant l'énergie éolienne pour sa contribution significative à la production d'électricité durable. Ce travail de mémoire explore les éoliennes, avec un focus sur la modélisation et la simulation des génératrices asynchrones auto-excitées. L'introduction du phénomène de saturation du circuit magnétique dans le modèle est nécessaire pour le fonctionnement en autonome. La simulation du générateur asynchrone auto excite sous Matlab/Simulink permet d'étudier le comportement de la génératrice asynchrone auto excite pour différent type de charge dans les deux régimes de fonctionnement à savoir les régimes équilibrée et déséquilibré.

Abstract

The rise of renewable energies, in response to the climate crisis and the scarcity of fossil resources, highlights wind energy for its significant contribution to the production of sustainable electricity. This dissertation explores wind turbines in which we focus on the modeling and simulation of self-excited asynchronous generators. The introduction of the saturation phenomenon of the magnetic circuit into the model is necessary for autonomous operation. The simulation of the self-excited asynchronous generator using Matlab/Simulink allows us to study the behavior of the self-excited asynchronous generator for different types of load in the two operating regimes, namely the balanced and unbalanced regimes.

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les éoliennes	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Historique et avenir de l’Energie éolienne	3
I.3.Definition d’une énergie éolienne.....	4
I.4.Principaux composants d’une éolienne	5
I.4.1. Le mat.....	5
I.4.2. La nacelle	6
I.5.Principe de fonctionnement d’une éolienne.....	8
I.6.Mode d’installations d’une éolienne	8
I.7.Différents type d’éolienne	8
I.7.1. Éolienne a axe horizontal	8
I.7.2. Éolienne a axe vertical	9
I.7.2.1. Darrieus	9
I.7.2.2. Savonius	9
I.8. Les avantages et les inconvénients de l’énergie éolienne	10
I.8.1. Avantages	10
I.8.2. Inconvénients	10
I.9. Caractéristique du vent.....	11
I.10. Classification des turbines selon leurs puissances et leur dimension	11
I.11. Type des machines asynchrones utiliser dans le système éolienne.....	12
I.11.1. Machine asynchrone à cage	12
I.11.2. Machine asynchrone à rotor bobiné	12
I.12. Classification des éoliennes selon la vitesse de rotation.....	12
I.12.1. Aérogénérateur à vitesse variable.....	12
I.12.2. Aérogénérateur à vitesse fixe	13
I.13. Application des éoliennes	13
I.13.1. Systèmes isolés.....	13
I.13.2. Systèmes hybrides.....	13
I.13.3. Système intègre au réseau	13

I.14. L'intérêt de l'Algérie aux énergies renouvelables	14
I.15. Conclusion	15
Chapitre II : Modélisation du générateur asynchrone en régime linéaire et saturé	
II.1. Introduction	16
II.2. Le modelé linaire	16
II.2.1. Modèle de la machine asynchrone dans le repère triphasé	17
II.2.1.1. Définition des angles	17
II.2.1.2. Equations électriques de la machine asynchrone.....	18
II.2.1.3. Equations magnétiques de la machine asynchrone.....	19
II.2.2. Modelé de la machine dans le repère de Park.....	20
II.2.2.1. Transformation de Par.....	20
II.2.2.2. Les équations magnétiques dans les axes (d et q).....	22
II.2.2.3. Les équations électriques dans les axes (d et q).....	23
II.2.3. Choix de référentiel (d et q)	25
II.2.4. Schéma équivalent.....	26
II.2.5. Etude du phénomène de l'auto-amorçage à vide	27
II.2.5.1. Description du phénomène d'auto-amorçage	29
II.2.5.2. Equation d'auto-amorçage dans le régime dynamique.....	30
II.2.6. Le schéma et les Résultats de la simulation.....	31
II.3. Modélisation en régime saturé	33
II.3.1. Technique de prise en compte de la saturation magnétique.....	34
II.3.2. Mise en œuvre du modèle saturé	35
II.3.3. Schéma et résultat de simulation du générateur asynchrone en régime saturée.....	38
II.3.4. Influence de la capacité sur la tension d'auto-amorçage	41
II.3.5. Influence de la vitesse sur la tension d'auto-amorçage	42
II.4. Conclusion.....	43
Chapitre III : Fonctionnement en charge du générateur Asynchrone	
III.1. Introduction	44
III.2. Fonctionnement en charge.....	44
III.3. Charge équilibrée	45

III.3.1. Simulation du générateur asynchrone sur charge résistive $RC=50\Omega$	45
III.3.2. Le schéma et Les résultats de la simulation	47
III.3.3. Simulation du générateur asynchrone sur charge inductive $L=0.12H$	48
III.3.4. Les résultats de la simulation	51
III.4. Charge déséquilibrée	53
III.4.1. Simulation du générateur asynchrone sur charge R	53
III.4.2. Simulation du générateur asynchrone sur charge RL.....	53
III.4.3. Le schéma et Les résultats de la simulation charge R.....	54
III.4.4. Les résultats de la simulation charge RL.....	55
III.5. Conclusion.....	57
Conclusion général.....	58

Chapitre I : Généralité sur les éoliennes

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Figure I.2 : Le composant d'une éolienne	6
Figure I.3 : La nacelle d'une éolienne	7
Figure I.4 : Turbine éolienne en amont et en aval.....	9
Figure I.5 : Les types du rotor verticaux d'une éolienne	10
Figure I.6 : Evolution des turbines éoliennes selon leurs dimension.....	11
Figure I.7 : Les énergies renouvelable en Algérie.....	14

Chapitre II : Modalisation du générateur asynchrone en régime linéaire et sature

Figure II .1 : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée	17
Figure II .2 : Repérage angulaire du système (d, q)	20
Figure II .3 : Schème équivalent en régime dynamique de la machine asynchrone d'un référentiel arbitraire axe d	26
Figure II .4 : Schème équivalent en régime dynamique de la machine asynchrone d'un référentiel arbitraire axe q	27
Figure II .5 : Schème équivalent par phase en régime permanente de la génératrice asynchrone auto amorcée	27
Figure II .6 : Schéma réduire de la génératrice auto amorcée	28
Figure II .7 : Auto amorçage du générateur asynchrone	29
Figure II .8 : Schéma du principe de l'auto amorçage du générateur asynchrone.....	30
Figure II .9 : Evolution des courants statoriques à vide en régime linéaire	32
Figure II .10 : Evolution des tensions statoriques en régime linéaire	33
Figure II .11 : Courbe de la première alimentation d'un matériau ferromagnétique	35
Figure II .12 : Evolution des inductances statique et dynamique en fonction du courant magnétisent lorsque on considère un régime saturé	39
Figure II .13 : Evolution de la tension statorique en fonction du temps en régime saturée	40

Figure II .14 : Evolution des coutants statorique en fonction du temps en régime saturée	40
Figure II .15 : Evolution des courant magnétisent en fonction du temps en régime saturée....	41
Figure II .16 : Evolution des courants rotoriques en fonction du temps en régime saturée	41
Figure II .17 : Influence de la capacité sur la tension statorique des générateurs	42
Figure II .18 : Influence de la vitesse sur la tension statorique du générateur	42
Figure II .19 : Phénomène d’auto amorçage	43

Chapitre III : Fonctionnement en charge du générateur asynchrone Asynchrone

Figure III .1 : Schéma de principe de fonctionnement en charge.....	44
Figure III .2 : Evolution des tensions statoriques	47
Figure III.3 : Les courants statorique	48
Figure III.4 : Les courant rotorique	48
Figure III.5 : Les tension statorique	52
Figure III.6 : Les courants statorique	52
Figure III.7 : Les courants de charge	52
Figure III.8 : Les courants rotorique	53
Figure III.9 : Les tension statorique.....	55
Figure III.10 : Les courants statorique	55
Figure III.11 : Les courant rotorique	56
Figure III.12 : Les tension statorique.....	56
Figure III.13 : Les courants statorique	56
Figure III.14 : Les courants de charge	57
Figure III.15 : Un zoom sur les courants de la charge.....	57
Figure III .16 : Les courants rotorique	57

Introduction générale

Introduction générale

L'essor des énergies renouvelables est devenu une nécessité impérieuse dans le contexte actuel de crise climatique et de raréfaction des ressources fossiles. Parmi ces énergies, l'énergie éolienne se distingue par son potentiel immense et sa contribution significative à la production d'électricité durable. Les éoliennes, qui convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique, jouent un rôle central dans cette transition énergétique. Dans ce cadre nous nous sommes intéressées à un cas d'application particulier qui est le générateur asynchrone autonome, élément essentiel de systèmes éoliens en sites isolés et non reliés au réseau électrique. Il est fréquemment utilisé dans les systèmes éoliens pour sa robustesse, son faible coût et sa simplicité de maintenance.

Le premier chapitre présente des généralités sur les éoliennes. Nous rappellerons leur fonctionnement, les différents types d'éoliennes existants, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Les éoliennes sont classées principalement en deux catégories : les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical. Les éoliennes à axe horizontal, les plus couramment utilisées, offrent une efficacité énergétique supérieure et sont adaptées à des installations à grande échelle. Elles utilisent une configuration où le rotor est orienté parallèlement au sol, permettant de capter les vents forts et constants des hautes altitudes. Ces éoliennes sont dotées de pales aérodynamiques conçues pour maximiser la conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique [3].

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation de l'auto-amorçage à vide du générateur asynchrone. Pour observer le comportement de la machine à travers les différentes grandeurs électriques notamment les courants et la tension deux modèles sont établis ; le modèle linéaire part du principe que le matériau magnétique ne se sature pas, le système d'équations obtenu est associé aux équations décrivant la source d'énergie réactive nécessaire à l'auto-amorçage. Cette source est un banc de condensateurs branchés aux bornes du stator. Cependant, cette approche peut ne pas être suffisamment précise dans des conditions de fonctionnement réelles [4].

Le second modèle tient compte de l'effet de saturation à travers la variation des inductances en fonction du courant magnétisant. La simulation du modèle sous MATLAB montre que la considération du phénomène de saturation est indispensable pour décrire l'amorçage d'un générateur asynchrone sans la présence de réseau électrique.

Le troisième chapitre se concentre sur le fonctionnement en charge équilibrée et déséquilibrée du générateur asynchrone auto-amorçé. Cette analyse est cruciale pour comprendre comment ces générateurs se comportent dans des conditions de charge réelles, qui peuvent souvent être déséquilibrées en raison de fluctuations du vent ou de variations de la demande électrique. Nous étudions les effets des charges équilibrées et déséquilibrées sur des paramètres clés tels que le glissement, le courant d'induit, le couple électromagnétique, et le rendement du générateur. Les charges équilibrées permettent de maintenir un fonctionnement stable et efficace, tandis que les charges déséquilibrées peuvent entraîner des vibrations, des pertes accrues, et une diminution de la durée de vie des équipements. Des simulations détaillées sont réalisées pour illustrer ces effets et proposer des stratégies pour minimiser les impacts négatifs des déséquilibres de charge, en optimisant ainsi la performance et la fiabilité des génératrices dans les systèmes éoliens [4].

CHAPITRE I

Généralités sur les Éoliennes

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est devenue une réalité incontournable à l'échelle mondiale. Depuis 1980 la capacité de production d'électricité grâce aux éoliennes n'a cessé de croître. L'industrie éolienne se positionne désormais comme un élément clé de la production énergétique offrant une solution propre et renouvelable.

Face au défi du réchauffement climatique, les pays du monde entier investissent massivement dans la recherche et le développement des nouvelles technologies afin de réduire les coûts et d'augmenter les capacités de production éolienne. Ainsi, le potentiel énergétique mondial de cette source est estimé à une puissance 5300 TWh ce qui la rend non seulement significative mais aussi très prometteuse en tant que ressource énergétique [1]. Actuellement une grande partie des éoliennes utilise les machines asynchrones à vitesse variable. Elles permettent de mieux contrôler les ressources éoliennes pour les différentes conditions de vent [2].

I.2. Historique et avenir de l'énergie éolienne

Pendant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique, notamment par les moulins à vent. Les meuniers utilisaient ces moulins pour transformer le blé en farine, tandis qu'en Hollande, ils servaient à l'assèchement des polders. Ensuite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a produit de l'électricité dans des régions reculées non-connectées à un réseau électrique. Ces installations, sans stockage d'énergie, nécessitaient une synchronisation entre le besoin en énergie et la présence de vent. L'avènement des batteries a permis de stocker l'énergie éolienne pour une utilisation ultérieure, même en l'absence de vent, bien que ces systèmes étaient initialement réservés à des usages domestiques et non industriels.

Depuis les années 1990, les avancées technologiques ont permis de développer des aérogénérateurs de plus de 5 MW, et des éoliennes de 10 MW sont en cours de conception. À la fin de 2010, la capacité éolienne installée dans le monde atteignait 193 GW. Cette même année, la Chine a investi 63 milliards de dollars dans l'éolien et les États-Unis 18 milliards de dollars, marquant une croissance de 34 % des investissements et une augmentation de 22 % de la puissance installée (soit 35,8 GW). Les pays en phase de premier investissement continuent de croître à des rythmes différents, avec des classements mouvants en termes de puissance installée. Cependant, la Chine et les pays occidentaux (Amérique et Europe) sont

les principaux investisseurs, suivis par des économies émergentes comme le Brésil, l'Inde et le Mexique [3].

En 2007, l'Allemagne avait 22,3 GW de puissance éolienne installée, les États-Unis 16,8 GW, l'Espagne 15,1 GW, l'Inde 8 GW, la Chine 6,1 GW et la France 2,4 GW (uniquement à terre). En 2008, les États-Unis sont devenus le premier pays en termes de capacité éolienne avec 25 170 MW installés, dépassant l'Allemagne (23 902 MW). Ce secteur employait environ 85 000 Américains. En 2010, la Chine a surpassé les États-Unis avec 42 GW de puissance installée, contre 40 GW pour les Américains [3].

En Afrique, le potentiel pour le développement de l'énergie éolienne est vaste, surtout dans le Nord, le long des côtes et en Afrique du Sud. À la fin de 2009, environ 96 % des installations éoliennes du continent (763 MW) se trouvaient en Egypte (430 MW), au Maroc (253 MW) et en Tunisie (54 MW). En Afrique du Sud, 7 000 MW étaient en développement [3].

I.3. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui n'est pas dégradée, géographiquement diffuse et corrélée aux saisons (la demande en électricité est plus élevée en hiver, période où les vents sont souvent les plus forts). Elle ne produit ni émissions atmosphériques ni déchets radioactifs. Cependant, sa disponibilité est imprévisible et sa capture complexe, nécessitant de grands mâts et pales (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) installés dans des zones dégagées pour éviter les turbulences.

Les matériaux utilisés pour fabriquer les différents composants (nacelle, mât, pales et multiplicateur) doivent être technologiquement avancés, ce qui les rend coûteux. L'énergie éolienne fait partie des nouvelles sources de production d'électricité, offrant une alternative fiable à l'énergie nucléaire sans prétendre la remplacer (la quantité d'énergie produite étant beaucoup plus faible). Les installations peuvent être terrestres ou, de plus en plus, en mer (fermes éoliennes offshore), où le vent est plus constant, les éoliennes moins visibles et les nuisances sonores réduites.[4]

La figure I.1 illustre le principe de conversion de l'énergie éolienne.

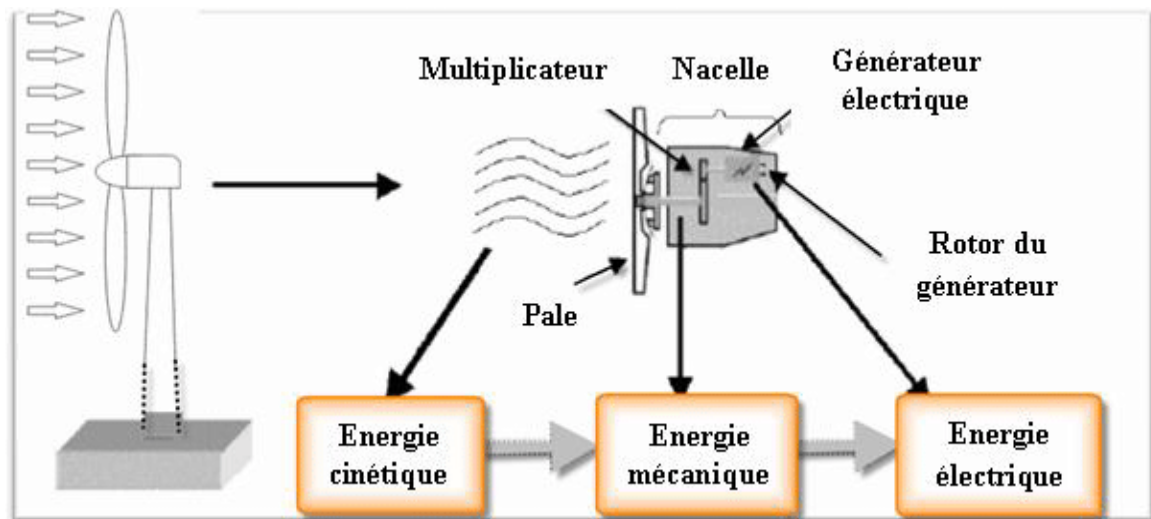


Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [3]

I.4. Principaux composants d'une éolienne

I.4.1. Le mat

Généralement en métal, le mât supporte tous les équipements nécessaires à la production d'électricité (nacelle et rotor). Il est fixé sur une fondation en béton lourdement ancrée dans le sol, assurant ainsi la stabilité de l'éolienne. Les mâts des éoliennes atteignent aujourd'hui 80 mètres de hauteur pour les modèles les plus puissants, voire exceptionnellement jusqu'à 100 mètres. Cette hauteur permet de capter des vents plus forts, moins perturbés par des obstacles tels que le relief, les arbres ou les bâtiments. La puissance fournie par une éolienne étant d'une éolienne proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

Il est crucial de placer les éoliennes à une certaine altitude. La tour doit être suffisamment robuste pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges importantes générées par le vent, tant la puissance exercée directement sur la tour que celle transmise par le rotor

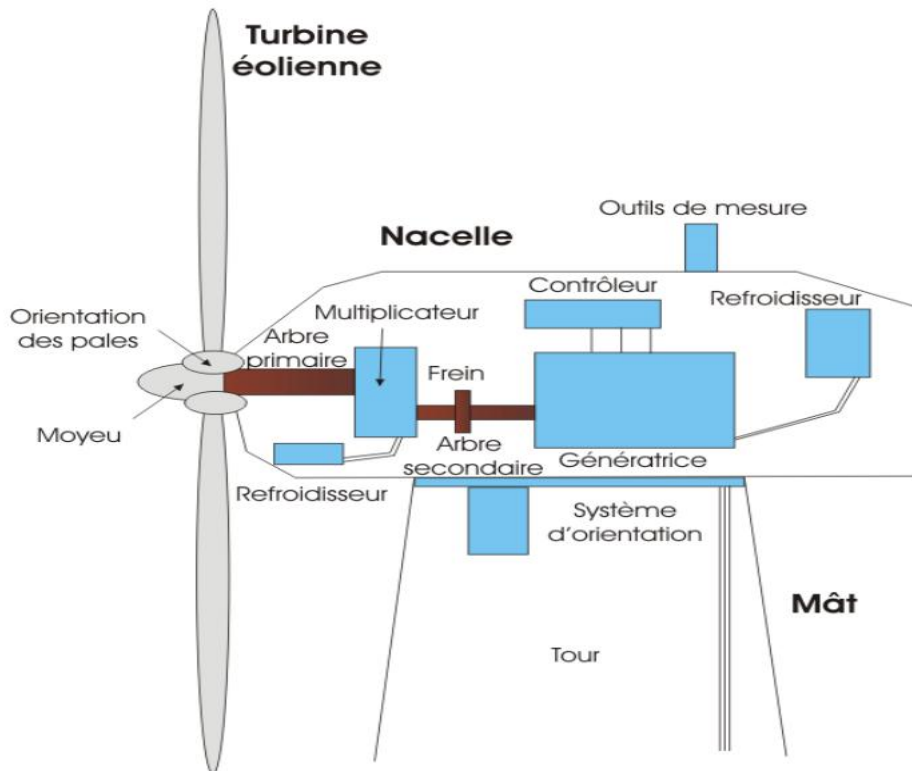


Figure I.2: Les composants d'une éolienne [3]

I.4.2. La nacelle

L'hélice et la nacelle sont reliées par le moyeu. La nacelle, située au sommet du mât, est un habitacle orientable qui maintient l'axe de l'hélice aligné avec la direction du vent. Elle abrite le générateur ainsi que toute la machinerie nécessaire pour transformer la rotation lente des pales en électricité. Cette machinerie permet également de superviser l'éolienne : diriger les pales en fonction de la force du vent et arrêter l'éolienne si nécessaire. Des girouettes sur le toit de la nacelle mesurent la direction moyenne du vent. Une attention particulière est portée à l'isolation acoustique de la nacelle pour réduire le bruit. La nacelle est orientée dans l'axe du vent et y est maintenue par un système de motorisation. Dans la nacelle, on trouve plusieurs composants essentiels qui permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en électricité. Voici les principaux éléments :

- ✓ **Rotor** : Le rotor, composé des pales, est relié au moyeu, qui à son tour est relié à l'arbre lent.
- ✓ **Arbre lent** : Cet arbre tourne à la vitesse de rotation des pales et transmet cette rotation à l'arbre rapide via le multiplicateur.

- ✓ **Multiplicateur de vitesse** : Il augmente la vitesse de rotation de l'arbre lent pour obtenir la vitesse nécessaire au fonctionnement du générateur.
- ✓ **Arbre rapide** : L'arbre rapide, qui tourne à une vitesse plus élevée, est connecté au générateur.
- ✓ **Générateur** : Le générateur convertit l'énergie mécanique de l'arbre rapide en énergie électrique. Les générateurs peuvent être synchrones ou asynchrones.
- ✓ **Systèmes de contrôle et de commande** : Ces systèmes surveillent et régulent le fonctionnement de l'éolienne, ajustant l'orientation des pales et de la nacelle en fonction de la direction et de la vitesse du vent.
- ✓ **Freins** : Il y a généralement deux types de freins : un frein à disque mécanique pour arrêter le rotor en cas d'urgence et un frein aérodynamique qui ajuste les pales pour réduire la vitesse du rotor.
- ✓ **Systèmes de refroidissement** : Ils dissipent la chaleur générée par le générateur et les autres composants électroniques.
- ✓ **Systèmes d'orientation** : Des moteurs d'orientation (yaw motors) ajustent la position de la nacelle pour que le rotor reste face au vent.
- ✓ **Systèmes d'alimentation et de communication** : Ils permettent de transmettre l'énergie produite et les données de fonctionnement à une station de contrôle au sol.
- ✓ **Girouettes et anémomètres** : Ces instruments mesurent la direction et la vitesse du vent, fournissant des données essentielles pour l'optimisation du fonctionnement de l'éolienne.

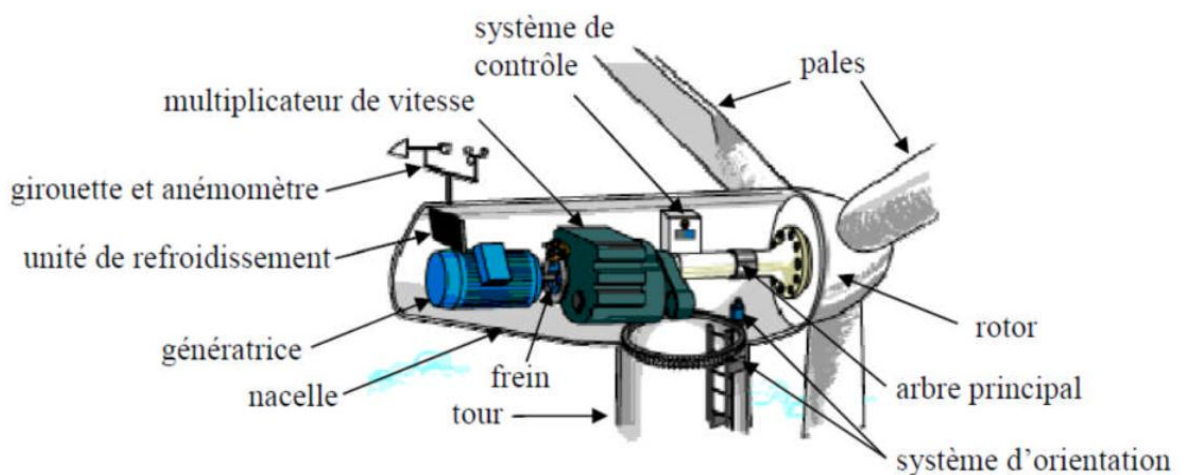


Figure I.3: La nacelle de l'éolienne [4]

I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne, également connue sous le nom de dispositif aérogénérateur, exploite l'énergie cinétique du vent en utilisant ses pales pour générer une rotation. Cette rotation entraîne un générateur qui convertit l'énergie mécanique en électricité. Pour faciliter l'intégration au réseau électrique, un système d'électronique de puissance est installé juste après le générateur, permettant ainsi la conversion et la transmission efficace de l'énergie électrique produite. Enfin, un transformateur élève la tension électrique produite pour qu'elle soit adaptée au transport vers les zones de consommation. [3]

I.6. Modes d'Installation d'une éolienne

Typiquement, il existe deux modes d'installation des éoliennes : premièrement, l'éolienne "individuelle" qui n'est pas connectée au réseau et est installée dans des sites isolés ; deuxièmement, les éoliennes regroupées sous forme de fermes éoliennes, érigées sur terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes "offshore", où le vent est plus constant. Les fermes "offshore" permettent de réduire les nuisances sonores et d'améliorer l'esthétique.

I.7. Différents types d'éoliennes

Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont :

I.7.1. L'éoliennes à axe horizontal

L'éolienne horizontale est le modèle le plus traditionnel et répandu, souvent observé le long des routes, symbolisant parfaitement l'énergie renouvelable. Elle capte le vent à l'aide de pales disposées en forme d'hélice, tournant autour d'un mât orienté horizontalement par rapport au sol, d'où son nom.

Dans ce type d'éolienne, la rotation des pales entraîne un générateur situé au sommet de la structure. Son principal avantage réside dans son rendement, surtout lorsqu'elle est équipée d'un système d'orientation des pales en fonction du vent. De plus, ces éoliennes sont généralement considérées comme robustes et nécessitent peu d'entretien. Cependant, leur inconvénient majeur est le bruit qu'elles produisent. De plus, l'installation peut être complexe en fonction de la hauteur du mât, ce qui doit être pris en compte lors du choix de ce type de dispositif.



Figure I.4 : Turbine éolienne horizontale [4]

I.7.2. L'éoliennes à axe vertical

Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée verticalement. L'un de ses principaux avantages est sa capacité à capturer les vents faibles et à produire de l'énergie même à des vitesses de vent plus légères. Sur le marché des éoliennes verticales, deux types se distinguent :

I.7.2.1. L'éolienne Darrieus

Cette éolienne repose sur un rotor en forme de H, cylindrique ou hélicoïdal, qui tourne autour d'une tige fixe. Elle présente de nombreux avantages, notamment la possibilité d'être installée dans des zones très venteuses et de produire peu de bruit par rapport à d'autres modèles sur le marché. Cependant, son inconvénient majeur est qu'elle nécessite un vent relativement fort pour démarrer et donc pour générer de l'énergie.

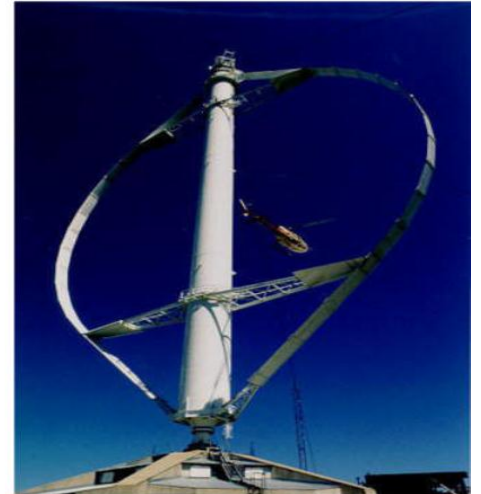
I.7.2.2. L'éolienne Savonius (hélicoïdale)

Ce type d'éolienne est particulièrement simple à installer car peu encombrant. Le principe repose sur deux demi-cylindres qui tournent, s'entraînant mutuellement, même avec

un vent très léger. Outre son esthétique moderne, qui séduit de nombreux installateurs, l'éolienne Savonius peut fonctionner efficacement même avec des vents très faibles, contrairement à l'éolienne Darrieus.[5]



Rotor de Savonius



Rotor de Darrieus

Figure I.5: Les types de rotor verticaux d'une éolienne [4]

I.8. Les avantages et les inconvénients de l'Énergie éolienne

L'énergie éolienne possède des avantages distincts qui favorisent son expansion et son développement parmi les autres sources d'énergie, ce qui la positionne pour jouer un rôle crucial dans l'avenir, à condition que les impacts générés par ses inconvénients soient atténués

I.8.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.

I.8.2. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients qu'il faut citer :

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor ;

- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel ;
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque

I.9. Caractéristiques du vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent varie selon les saisons et les zones géographiques, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s [3].

I.10. Classification des turbines selon leurs puissances et leurs dimensions

Une éolienne à diamètre petit extrait une énergie petite du vent, mais elle est moins exposée au danger des vents violents. Contrairement une éolienne à grand diamètre peut extraire une énergie importante du vent, mais les pales vu leur longueur, sont exposées aux dangers des vents violents. Une vrille mécanique dans la construction des pales permet de les protéger, c'est à dire que la surface qui sera exposée au bout de la pale est moins petite que celle exposée au bas de la pale [3]. La figure ci-dessous présente une classification des turbines éoliennes selon leur puissance délivrée :

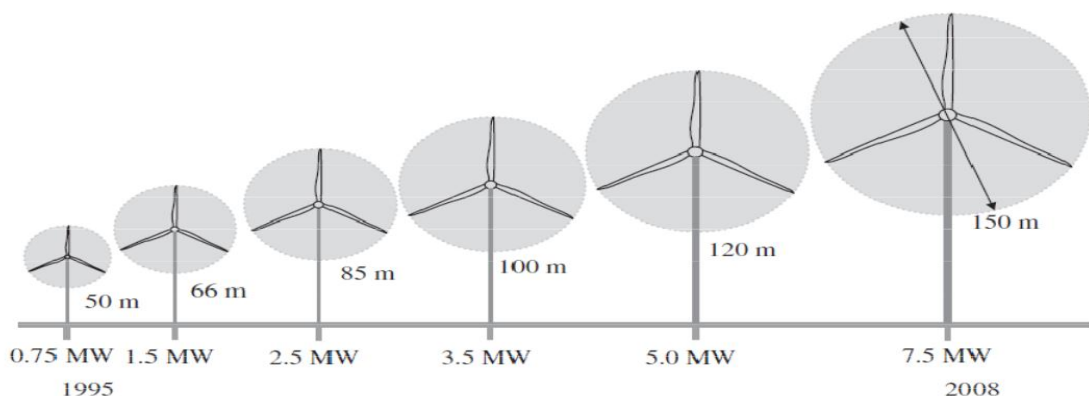


Figure I.6: Evolution des turbines éoliennes selon leurs dimensions [3]

I.11. Types des machines asynchrone utilisées dans le système éolien

Les machines asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles présentent de nombreux avantages tels que : la robustesse, la facilité de mise en œuvre on distingue deux types :

I.11.1. Machine à rotor cage

C'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde est un type de moteur électrique largement utilisé pour diverses applications industrielles, commerciales et résidentielles, son fonctionnement est basé sur le principe de l'induction électromagnétique. Lorsque le courant alternatif est appliqué au stator, un champ magnétique tournant est créé. Ce champ magnétique induit des courants électriques dans les barres conductrices du rotor, générant à son tour un champ magnétique propre. L'interaction entre le champ magnétique du stator et celui du rotor produit un couple électromagnétique qui fait tourner le rotor.

I.11.2. Machine asynchrone à rotor bobiné

Les machines asynchrones à rotor bobiné offrent un potentiel économique très attractif pour la variation de vitesse, malgré que ce soient une machine non standard et sa construction la plus complexe par rapport à une machine à cage. L'avantage principal de cette machine est l'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois [6].

I.12. Classification de l'éolienne selon la vitesse de rotation

I.12.1. Aérogénérateurs à vitesse variable

Le contrôle de la génératrice permet d'optimiser la capture de l'énergie pour les vents faibles et modérés. La génératrice peut être connectée au réseau de manière directe ou indirecte. Une interface de puissance ajuste la fréquence des courants du générateur à celle du réseau, permettant ainsi un fonctionnement à vitesse variable. En d'autres termes, l'utilisation de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau découple la fréquence du réseau électrique de la vitesse de rotation de la machine électrique. Grâce à l'amélioration de la qualité et à la réduction des coûts de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable sont de plus en plus courantes. [2]

I.12.2. Aérogénérateurs à vitesse fixe

Maintiennent une vitesse de rotation constante indépendamment de la force du vent. Moins complexes et moins onéreuses à produire et à entretenir que les éoliennes à vitesse variable, elles peuvent toutefois être moins efficaces dans des conditions de vent extrêmes ou faibles elles possèdent un système électrique plus simple [7]

I.13. Applications des éoliennes

Un système éolien peut être utilisée en trois applications distinctes :

I.13.1. Systèmes isolés

Ces systèmes isolés utilisent généralement un stockage d'énergie, souvent sous forme de batteries. Un dispositif de contrôle est nécessaire pour gérer la charge et la décharge des batteries. L'objectif principal du contrôleur de charge est de prévenir les dommages au système de batteries causés par des surcharges ou des décharges profondes. L'énergie éolienne est également utilisée pour alimenter des sites isolés, tels que :

- Produire de l'électricité sur les îles
- Pomper de l'eau dans les champs
- Fournir de l'électricité aux voiliers, phares et balises.

I.13.2. Systèmes hybrides

En général, les systèmes hybrides sont employés dans de petites installations destinées à desservir un plus grand nombre d'utilisateurs, utilisent plusieurs sources d'énergie. L'intégration de ces différentes sources complexifie le système et nécessite une optimisation de l'utilisation de chacune d'elles. Il est essentiel de contrôler toutes les sources d'énergie pour maximiser l'approvisionnement en énergie pour l'utilisateur telles que : des turbines éoliennes, des modules photovoltaïques.

I.13.3. Systèmes intégrés au réseau

Les systèmes raccordés au réseau ne nécessitent pas l'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie, toute l'électricité générée est directement acheminée vers le réseau électrique [2].

I.14. L'intérêt de l'Algérie dans les Energie renouvelable

D'ici 2030, l'Algérie aura le pouvoir de faire de grands investissements dans le secteur des énergies renouvelables, notamment dans l'énergie éolienne. Grâce à des stratégies adéquates, des investissements ciblés et des partenariats internationaux, le pays pourrait non seulement en tirer des avantages économiques, mais aussi jouer un rôle important dans la transition énergétique mondiale [8].

Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables

22 GW à l'horizon 2030

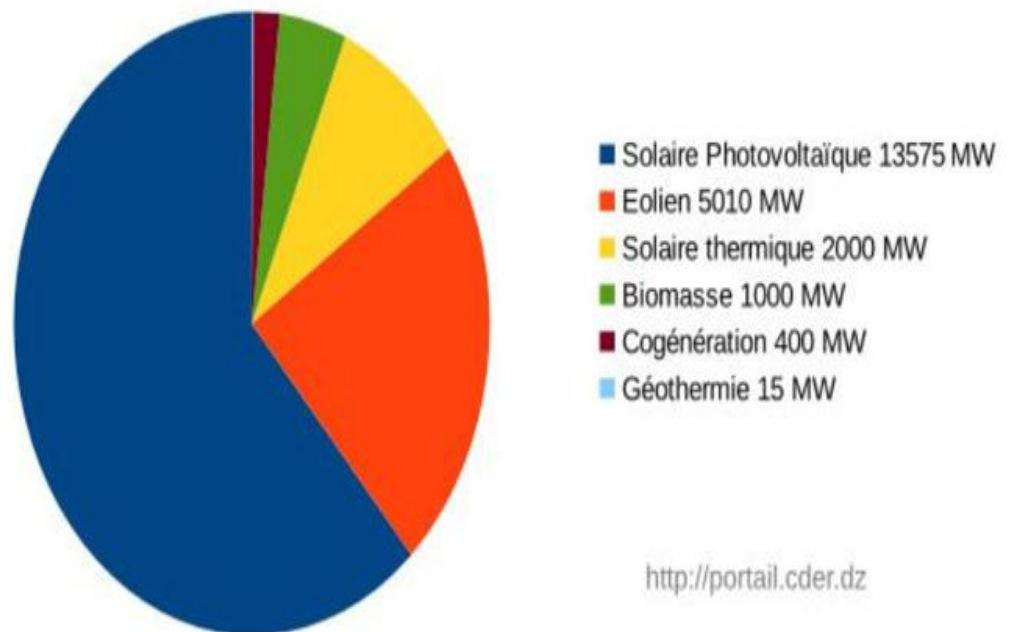


Figure I.7 : les Energie renouvelable en Algérie [8]

Le schéma illustre les objectifs du programme algérien des énergies renouvelables à l'horizon 2030, visant une capacité totale de 22 GW. L'énergie éolienne (éolien) constitue 5010 MW de cette capacité. L'Algérie bénéficie de conditions climatiques favorables pour l'énergie éolienne dans certaines régions, notamment dans les zones côtières où les vents sont

plus constants et plus forts. L'énergie éolienne joue un rôle essentiel dans le programme algérien des énergies renouvelables pour 2030. Son développement contribuera à la diversification énergétique, à la réduction des émissions de CO₂ et à la sécurité énergétique du pays. Les investissements et les politiques de soutien seront déterminants pour surmonter les défis associés à cette technologie.

I. Conclusion

Dans ce chapitre dédié à l'éolienne, nous avons présenté le fonctionnement ainsi que les composants fondamentaux de cette technologie de production d'énergie renouvelable. Nous avons vu les principes de base de conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité, mettant en évidence l'importance des pales, du rotor, du générateur et du système de contrôle. Les pales, en captant l'énergie du vent, transfèrent cette énergie au rotor qui la convertit en mouvement rotatif. Le générateur transforme ensuite ce mouvement en électricité. Le système de contrôle garantit que l'éolienne fonctionne de manière optimale en ajustant constamment l'orientation et la vitesse de rotation. De plus, nous avons exploré les différentes variantes d'éoliennes, incluant les modèles à axe horizontal et à axe vertical. Les éoliennes à axe horizontal, les plus courantes, sont particulièrement efficaces dans les zones où les vents sont forts et constants. Les éoliennes à axe vertical, bien que moins répandues, offrent des avantages spécifiques, comme une meilleure performance dans des conditions de vent variable et une maintenance plus facile en raison de leur structure plus accessible.

À la fin de ce chapitre, nous avons exploré l'avenir de l'énergie éolienne en Algérie, en soulignant son potentiel grâce à des ressources géographiques favorables.

CHAPITRE II

Modélisation du Générateur Asynchrone en Régime linéaire et Saturé

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, Il s'agit de construire le modèle dynamique en régime linéaire du générateur asynchrone auto-amorcé à partir des équations électriques et magnétiques fondamentales de la machine. Ces équations sont formulées dans le repère triphasé, ensuite ramenées dans un référentiel diphasé (d, q) équivalent en utilisant la transformation de Park.

Par la suite, nous expliquerons le processus d'auto-amorçage du générateur asynchrone. Ce processus implique l'utilisation d'un banc triphasé de condensateurs pour initier son démarrage. Nous examinerons les étapes clés de ce processus et mettrons en lumière son importance dans le fonctionnement global de la génératrice.

Nous présenterons en détail le modèle phénomène d'auto-amorçage. Ce modèle théorique permet de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents qui permettent au générateur de s'auto-exciter et de générer du courant électrique de manière autonome. Nous discuterons des conditions requises pour déclencher ce phénomène et explorerons les facteurs qui influencent son efficacité

Dans ce chapitre, nous aborderons la nécessité d'intégrer la saturation dans le modèle [7]. Nous détaillerons les méthodes pour prendre en compte ce phénomène complexe et fournirons des calculs détaillés à cet égard. En outre, nous procéderons à une comparaison entre les résultats du modèle linéaire et ceux du modèle saturé afin d'illustrer de manière concise l'importance incontournable de prendre en considération la saturation.

II.2. Modèle linéaire

Dans ce modèle, les équations qui décrivent le comportement de la génératrice sont linéaire, ce qui facilite les calculs et la résolution, mais peut entraîner des écarts significatifs par rapport au comportement réel de la machine dans certaines situations.

Dans le modèle linéaire, les équations qui décrivent les relations entre les grandeurs électriques (tension, courant) et magnétiques (flux magnétique, excitation) sont simplifiées pour être linéaires [8]. Cela permet d'utiliser des outils mathématiques plus simples pour résoudre les problèmes liés au générateur, mais il faut garder à l'esprit que les résultats obtenus peuvent être moins précis ou loin du fonctionnement réel de la machine.

II.2.1. Modèle de la machine asynchrone dans le repère triphasé

La modélisation linéaire de la machine asynchrone en mode générateur peut être effectuée en utilisant la représentation en espace d'état. Les équations d'état sont obtenues en considérant les équations électriques et mécaniques du système.

La configuration de la machine asynchrone que nous examinerons est illustrée par le schéma ci-dessous :

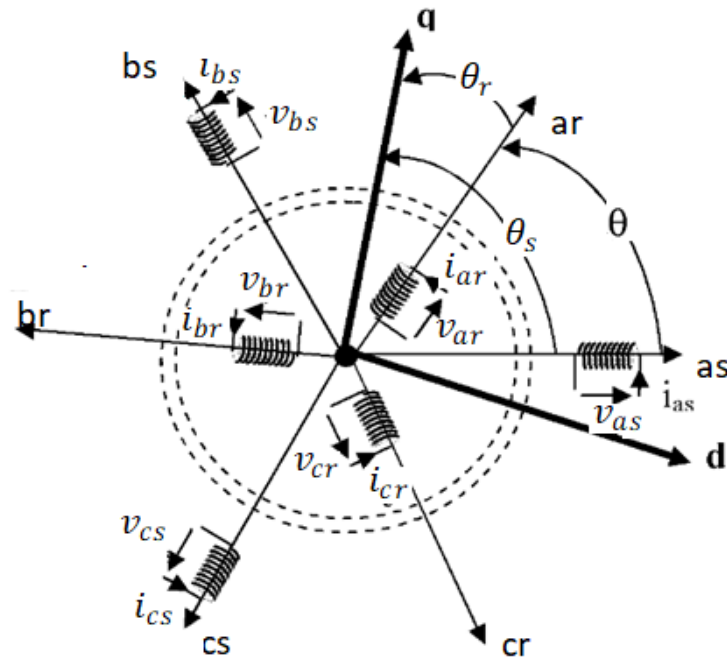


Figure II.1 : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

- Les enroulements du stator et du rotor sont tous deux cylindriques, Et ils sont représentés sur leur axe magnétique.
- La machine est représentée sur un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.
- Les angles et les vitesses sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

II.2.1.1. Définitions des angles

$$\theta_s = (Oa_s, Oq)$$

$$\theta_r = (Oa_r, Oq)$$

$$(Ob_s, Oq) = \theta_s - \frac{2\pi}{3}$$

$$(Ob_r, Oq) = \theta_r - \frac{2\pi}{3}$$

$$(Oc_s, Oq) = \theta_s - \frac{4\pi}{3}$$

$$(Oc_r, Oq) = \theta_r - \frac{4\pi}{3}$$

$$(Oa_s, Oa_r) = \theta_s - \theta_r = \theta$$

II.2.1.2. Equations électriques de la machine asynchrone

La relation entre les tensions aux bornes des résistances des enroulements, les courants et les variations des flux totalisés dans leurs repères respectifs est donnée comme suit :

- Au stator :

$$[v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (\text{II. 1})$$

- Au rotor:

$$[v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad (\text{II. 2})$$

Où :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}$$

$[v_s]$ et $[v_r]$ sont les vecteurs tensions respectivement du stator et du rotor.

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

$[\varphi_s]$ et $[\varphi_r]$ sont les vecteurs flux magnétiques captés par les enroulements du stator et du rotor

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$[i_s]$ et $[i_r]$ sont les vecteurs de courant respectifs du stator et du rotor.

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

$[R_s]$ et $[R_r]$ sont respectivement les matrices résistances du stator et du rotor

La formulation explicite des systèmes (II.1) et (II.2) donne :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \left(\frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 3})$$

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \left(\frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 4})$$

II.2.1.3. Equations magnétiques de la machine asynchrone

Les flux réels liés aux phases statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des courants et des matrices d'inductances sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{aligned} [\varphi_s] &= [L_{ss}] [i_s] + [M_{sr}(\theta)] [i_r] \\ [\varphi_r] &= [L_{rr}] [i_r] + [M_{rs}(\theta)] [i_s] \end{aligned} \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II. 7})$$

$$[M_{sr}(\theta)] = M_{sr}[R(\theta)] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

$$[M_{rs}(\theta)] = [M_{sr}(\theta)]^T = M_{sr}[R(\theta)]^T \quad (\text{II. 9})$$

- l_s et l_r sont les inductances propres des phases statorique respectivement rotorique
- M_s Est la mutuelles inductance entre deux phases statoriques distinctes.
- M_r Est la mutuelles inductance entre deux phases rotoriques distinctes.
- M_{sr} Est la mutuelle inductance maximale entre une phase du stator et une phase du rotor lorsque leurs axes coïncident.
- $[R(\theta)]$ Est la matrice de rotation qui permet de projeter les grandeurs rotoriques dans le repère statorique en fonction de la position du rotor.

En remplaçant les flux par leurs expressions dans les systèmes (II.1) et (II.2), on obtient :

$$\begin{aligned} [v_s] &= [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}][i_s] + [M_{sr}(\theta)][i_r]] \\ [v_r] &= [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}][i_r] + [M_{rs}(\theta)][i_s]] \end{aligned} \quad (\text{II. 10})$$

La machine asynchrone est ainsi modélisée en utilisant deux repères séparés ; un pour exprimer les grandeurs statoriques et un autre pour les grandeurs rotoriques. Ces deux repères sont liés par l'angle θ qui est la position du rotor par rapport au stator. On a donc un système d'équations avec des coefficients variables.

II.2.2. Modèle de la machine dans le repère de Park

II.2.2.1. Transformation de Park

Pour obtenir des équations différentielles avec des coefficients constants, on a recouru à la transformation de Park. Bien que datant de 1929, cette transformation redevient pertinente grâce aux avancées technologiques permettant désormais une exécution en temps réel. Elle substitue aux trois enroulements de la machine asynchrone (MAS) à deux enroulements en quadrature tout en conservant les amplitudes, simplifiant ainsi le système.[1]

Les positions angulaires des axes sont données comme suit :

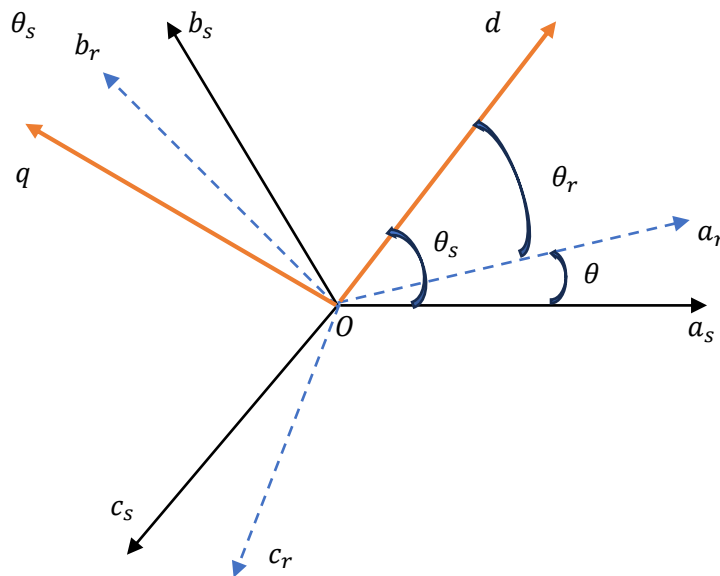


Figure II.2 : Repérage angulaire du système d'axes (d, q)

On définit les angles :

$$\begin{cases} \theta_s = (O_{a_s}, O_d) \\ \theta_r = (O_{a_r}, O_d) \\ \theta = (O_{a_s}, O_{a_r}) \\ \frac{\pi}{2} = (O_d, O_q) \end{cases}$$

θ_s Est l'angle électrique entre l'axe d et l'axe de la phase a du stator.

θ_r Est l'angle électrique entre l'axe d et l'axe de la phase a du rotor.

θ Est la position du rotor par rapport au stator elle donné par la relation :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (\text{II. 11})$$

Exprimer le modèle de la machine dans le repère diphasé revient à effectuer deux transformations ; une transformation $[P(\theta_s)]$ d'angle θ_s pour ramener les grandeurs du stator dans le repère généralisé de Park et une transformation $[P(\theta_r)]$ d'angle θ_r pour y ramener les grandeurs rotoriques.

- Au stator

$$[X_{ps}] = [P(\theta_s)][X_s] \rightarrow [X_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[X_{ps}] \quad (\text{II. 12})$$

$$[X_{ps}] = \begin{bmatrix} X_{ds} \\ X_{qs} \\ X_{os} \end{bmatrix}, \quad [X_s] = \begin{bmatrix} X_{as} \\ X_{bs} \\ X_{cs} \end{bmatrix}$$

- Au rotor

$$[X_{pr}] = [P(\theta_r)][X_r] \rightarrow [X_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[X_{pr}] \quad (\text{II. 13})$$

$$[X_{pr}] = \begin{bmatrix} X_{dr} \\ X_{qr} \\ X_{or} \end{bmatrix}, \quad [X_r] = \begin{bmatrix} X_{ar} \\ X_{br} \\ X_{cr} \end{bmatrix}$$

On utilise la matrice de Park modifiée qui repose sur l'invariance de la puissance instantanée dans les deux systèmes de représentation (a, b, c) et (d, q) et conduit à leur équivalence.

Une matrice unique de transformation est définie pour les courants, les tensions et les flux.

- Matrice de passage directe :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 14})$$

- Matrice de passage inverse :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 15})$$

II.2.2.2. Equations magnétiques dans les axes (d et q)

A partir des expressions matricielles des flux (II.5), on fait introduit les grandeurs du repère de Park en utilisant la matrice inverse de Park [9] :

$$\begin{aligned} [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{ps}] &= [L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1}[i_{ps}] + [M_{sr}(\theta)][P(\theta_r)]^{-1}[i_{pr}] \\ [P(\theta_r)]^{-1}[\varphi_{pr}] &= [L_{rr}][P(\theta_r)]^{-1}[i_{pr}] + [M_{rs}(\theta)][P(\theta_s)]^{-1}[i_{ps}] \end{aligned} \quad (\text{II. 16})$$

En multipliant par la transformée de Park :

$$\begin{aligned} [\varphi_{ps}] &= \{[P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1}\}[i_{ps}] + \{[P(\theta_s)][M_{sr}(\theta)][P(\theta_r)]^{-1}\}[i_{pr}] \\ [\varphi_{pr}] &= \{[P(\theta_r)][L_{rr}][P(\theta_r)]^{-1}\}[i_{pr}] + \{[P(\theta_r)][M_{rs}(\theta)][P(\theta_s)]^{-1}\}[i_{ps}] \end{aligned} \quad (\text{II. 17})$$

$$[P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1} = [L_{ps}] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_{os} \end{bmatrix},$$

$$[P(\theta_r)][L_{rr}][P(\theta_r)]^{-1} = [L_{pr}] = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_{or} \end{bmatrix}$$

$$[P(\theta_s)][M_{sr}(\theta)][P(\theta_r)]^{-1} = [M_{psr}] = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[P(\theta_s)][M_{rs}(\theta)][P(\theta_r)]^{-1} = [M_{psr}]^T = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Finalement on aboutit à la relation matricielle entre les vecteurs flux et courants définissant les couplages du modèle équivalent dans le repère diphasé :

$$\begin{aligned} [\varphi_{ps}] &= [L_{ps}][i_{ps}] + [M_{psr}][i_{pr}] \\ [\varphi_{pr}] &= [L_{pr}][i_{pr}] + [M_{psr}]^T[i_{ps}] \end{aligned} \quad (\text{II. 18})$$

Où :

$L_s = l_s - M_s$: inductance propre cyclique du stator

- $L_r = l_r - M_r$: inductance propre cyclique du rotor
- $L_{os} = l_s - 2M_s$: Inductance homopolaire au stator
- $L_{or} = l_r - 2M_r$: Inductance homopolaire au rotor
- $L_m = \frac{3}{2}M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor

L'écriture explicite du système matricielle (II.17) est :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{os} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{os} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{or} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 19})$$

Décomposable en trois sous-systèmes matriciels comme suit :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 19. a})$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 19. b})$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{os} \\ \varphi_{or} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{os} & 0 \\ 0 & L_{or} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{os} \\ i_{or} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 19. c})$$

II.2.2.3. Equations électriques dans les axes (d et q) :

En procédant de la même manière que pour les équations magnétiques, on écrit :

$$\begin{aligned} [P(\theta_s)]^{-1}[v_{ps}] &= [R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{ps}] + \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{ps}] \right] \\ [P(\theta_r)]^{-1}[v_{pr}] &= [R_r][P(\theta_r)]^{-1}[i_{pr}] + \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_r)]^{-1}[\varphi_{pr}] \right] \end{aligned} \quad (\text{II. 20})$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{ps}] \right] &= [P(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} [\varphi_{ps}] + \frac{d[P(\theta_s)]^{-1}}{dt} [\varphi_{ps}] \\ \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_r)]^{-1}[\varphi_{pr}] \right] &= [P(\theta_r)]^{-1} \frac{d}{dt} [\varphi_{pr}] + \frac{d[P(\theta_r)]^{-1}}{dt} [\varphi_{pr}] \end{aligned} \quad (\text{II. 21})$$

En multipliant par la matrice de Park et en tenant compte des relation (II.21), on aura :

$$\begin{aligned} [v_{ps}] &= [R_s][i_{ps}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{ps}] + [P(\theta_s)] \frac{d[P(\theta_s)]^{-1}}{dt} [\varphi_{ps}] \\ [v_{pr}] &= [R_r][i_{pr}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{pr}] + [P(\theta_r)] \frac{d[P(\theta_r)]^{-1}}{dt} [\varphi_{pr}] \end{aligned} \quad (\text{II. 22})$$

On effectue le produit matriciel :

$$[P(\theta_{s,r})] \frac{d[P(\theta_{s,r})]^{-1}}{dt} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{d}{dt}(\theta_{s,r}) \quad (\text{II. 23})$$

On obtient finalement un système d'équations dans le référentiel de Park qui constitue le modèle dynamique équivalent de la machine asynchrone.

- Au stator :

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \frac{d\theta_s}{dt} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \frac{d\theta_s}{dt} \\ v_{os} &= R_s i_{os} + \frac{d\varphi_{os}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II. 24})$$

- Au rotor :

$$\begin{aligned} v_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \frac{d\theta_r}{dt} \\ v_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \frac{d\theta_r}{dt} \\ v_{or} &= R_r i_{or} + \frac{d\varphi_{or}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II. 25})$$

De par la structure de la machine et celle des enroulements triphasés qui confèrent la nullité aux sommes des courants statoriques et rotoriques, les composantes homopolaires d'indice (o) se trouvent nulles. D'où le système d'équations de tensions :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \frac{d\theta_s}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \frac{d\theta_s}{dt} \\ v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \frac{d\theta_r}{dt} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

Soient :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = \omega_s - \omega_m$$

Le modèle diphasé tel qu'il est établi, est dans un référentiel lié au champ tournant. Pour l'exprimer dans un référentiel généralisé, on part du principe que les axes (d, q) tournent à une vitesse arbitraire notée ω_a telle que : $\omega_a = \frac{d\theta_s}{dt}$

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_a \varphi_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_a \varphi_{ds} \\ v_{dr} &= 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_m) \varphi_{qr} \\ v_{qr} &= 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_m) \varphi_{dr} \end{aligned} \quad (\text{II. 27})$$

II.2.3. Choix du référentiel (d, q) :

Jusqu'à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère (d, q) qui fait un angle électrique θ_s avec le stator et qui fait un angle électrique θ_r avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est à dire qu'il est arbitraire. Il existe trois choix possibles concernant le choix de l'orientation du repère d'axes (d, q), qui dépendent des objectifs de l'application [9]

- Dans le référentiel immobile par rapport au stator :

Ce référentiel est utile pour étudier des variations importantes de la vitesse de rotation.

$$\begin{aligned} \omega_a &= \frac{d\theta_s}{dt} = 0, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m \\ \left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{array} \right. & \left| \begin{array}{l} v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_m \varphi_{qr} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \omega_m \varphi_{dr} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (\text{II. 28})$$

- Dans le référentiel immobile par rapport au rotor :

Ce référentiel est utile pour l'étude des exemples où la vitesse de rotation peut être considérée comme constante.

$$\begin{aligned} \omega_a &= \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_m, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_m \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_m \varphi_{ds} \end{array} \right. & \left| \begin{array}{l} v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (\text{II. 29})$$

- Dans le référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est utile pour l'étude des exemples où la fréquence d'alimentation est constante.

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_a, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = (\omega_s - \omega_m)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \end{array} \right\} \quad (\text{II.30})$$

ω_a Est la vitesse électrique arbitraire du repère (d, q),

ω_m Est la vitesse électrique du rotor,

ω_r Est la pulsation des grandeurs rotoriques.

Le modèle diphasé de la machine asynchrone établi dans le référentiel lié au stator est obtenu en combinant les systèmes d'équations (II.28), (II.19.a) et (II.19.b) :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_m L_m & R_r & \omega_m L_r \\ -\omega_m L_m & 0 & -\omega_m L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{ds} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

II.2.4. Schéma équivalent

Les schémas équivalents représentent les composantes de la machine sur les axes (d et q), facilitant l'analyse et la conception des systèmes électriques. La décomposition sur les axes d et q permet de séparer les effets magnétiques principaux. Le choix du référentiel et la représentation sur les axes d et q sont cruciaux pour comprendre et optimiser le fonctionnement des machines électriques. [1]

- Suivant l'axe d

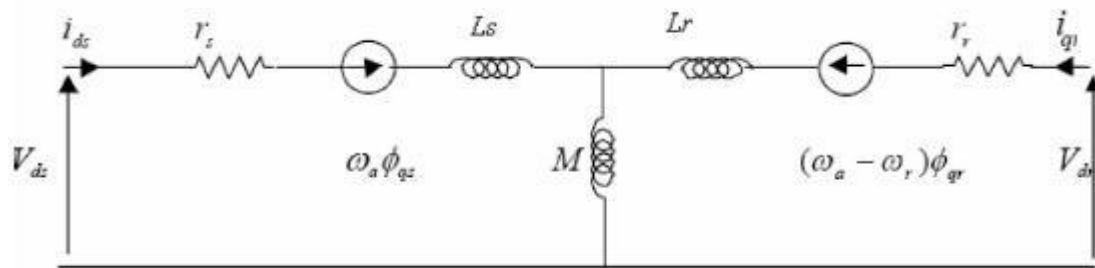


Figure II.3 : Schéma équivalent en régime dynamique de la machine asynchrone dans un référentiel arbitraire

- Suivant l'axe q

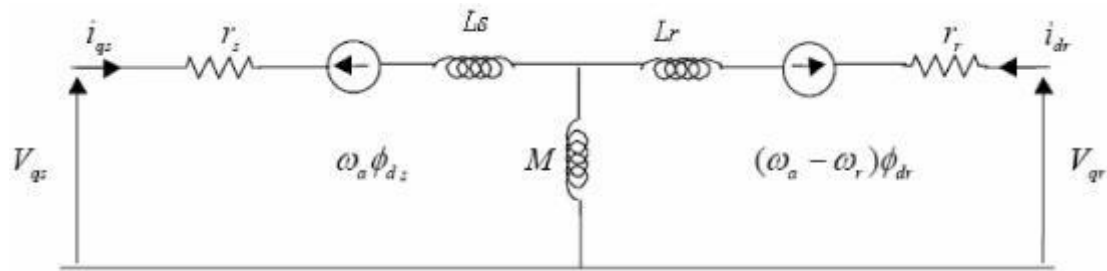


Figure II.4 : Schéma équivalent en régime dynamique de la machine asynchrone dans un référentiel arbitraire

II.2.5. Etude du phénomène d'auto- amorçage à vide

L'auto-amorçage de la génératrice se produit uniquement lorsque l'induction magnétique rémanente et le condensateur sont présents. Cette dernière forme, avec la génératrice, un système oscillant dont les équations sont dérivées du schéma présenté dans la figure.

- En notant :

R_s : la résistance du stator,

l_s : l'inductance totale de fuite du stator,

L_m : l'inductance magnétisante,

l'_r : l'inductance totale de fuite du rotor ramenée au stator,

R'_r : la résistance rotorique ramenée au stator

g : le glissement.

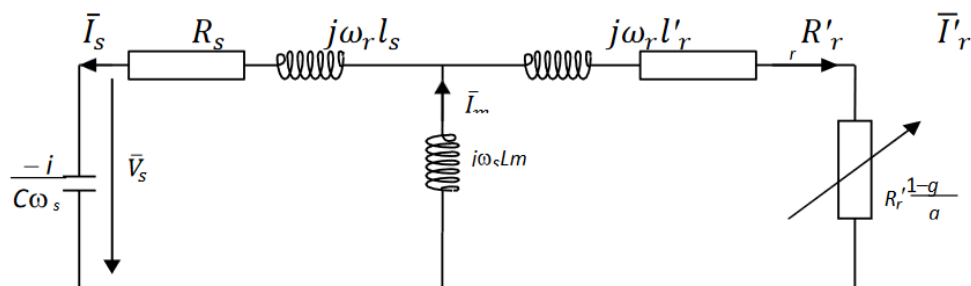


Figure II.5 : Schéma équivalent par phase en régime permanent
Du générateur asynchrone auto-amorçé.

La littérature aborde en détail la théorie de la détermination des condensateurs. Cette théorie repose sur des méthodes purement analytiques qui exigent l'introduction progressive des hypothèses simplificatrices, lesquelles seront abordées au fil de nos développements.[3]

Le schéma représenté par la Figure (II.5) peut être considéré comme équivalent à une génératrice ayant une impédance Z_G alimentant une impédance Z_c (celle du condensateur).

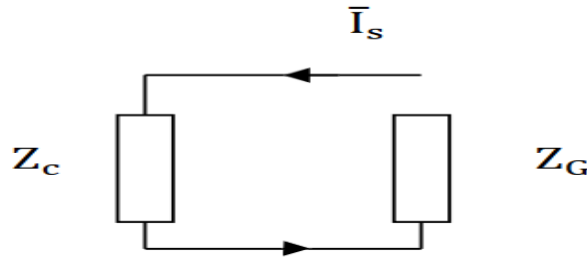


Figure II.6 : Schéma réduit du générateur auto-amorcé

Z_c : L'impédance de condensateur.

Z_G : Impédance équivalente du générateur asynchrone.

Coefficient de dispersion : $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$

D'après la figure (II.6) nous avons :

$$\bar{Z}_c \cdot \bar{I}_s = -\bar{Z}_G \cdot \bar{I}_s \rightarrow \bar{Z}_c \cdot \bar{I}_s + \bar{Z}_G \cdot \bar{I}_s = 0 \quad (\text{II. 32})$$

Donc :

$$\bar{Z}_{\text{res}} = \bar{Z}_c + \bar{Z}_G$$

$$\bar{Z}_G = R_s + j\omega_s \cdot l_s + \frac{j\omega_s l_m \left(\frac{R_r'}{g} + j\omega_s \acute{l}_r \right)}{\frac{\acute{R}_r}{g} + j\omega_s (l_m + \acute{l}_r)} \quad (\text{II. 33})$$

$$\bar{Z}_c = -\frac{j}{C\omega_s}$$

En substituant $l_s = L_s - L_m$ et $l_r' = L_r' - L_m$ dans l'équation et en introduisant le coefficient de dispersion σ .

$$Z_G = \frac{R_s \frac{\acute{R}_r}{g} - \omega_s^2 \sigma L_s \acute{L}_r + j\omega_s (\acute{L}_r R_s + L_s \frac{\acute{R}_s}{g})}{\frac{\acute{R}_r}{g} + j\omega_s \acute{L}_r} \quad (\text{II. 34})$$

Donc :

$$Z_{res} = -\frac{j}{C\omega_s} + \frac{R_s \frac{\dot{R}_r}{g} - \omega_s^2 \sigma L_s \dot{L}_r + j\omega_s \left(\dot{L}_r R_s + L_s \frac{\dot{R}_s}{g} \right)}{\frac{\dot{R}_r}{g} + j\omega_s \dot{L}_r} \quad (\text{II.35})$$

$$Z'_{res} = \left[R_s + \frac{\omega_s^2 L_m^2 \frac{\dot{R}_r}{g}}{\left(\frac{\dot{R}_r}{g} \right)^2 + (\omega_s \dot{L}_r)^2} \right] + j \left[-\frac{1}{C\omega_s} + \frac{\omega_s L_s \left(\left(\frac{\dot{R}_r}{g} \right)^2 + \sigma (\omega_s \dot{L}_r)^2 \right)}{\frac{\dot{R}_r}{g} + (\omega_s \dot{L}_r)^2} \right]$$

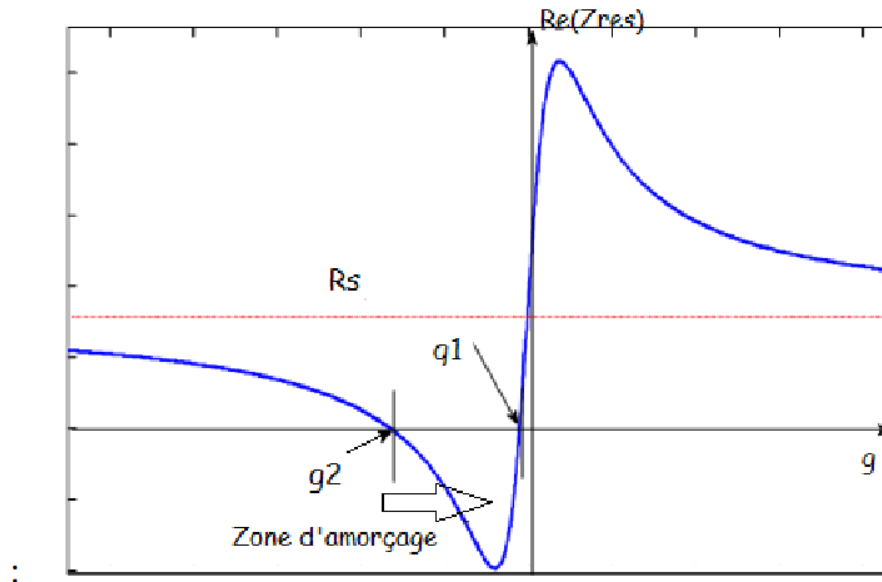


Figure II.7: Auto amorçage du générateur asynchrone

II.2.5.1. Description du phénomène d'auto-amorçage

L'amorçage ou l'auto excitation du générateur asynchrone repose sur un mécanisme complexe, déclenché par la présence d'un flux magnétique résiduel, également appelé flux rémanent. Ce flux, combiné à la rotation de la machine, génère une force électromotrice dans les phases statoriques. Cette force électromotrice, ou Fem, provoque un courant circulant à travers un circuit formé par une phase statorique, un condensateur, et éventuellement la charge.

Ce courant induit à son tour un flux magnétique d'entrefer qui s'additionne au flux rémanent initial, augmentant ainsi le flux total. Cette augmentation du flux génère une Fem accrue, provoquant un courant statorique plus important. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la Fem atteigne un équilibre, déterminé par l'intersection de la courbe de magnétisation, représentant la force électromotrice magnétisante par phase, et la droite représentant la tension

aux bornes du condensateur. Cette intersection se situe généralement dans la zone de saturation de la courbe de magnétisation.

Il est important de noter que si la courbe de magnétisation est linéaire, l'auto-amorçage devient impossible et la tension statorique théoriquement augmente indéfiniment. Cela résulte logiquement du modèle linéaire dans ce contexte. Ainsi, pour chaque vitesse de rotation, il existe une valeur minimale de capacité nécessaire dans le circuit pour garantir l'auto-amorçage et le fonctionnement stable de la génératrice asynchrone auto-excitée. Ce processus démontre la complexité de la régulation du système électrique et la nécessité d'une conception précise pour assurer un fonctionnement fiable. [10], [11], [12]

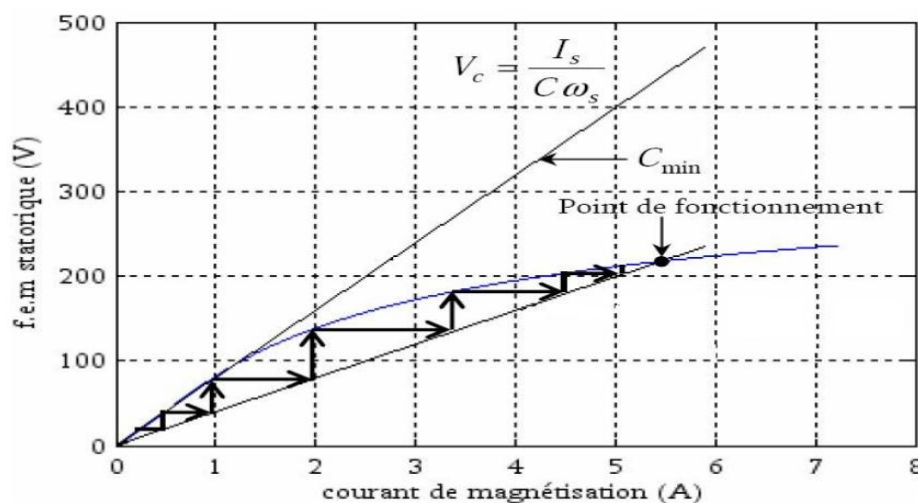


Figure II.8 : Schéma du principe de l'auto-amorçage du générateur asynchrone

Les conditions requises pour l'auto-amorçage d'une génératrice asynchrone incluent les éléments suivants :

- La présence d'un flux magnétique résiduel dans le fer du rotor.
- Une vitesse de rotation suffisante.
- Une capacité minimale.

Il est important de noter que les deux derniers paramètres sont interdépendants, ce qui signifie qu'à chaque vitesse de rotation correspond une valeur spécifique de capacité nécessaire pour garantir l'auto-amorçage.[3]

II.2.5.2. Equations d'auto-amorçage en régime dynamique

Les équations décrivant l'auto-amorçage du générateur asynchrone sont en fait des équations électriques qui régissent le comportement des condensateurs.

$$[i_c] = \frac{dQ_c}{dt} \quad (\text{II. 36})$$

$[i_c]$: Courant traversant les trois condensateurs.

dQ_c : La charge accumulée par les trois condensateurs.

Donc l'équation dans le repère de Park :

$$[P(\theta_s)][i_{cp}] = \frac{d[P(\theta_s)][Q_{cp}]}{dt} \quad (\text{II. 37})$$

$$[i_{cp}] = [P(\theta_s)]^{-1} \frac{d[P(\theta_s)][Q_{cp}]}{dt} = [P(\theta_s)]^{-1} \left(\frac{d[P(\theta_s)]}{dt} \right) [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt} \quad (\text{II. 38})$$

$$[i_{cp}] = \frac{d(\theta_s)}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt} \quad (\text{II. 39})$$

Sachant que $[Q_{cp}] = C[v_{cp}]$:

$$[i_{cp}] = C\omega_a \begin{bmatrix} 0 \\ -v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix} + C \frac{d[v_{cp}]}{dt} \quad (\text{II. 40})$$

D'où :

$$\frac{d[v_{cp}]}{dt} = \frac{[i_{cp}]}{C} - \omega_a \begin{bmatrix} 0 \\ -v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 41})$$

Finalement on obtient les équations d'auto-amorçage suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C} + \omega_a v_{qc} \\ \frac{dv_{qc}}{dt} = \frac{i_{qc}}{C} - \omega_a v_{dc} \end{cases} \quad (\text{II. 42})$$

II.2.6 Résultats de la simulation

Le schéma bloc réalise sous Matlab Simulink (donné en Annexe 1) a été utiliser pour la simulation du système en régime linéaire. Les figures (II.9) et (II.10) donnent respectivement les courants et les tensions des phases statoriques suite à l'amorçage à vide du générateur asynchrone autonome.

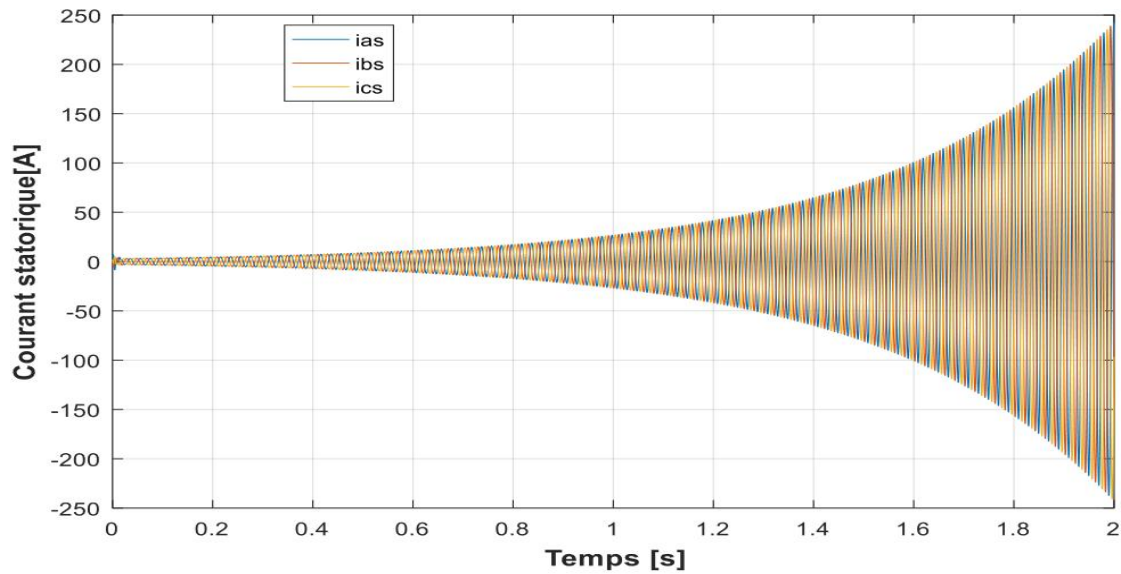


Figure II.9: Evolution des courants statoriques en régime linéaire.

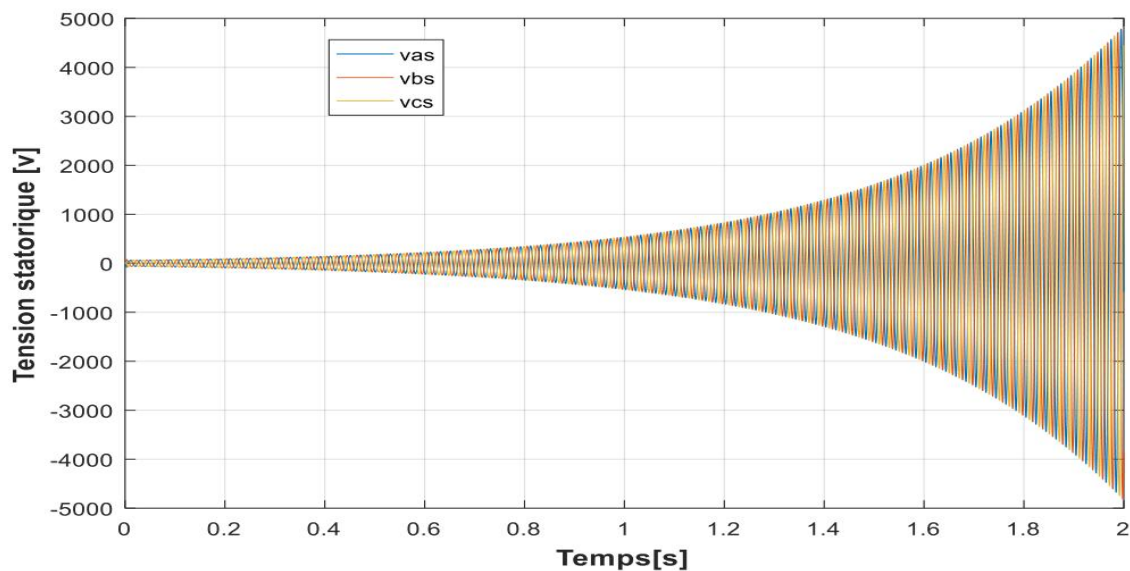


Figure II.10: Evolution des tensions statoriques à vide en régime linéaire.

On constate que les grandeurs sont anormalement élevées 5000V pour la tension et 250A pour le courant en seulement 2 secondes. On observe aussi qu'il le système n'atteint pas le régime établi et évolue infiniment.

Ces résultats sont directement attribuables à la négligence de la saturation. Lorsque la caractéristique de magnétisation est linéaire, cela signifie qu'elle ne présente pas de coude de saturation. En conséquence, en régime permanent, le point de fonctionnement ne peut pas être atteint. Bien que l'auto-amorçage reste possible, la tension statorique augmente alors

indéfiniment théoriquement, tandis que le courant atteint rapidement des valeurs inacceptables.

Il est cependant important de souligner que ces résultats demeurent purement théoriques. En réalité, la tension aux bornes de la machine est limitée par le phénomène de non-linéarité du circuit magnétique. Ainsi, il est impératif de prendre en considération ce phénomène dans certains cas de fonctionnement pour obtenir des résultats plus réalistes et applicables.

II.3. Modélisation du générateur asynchrone en régime saturé

Le modèle linéaire de la génératrice asynchrone n'est pas représentatif de la réalité, et le bon fonctionnement de la génératrice dépend de la prise en considération de la saturation du circuit magnétique de la machine.

En régime de saturation, les flux et les courants ne suivent plus une relation proportionnelle. La caractéristique de magnétisation comporte non seulement une partie linéaire, mais également une partie appelée "coude" et une autre nommée "saturation". C'est cette dernière partie qui va limiter les grandeurs du générateur [13].

II.3.1. Technique de prise en compte de la saturation magnétique

Dans le modèle linéaire, l'inductance de magnétisation est considérée constante, ce qui ne reflète pas la réalité, car le matériau magnétique utilisé dans la construction de la génératrice n'est pas parfaitement linéaire. En effet, dans certaines applications de la machine asynchrone (telles que l'alimentation par onduleur, les générateurs auto-excités, les éoliennes), il est indispensable de prendre en compte l'effet de saturation du circuit magnétique et donc la variation de l'inductance de magnétisation [13].

En réalité, les inductances peuvent varier considérablement en fonction du flux dans différentes parties internes de la génératrice. Ainsi, il est préférable de les réexaminer à travers un système d'équations différentielles avec des paramètres non linéaires caractérisant les modes de saturation. De plus, il serait nécessaire de trouver un modèle capable de décrire la variation de ces inductances en fonction du courant. Plusieurs fonctions sont utilisées à cette fin. Cependant, aucune ne couvre tous les points de la courbe, ce qui rend la modélisation approximative avec une marge d'erreur minimale. Dans ce chapitre, nous avons utilisé la fonction du modèle de Park qui nous a permis d'obtenir les résultats finaux des

équations [14]. La machine, dans son ensemble est constituée d'un empilement de tôles ferromagnétiques sous l'effet d'un champ magnétique, ces tôles s'aimantent naturellement, cependant cette aimantation est limitée. On parle de saturation du matériau lorsque sa perméabilité diminue avec le niveau d'induction magnétique.

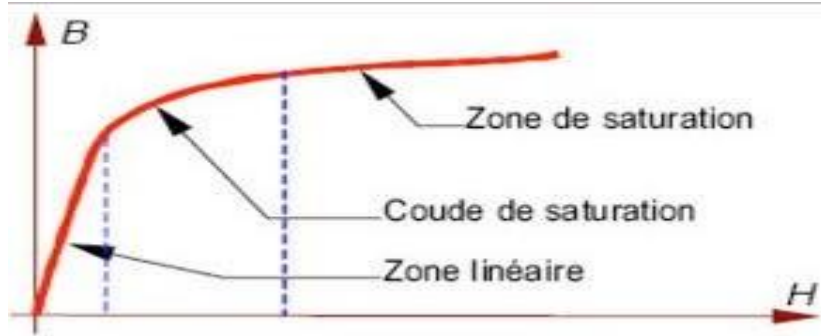


Figure II.11 : Courbe de la première aimantation d'un matériau ferromagnétique.

L'approche de modélisation avec saturation consiste en l'extension du modèle linéaire établi précédemment. Nous allons donc développer les expressions des inductances de magnétisation en fonction du courant magnétisant tout en considérant l'effet de la saturation croisé. Les flux sont séparés suivant les axes d et q en flux magnétisant et flux de fuites. Les inductances de fuites sont considérées constantes.

II.3.2. Mise en œuvre du modèle saturé

Rappelons en premier lieu les équations du modèle établi en régime linéaire :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_a \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_a \varphi_{ds} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_m) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_m) \varphi_{dr} \end{array} \right\} \quad (II.43)$$

Les flux statoriques et rotoriques suivant (d et q) s'expriment chacun la somme d'un flux magnétisant et d'un flux de fuites :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds} = L_{\sigma s} i_{ds} + \varphi_{md} \\ \varphi_{qs} = L_{\sigma s} i_{qs} + \varphi_{mq} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \varphi_{dr} = L_{\sigma r} i_{dr} + \varphi_{md} \\ \varphi_{qr} = L_{\sigma s} i_{qs} + \varphi_{mq} \end{array} \right\} \quad (II.44)$$

$L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$: Inductances de fuites statoriques et rotorique

$\varphi_{md}, \varphi_{mq}$: Respectivement vecteurs de flux magnétisant suivant l'axe d et q

Les composantes d'axes (d, q) du flux et du courant magnétisants sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_{md} = L_m i_{md} & i_{md} = i_{ds} + i_{rd} \\ \varphi_{mq} = L_m i_{mq} & i_{mq} = i_{qs} + i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II. 45})$$

D'où :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_{\sigma s} i_{ds} + L_m i_{md} & \varphi_{dr} = L_{\sigma r} i_{dr} + L_m i_{md} = -L_{\sigma r} i_{ds} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{md} \\ \varphi_{qs} = L_{\sigma s} i_{qs} + L_m i_{mq} & \varphi_{qr} = L_{\sigma r} i_{qr} + L_m i_{mq} = -L_{\sigma r} i_{qs} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{mq} \end{cases} \quad (\text{II. 46})$$

L_m : Inductance magnétisante statique

$$\text{On considèrera : } |i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (\text{II. 47})$$

i_m : Le courant magnétique qui circule dans la branche magnétisante du modelé de la machine

Les équations du modèle de Park font apparaître les dérivées des flux, en les substituant par leurs composantes (flux magnétisant et flux de fuites), on aura :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} (L_{\sigma s} i_{ds} + L_m i_{md}) - (\omega_a) \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} (L_{\sigma s} i_{qs} + L_m i_{mq}) + (\omega_a) \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II. 48})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} (-L_{\sigma r} i_{ds} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{md}) - (\omega_a - \omega_m) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} (-L_{\sigma r} i_{qs} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{mq}) + (\omega_a - \omega_m) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 49})$$

On développe les dérivées des flux comme suit :

$$\left\{ \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \frac{dL_m}{dt} \quad \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di_{mq}}{dt} + i_{mq} \frac{dL_m}{dt} \right\} \quad (\text{II. 50})$$

On pose les inductances de fuites constantes et l'inductance L_m est en fonction de $|i_m|$ nous pouvons écrire donc :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di_{mq}}{dt} + i_{mq} \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 51})$$

$$\text{Soit : } L'_m = \frac{dL_m}{d|i_m|}$$

La dérivée du courant magnétisant est développée comme suit :

$$\frac{d|i_m|}{dt} = \frac{d}{dt} \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} = \frac{i_{md}}{|i_m|} \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (\text{II. 52})$$

On remplace cette dérivée dans les expressions (II.50)

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{ds}}{dt} + \left[L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{md}}{dt} + L'_m \frac{i_{mq} i_{md}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{qs}}{dt} + \left[L_m + L'_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{mq}}{dt} + L'_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{md}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 53})$$

Le terme $\left[L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{md}}{dt}$ exprime l'effet dû à la saturation suivant l'axe direct.

Le terme $\left[L_m + L'_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{mq}}{dt}$ exprime l'effet dû à la saturation suivant l'axe quadrature.

$L'_m \frac{di_{mq}}{dt} \frac{i_{mq} i_{md}}{|i_m|}$: exprime l'effet dû courant de l'axe q sur le flux de l'axe d, c'est l'effet de saturation croisé.

Les dérivées des flux rotoriques s'obtiennent en suivant le même principe :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -L_{\sigma r} \frac{di_{ds}}{dt} + \left[L_{\sigma r} + L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{md}}{dt} + L'_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -L_{\sigma r} \frac{di_{qs}}{dt} + \left[L_{\sigma r} + L_m + L'_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{mq}}{dt} + L'_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{md}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 54})$$

Pour réduire le modèle, on pose :

$L_{md} = L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|}$: Inductance magnétisante statique suivant l'axe d.

$L_{mq} = L_m + L'_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|}$: Inductance magnétisante statique suivant l'axe q.

$L_{dq} = L'_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|}$: Inductance d'effet croisé.

On peut aussi exprimer ces inductances en fonction des inductances magnétisantes statique et dynamique :

$$M_{st} = \frac{\varphi_m}{i_m} , \quad M_{dy} = \frac{\varphi_m}{di_m}$$

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -L_{\sigma s} \frac{di_{ds}}{dt} + (L_{\sigma s} + L_{md}) \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -L_{\sigma s} \frac{di_{qs}}{dt} + (L_{\sigma s} + L_{mq}) \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 55})$$

Le modèle saturé de la machine asynchrone est finalement obtenu en introduisant les équations des flux (II.54) et de leurs dérivées (II.55) dans les équations de tensions :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_{\sigma s} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_{\sigma s} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 56})$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + L_{\sigma r} \frac{di_{dr}}{dt} + (L_{md}) \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} + \omega_m (L_{\sigma r} i_{qr} + L_m i_{mq}) \\ 0 = R_r i_{qr} + L_{\sigma r} \frac{di_{qr}}{dt} + (L_{mq}) \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} - \omega_m (L_{\sigma r} i_{dr} + L_m i_{md}) \end{cases} \quad (\text{II. 57})$$

En optant pour un cadre de référence associé au stator (où $\omega_a = 0$) et en intégrant les équations des condensateurs formulées selon le modèle linéaire, nous procédons à la simulation de l'auto-amorçage à vide du générateur asynchrone. [14].

Pour simuler le modèle saturé dans le repère de Park lié au stator on va travailler avec six variables d'état ; les courants statoriques ($i_{ds}|i_{qs}$) les courants magnétisants ($i_{md}|i_{mq}$) et les tensions statoriques ($v_{ds}|v_{qs}$). A cet effet on exprime les courants ($i_{dr}|i_{qr}$) dans (II.57) en fonction des courants statoriques et magnétisants, voir les équations (II.45). On ajoute les équations d'auto-amorçage établi précédemment

On aboutit au système matriciel suivant :

$$\begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ -R_r & \omega_m l_{\sigma r} & R_r & -\omega_m (l_{\sigma r} + L_m) \\ -\omega_r l_{\sigma r} & -R_r & \omega_m (l_{\sigma r} + L_m) & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_{\sigma s} & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_{\sigma s} & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_{\sigma r} & 0 & l_{\sigma r} + L_{md} & L_{dq} \\ 0 & -l_{\sigma r} & L_{dq} & l_{\sigma r} + L_m \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{II. 58})$$

Avec :

$$\begin{cases} \frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C} = -\frac{i_{ds}}{C} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} = \frac{i_{qc}}{C} = -\frac{i_{qs}}{C} \end{cases} \quad (\text{II. 59})$$

II.3.3. Les résultats de Simulation du générateur asynchrone en régime saturé

Le schéma bloc réalise sous Matlab Simulink (donné en Annexe 2) a été utiliser pour la simulation du système en régime sature. Les figures (II.13) et (II.14) et (II.15) donnent

respectivement les inductances statique et dynamique, et les tensions et les courants des phases statoriques en régime saturé.

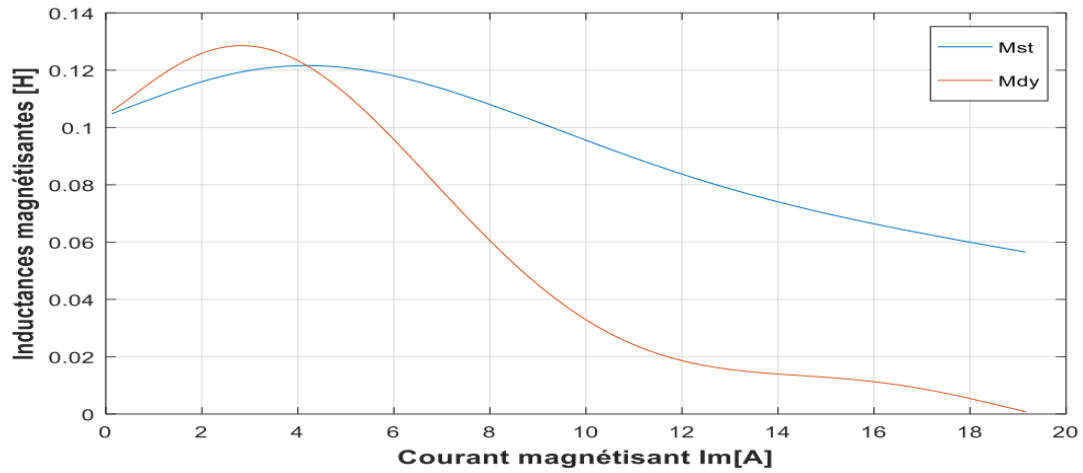


Figure II.12 : Évolution des inductances statique et dynamique en fonction du courant magnétisant lorsqu'on considère un régime saturé.

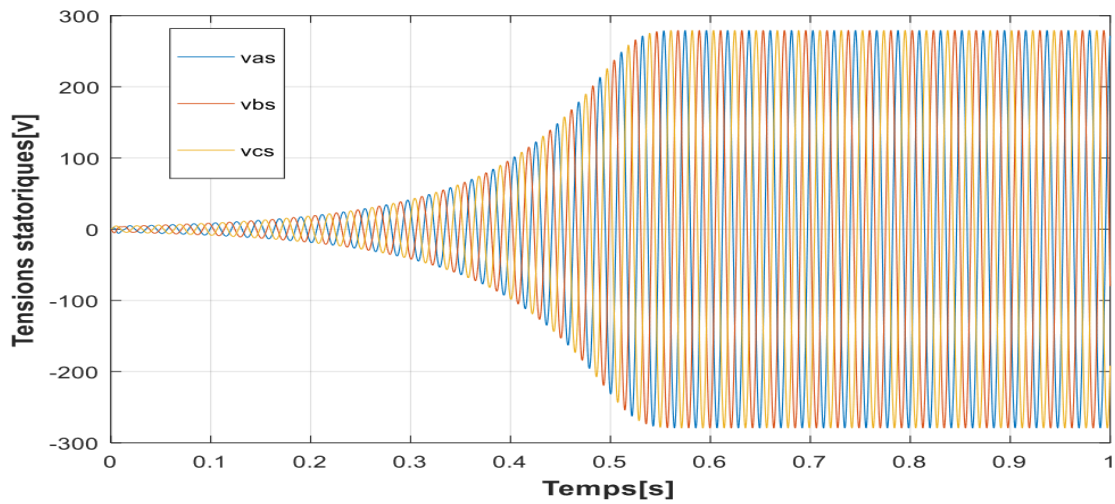


Figure II.13: Evolution des tensions statoriques en fonction du temps en régime saturé

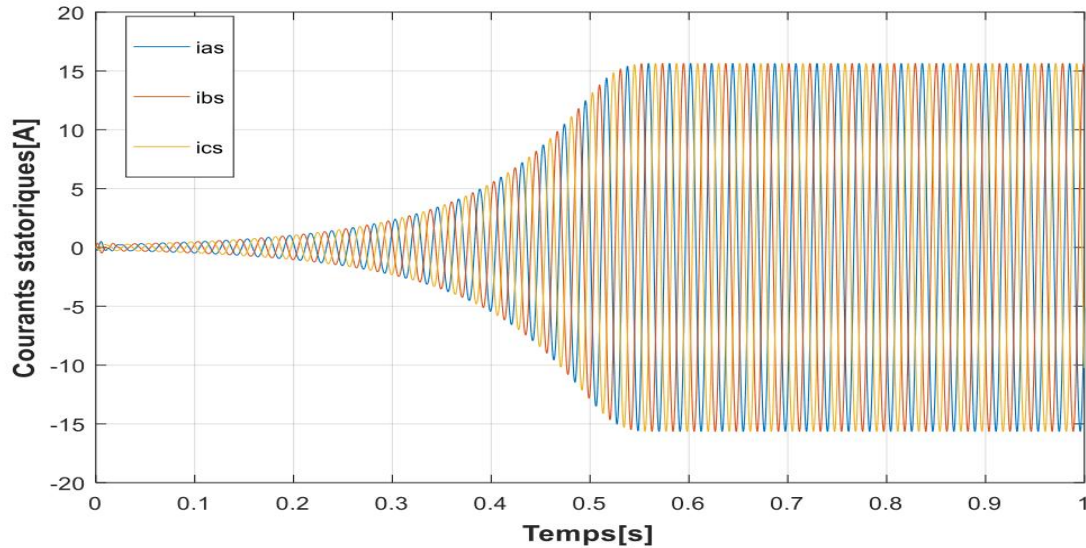


Figure II.14 : Evolution des courants statoriques en fonction du temps en régime saturé

Nous observons une croissance exponentielle de la tension et du courant statorique dans la zone de non-saturation, c'est-à-dire pour l'intervalle $[0, 0.5]$. Ensuite, ces grandeurs convergent vers des valeurs constantes dans la zone saturée, dans l'intervalle $[0.5, 1]$. Ce processus représente le délai d'amorçage jusqu'au régime permanent.

Les amplitudes des tensions et des courants statoriques atteintes en régime permanent sont de 280V et 15A respectivement, avec une fréquence de 50Hz

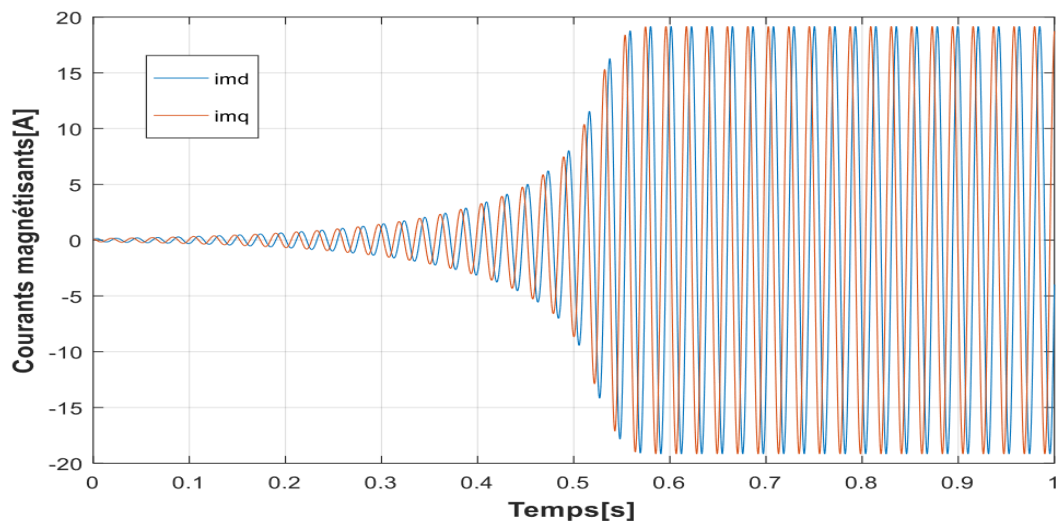


Figure II.15 : Evolution des courants magnétisants en fonction du temps en régime saturé

Cette figure illustre clairement la tension en régime transitoire du modèle saturé pour les courants magnétisants, les courants $[i_{dm}, i_{qm}]$ sont presque identiques. La saturation magnétique se manifeste par des courants oscillant avec une amplitude stable.

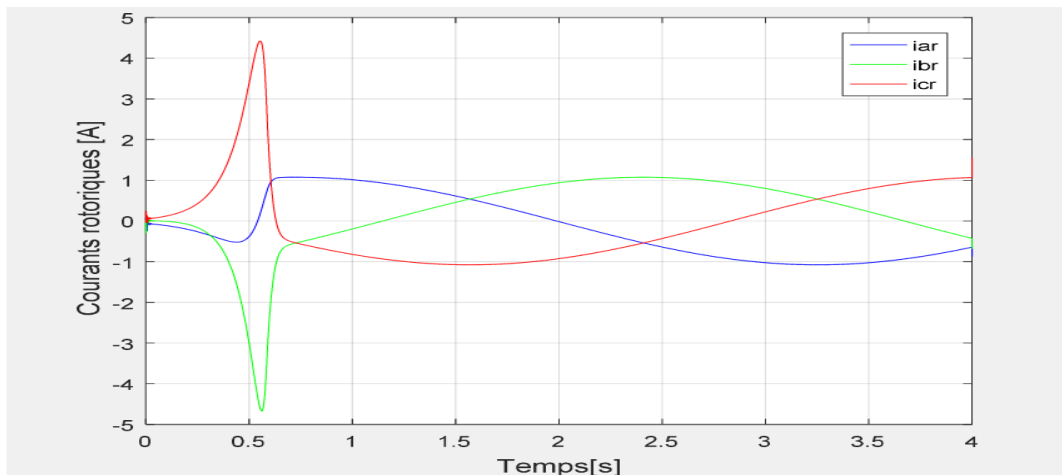


Figure II.16 : Evolution des courants rotoriques en fonction du temps en régime saturé

La figure (II.16) représente l'évolution des courants rotoriques en fonction du temps du modèle saturé. Elle illustre le comportement typique des courants rotoriques d'une machine asynchrone en régime saturé, montrant une phase transitoire avec des oscillations.

II.3.4. Influence de la capacité sur la tension d'auto-amorçage

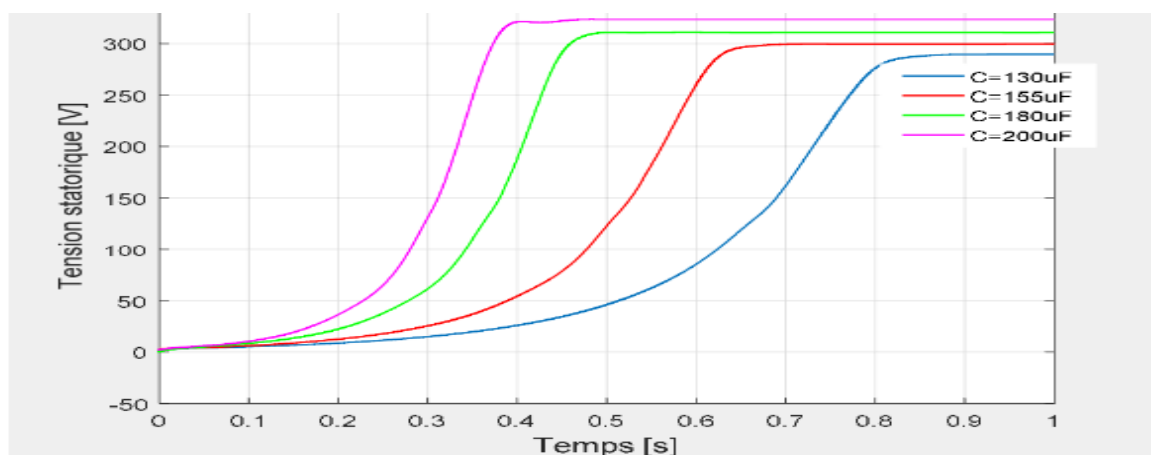


Figure II.17: Influence de la capacité sur la tension statorique du générateur

Le figure (II.17) montre clairement que l'augmentation de la capacité du condensateur accélère l'auto-amorçage et permet d'atteindre des tensions statoriques plus élevées cela peut

être crucial pour le dimensionnement des composants dans des systèmes avec une montée rapide de la tension.

II.3.5. Influence de la vitesse sur la tension d'auto-amorçage

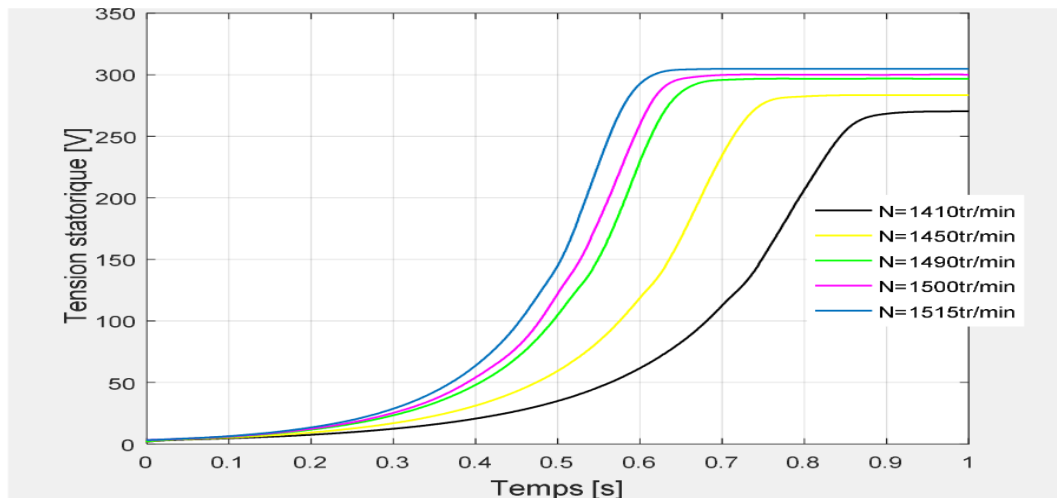


Figure II.18 : Influence de la vitesse sur la tension.

Le figure (II.18) montre clairement que l'augmentation de la vitesse de rotation du générateur accélère l'auto-amorçage et permet d'atteindre des tensions statoriques plus élevées. Pour optimiser le processus d'auto-amorçage, il est donc avantageux de fonctionner à des vitesses de rotation plus élevées.

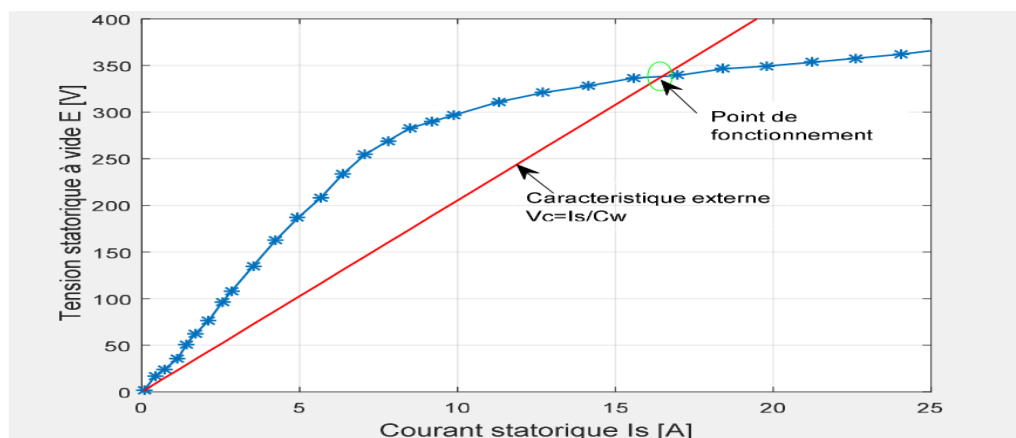


Figure II.19 : phénomène d'auto Amorçage

La figure (II.19) montre l'évolution de la f.é.m. de la machine et la caractéristique externe (droite d'excitation avec $C=155\mu\text{F}$). Le champ rémanent dans le circuit magnétique de la machine génère une f.é.m. rémanente aux bornes du stator. Lorsque le rotor est entraîné et

que les capacités sont connectées aux bornes du stator, elles produisent un courant réactif qui augmente le champ magnétique. Cela induit une f.é.m. supérieure, suivie d'un courant plus élevé. Ce phénomène continue jusqu'à ce que le point de fonctionnement, appelé état d'équilibre stable, soit atteint.

II. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation de la machine asynchrone auto-excitée en régime linéaire en utilisant le modèle de Park. Ce modèle repose sur la transformation triphasée-biphasée, permettant de simplifier les équations du système et de rendre constants les coefficients dépendants du temps.

Après avoir établi les limites du modèle linéaire, nous avons utilisé le modèle saturé de la machine asynchrone pour obtenir des résultats plus réalistes. En intégrant les effets de la saturation magnétique, nous avons ajusté les équations du modèle pour mieux représenter les phénomènes observés dans des conditions réelles. Les simulations avec le modèle saturé ont montré des valeurs de tension et de courant statorique convergents, avec une croissance initiale suivie d'une stabilisation due à la saturation. Ce modèle a permis d'évaluer l'impact de divers paramètres de fonctionnement, démontrant que la saturation est cruciale pour comprendre et prédire le comportement de la machine. Quand il est validé par des données expérimentales, le modèle saturé peut-être exploité pour des applications pratiques, offrant des prédictions précises pour la conception et l'optimisation des génératrices asynchrones auto-excitées

Le modèle saturé de la machine asynchrone a montré que l'augmentation de la capacité du condensateur et de la vitesse de rotation du générateur accélère l'auto-amorçage, permettant d'atteindre des tensions statoriques plus élevées. Ces résultats peuvent être exploités pour le dimensionnement des composants dans des systèmes nécessitant une montée rapide de tension. Pour optimiser le processus d'auto-amorçage, il est avantageux de fonctionner à des vitesses de rotation plus élevées

CHAPITRE III

Fonctionnement En charge Du générateur asynchrone

III.1. Introduction

Ce chapitre examine le fonctionnement en charge d'une génératrice asynchrone auto-excitée, en se concentrant sur les effets des charges équilibrées et déséquilibrées de type résistif (R) et inductif (L). La première partie analysera comment les charges équilibrées influencent les courants de sortie et la stabilité du système, permettant de maintenir un régime de fonctionnement stable. Ensuite, nous aborderons les charges déséquilibrées, caractérisées par des courants et des tensions non uniformes, qui peuvent provoquer des oscillations et des perturbations. Pour mieux comprendre ces phénomènes, nous utiliserons des simulations pour visualiser et analyser les résultats sous différentes conditions de charge. Ces simulations mettront en évidence les impacts spécifiques, tels que la distorsion harmonique et les pertes énergétiques supplémentaires. Cette analyse comparative nous aidera à identifier des stratégies pour optimiser le fonctionnement de la génératrice dans diverses situations, offrant une perspective complète et pratique sur son utilisation dans des applications réelles.

III.2. Fonctionnement en charge

Dans le cas d'une charge résistive, la variation de la tension et de la fréquence est tolérable, ce qui permet de se passer de régulation. En revanche, pour une charge inductive, la chute de tension est plus prononcée en raison de la demande accrue en puissance réactive. Lorsque la génératrice alimente un moteur asynchrone de grande puissance, le risque de désamorçage de la génératrice augmente considérablement.[15]

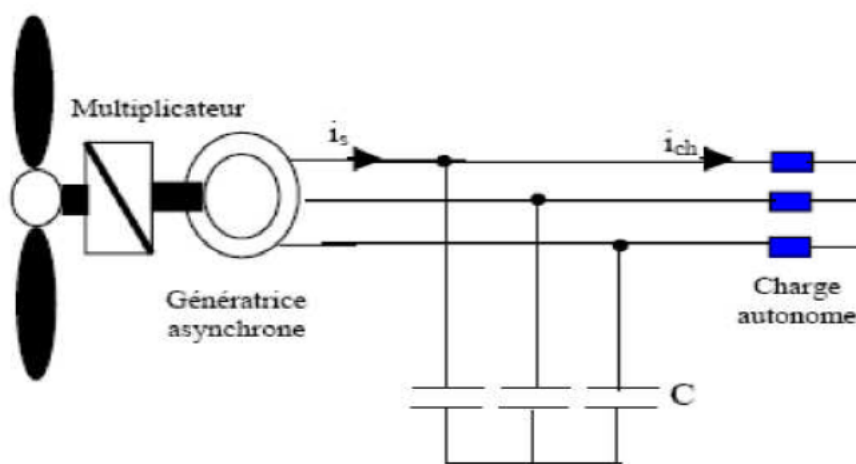


Figure III.1 : Schéma de principe de fonctionnement en charge

III.3. Charge équilibrée

Dans les équations décrivant le phénomène d'auto-amorçage du système, il est essentiel d'intégrer les courants de charge aux courants statoriques. Cette inclusion permet de modéliser plus précisément le comportement du système lorsqu'il est en charge. En ajoutant les courants de charge, on tient compte des interactions supplémentaires entre la génératrice et la charge connectée, ce qui influence les conditions de démarrage et de fonctionnement stable. Par conséquent, cette modification des équations permet de mieux prévoir et optimiser la performance de la génératrice sous diverses conditions de charge, en assurant une gestion adéquate des courants et des tensions au sein du système [4].

III.3.1. Simulation du générateur asynchrone sur charge résistive $RC=50\Omega$

Après l'auto-amorçage à vide du générateur, on branche à $t=1.2$ une charge résistive à ses bornes. Notre charge est représentée par 3 résistances identiques montées en étoile et branchées en parallèle avec les capacités. On définit la matrice résistance de charge et les vecteurs courants de charge et tensions comme suite :

$$[R_{cabc}] = \begin{bmatrix} R_c & 0 & 0 \\ 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}, \quad [i_{abc_ch}] = \begin{bmatrix} i_{ach} \\ i_{bch} \\ i_{cch} \end{bmatrix}, \quad [v_{abc_ch}] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}$$

Le courant statorique est réparti entre la charge et le condensateur comme suit :

$$\begin{aligned} i_{as} &= i_{ac} + i_{ach} \\ i_{bs} &= i_{bc} + i_{bch} \\ i_{cs} &= i_{cc} + i_{cch} \end{aligned} \quad (\text{III. 1})$$

Dans le repère diphasé les équations du système (III.1) deviennent :

$$\begin{aligned} i_{dc} &= i_{ds} - i_{dch} \\ i_{qc} &= i_{qs} - i_{qch} \end{aligned} \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

$$\begin{aligned} i_{dch} &= -\frac{v_{ds}}{R_c} \\ i_{qch} &= -\frac{v_{qs}}{R_c} \end{aligned} \quad (\text{II. 3})$$

Nous avons :

$$\begin{aligned}\frac{dv_{ds}}{dt} &= -\frac{1}{C} i_{dc} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} &= -\frac{1}{C} i_{qc}\end{aligned}\tag{III.4}$$

En intégrant les équations (III.2) et (III.3) courants dans les équations d'auto-amorçage du générateur (III.4), on aura :

$$\begin{aligned}\frac{dv_{ds}}{dt} &= -\frac{1}{C} i_{ds} - \frac{1}{R_c C} v_{ds} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} &= -\frac{1}{C} i_{qs} - \frac{1}{R_c C} v_{qs}\end{aligned}\tag{III.5}$$

La combinaison du système matriciel (II.4) du chapitre précédent avec les équations (III.5), le modèle du générateur asynchrone sur charge résistive s'écrit :

$$[dI] = [B]^{-1}[A][I]\tag{III.6}$$

Avec :

$$[dI] = \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{dv_{ds}}{dt} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} \end{bmatrix}, \quad [B] = \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_{md} & L_{dq} & 0 & 0 \\ 0 & l_s & L_{dq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ -l_r & 0 & l_r + L_{md} & L_{dq} & 0 & 0 \\ 0 & -l_r & L_{dq} & l_r + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [I] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{md} \\ i_{mq} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 \\ R_r & -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r (l_r + L_m) & 0 & 0 \\ \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (l_r + M_{st}) & -R_r & 0 & 0 \\ -\frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

III.3.2. Les résultats de la simulation

Dans ce cas de fonctionnement, nous avons fait fonctionner notre machine à une vitesse de 1410tr/min, puis nous l'avons connectée à une charge résistive équilibrée (à $t = 1.6$ s) de 50Ω . Le schéma bloc utiliser pour la simulation est donné en Annexe 3. Les figures III.2, III.3 et III.4 présentent l'évolution des tensions, des courants statoriques et des courants de charge

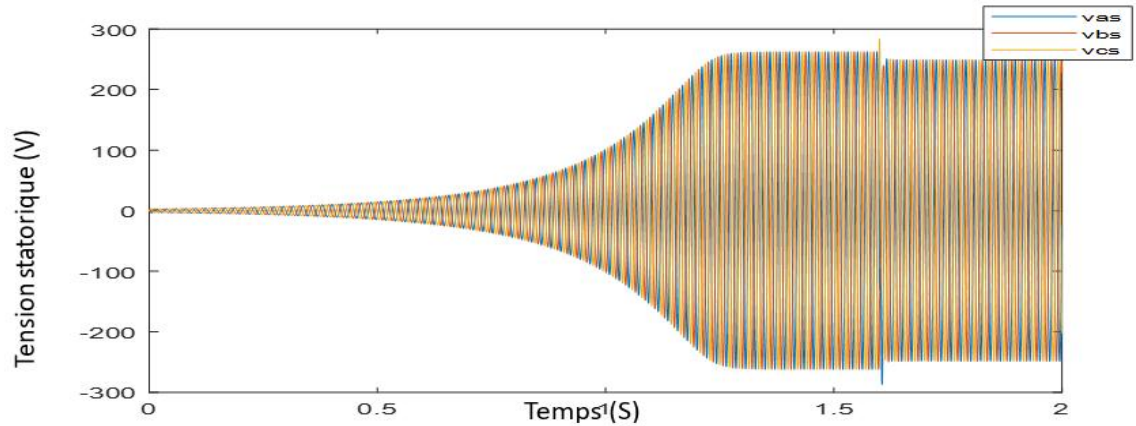


Figure III.2: Evolution des tensions statoriques

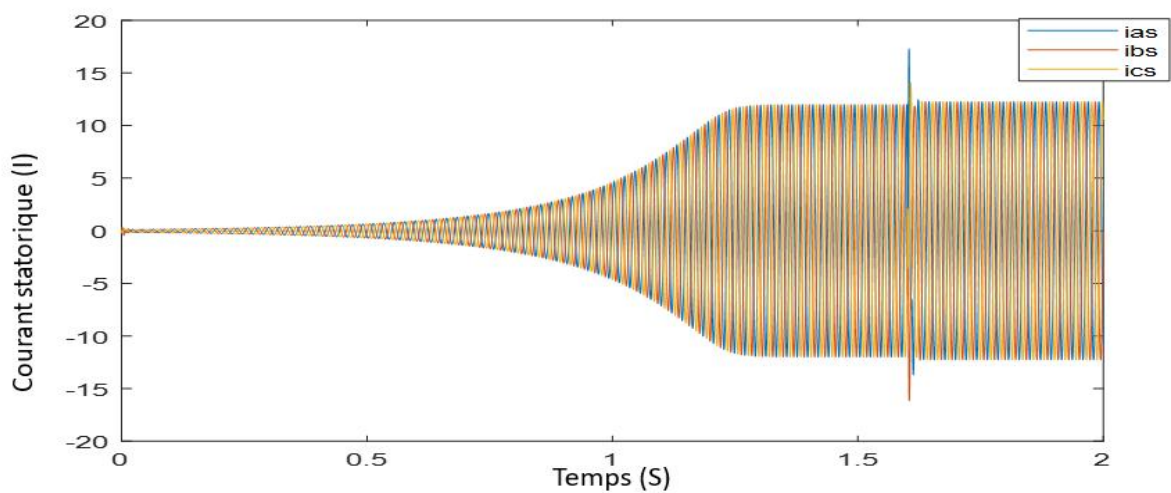


Figure III.3: Les courants statoriques

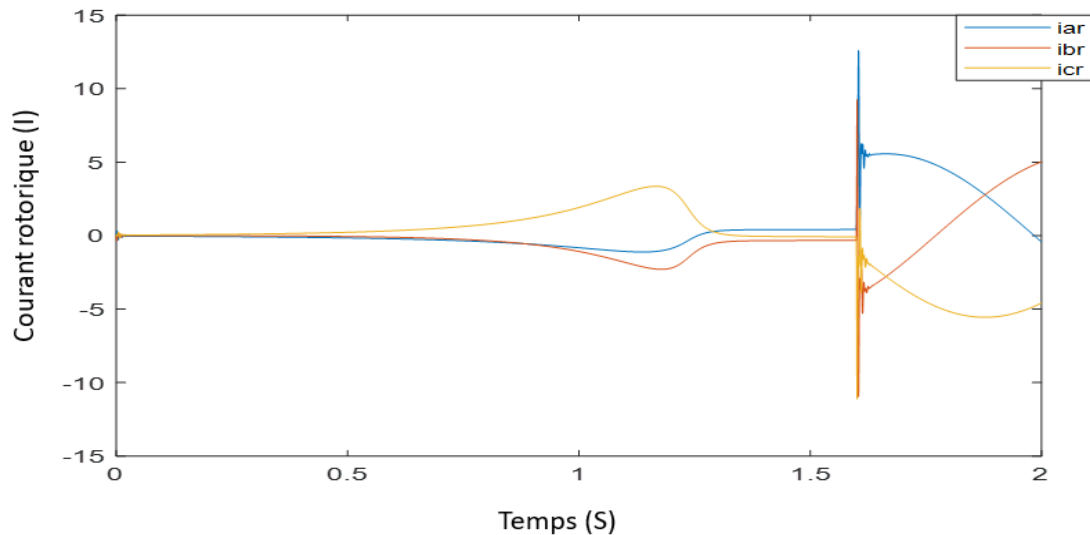


Figure III.4: Courant rotorique

À l'instant $t=1.6$ s, une charge résistive équilibrée est connectée aux bornes de la génératrice asynchrone auto-excitée. On observe des pics de tension et de courant à ce moment précis. La tension statorique diminue proportionnellement à la charge insérée, ce qui provoque également une diminution du courant statorique. Lors de l'insertion de la charge, des transitoires apparaissent, entraînant des pics de courant dans le rotor. Ces pics sont causés par les variations soudaines du flux magnétique et les ajustements rapides nécessaires pour maintenir l'auto-excitation et la tension de sortie

III.3.3. Simulation du générateur asynchrone sur charge inductive $L=0.12$ H

La charge inductive est caractérisée par sa consommation en énergie réactive. Or l'apport de l'énergie réactive est déjà une contrainte pour le générateur asynchrone.

La charge inductive est modélisée par trois circuits RL en série identiques, connectés en étoile et en parallèle avec les condensateurs. La matrice de la charge RL est écrite comme suit :

$$[L_{abc}] = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & L \\ M & M & L \end{bmatrix} \quad [R_{abc}] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad [i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_{al} \\ i_{bl} \\ i_{cl} \end{bmatrix}$$

$$[V_{abcR}] = \begin{bmatrix} V_{aR} \\ V_{bR} \\ V_{cR} \end{bmatrix} \quad [V_{abcL}] = \begin{bmatrix} V_{aL} \\ V_{bL} \\ V_{cL} \end{bmatrix}$$

$$[V_{abcl}] = [V_{abcR}] + [V_{abcL}] \quad \text{(III. 7)}$$

On multiplie chaque terme de l'équation précédente par $P(\theta)$:

$$P(\theta)[V_{abcl}] = P(\theta)[V_{abcR}] + P(\theta)[V_{abcl}] \quad (\text{III. 8})$$

On aura :

$$[V_{dq0l}] = [V_{dq0R}] + [V_{dq0L}] \quad (\text{III. 9})$$

Avec :

$$[V_{dq0R}] = [R][i_{dq0l}] \quad (\text{III. 10})$$

$$[V_{abcl}] = \frac{d[\varphi_{abcl}]}{dt} \quad (\text{III. 11})$$

Avec : φ_{aL} et φ_{bL} et φ_{cL} étant les flux par phase.

On appliquant ici aussi la transformation triphasé-biphasé nous obtenons :

$$P(\theta)^{-1}[V_{dq0L}] = \frac{d}{dt}(P(\theta)^{-1}[\varphi_{dq0L}]) \quad (\text{III. 12})$$

$$[V_{dq0L}] = P(\theta) \frac{d}{dt}(P(\theta)^{-1}[\varphi_{dq0L}]) \quad (\text{III. 13})$$

$$[V_{dq0L}] = P(\theta) \frac{d}{dt}(P(\theta)^{-1}[\varphi_{dq0L}]) + P(\theta)P(\theta)^{-1} \frac{d}{dt}[\varphi_{dq0L}] \quad (\text{III. 14})$$

on sait que :

$$P(\theta)P(\theta)^{-1}[\varphi_{dq0L}] = \omega_s[V_{dqL}] \quad (\text{III. 15})$$

avec: $P(\theta)P(\theta)^{-1} = I_3$

I_3 étant la matrice identité d'ordre 3.

L'équation (III.15) peut s'écrire :

$$[V_{dq0L}] = \omega_s[\varphi_{dqL}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{dq0L}] \quad (\text{III. 16})$$

Nous posons que le circuit magnétique de la charge n'est pas saturé, on peut écrire :

$$[\varphi_{abcL}] = L[i_{abcL}] \quad (\text{III. 17})$$

On multiplie l'équation précédente par $P(\theta)^{-1}$:

$$P(\theta)^{-1} [\varphi_{dq0L}] = L P(\theta)^{-1} [i_{dq0L}] \quad (\text{III. 18})$$

Donc :

$$[\varphi_{dq0L}] = P(\theta) L P(\theta)^{-1} [i_{dq0L}] \quad (\text{III. 19})$$

On peut montrer que :

$$P(\theta) L P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L + 2M \end{bmatrix} \quad (\text{III. 20})$$

$$[V_{dq0L}] = [R][i_{dq0L}] + \omega_s \begin{bmatrix} -(L - M)i_q \\ (L - M)i_d \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L + 2M \end{bmatrix} \frac{d[i_{dq0L}]}{dt} \quad (\text{III. 21})$$

$$\frac{di_{dL}}{dt} = \frac{V_{dL} - Ri_{dL} + \omega_s(L - M)i_{qL}}{(L - M)}$$

$$\frac{di_{qL}}{dt} = \frac{V_{qL} - Ri_{qL} - \omega_s(L - M)i_{dL}}{(L - M)} \quad (\text{III. 22})$$

$$\frac{di_{0L}}{dt} = \frac{V_{0L} - Ri_{0L}}{(L - M)}$$

En supposant que les mutuelles entre ces inductances de charge sont toutes nulles, et en admettant que les composantes homopolaires sont elles aussi nulles, et avec un repère de Park lié au stator on peut écrire :

$$\frac{di_{dL}}{dt} = \frac{V_{dL} - Ri_{dL}}{L}$$

$$\frac{di_{qL}}{dt} = \frac{V_{qL} - Ri_{qL}}{L} \quad (\text{III. 23})$$

$$\frac{di_{0L}}{dt} = \frac{V_{0L} - Ri_{0L}}{L} = 0$$

Le modèle du système machine, condensateurs d'auto-excitation et charge RL sous forme matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} I_s & 0 & M_d & M_{dq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_s & M_{dq} & M_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -I_r & 0 & I_r + M_d & M_{dq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -I_r & M_{dq} & I_r + M_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{dv_{ds}}{dt} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dl}}{dt} \\ \frac{di_{ql}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ R_r & -w_r I_r & -R_r & w_r(I_r + M_{st}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ w_r I_r & R_r & -w_r(I_r + M_{st}) & -R_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{c} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{c} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{md} \\ i_{mq} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \\ i_{dl} \\ i_{ql} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 24})$$

III.3.4. Les Résultat de la simulation

Les figures III.5 , III.6 , III.7 et III.8 montrent respectivement les tensions et les courants statoriques et les courants de charge et les courants rotoriques.

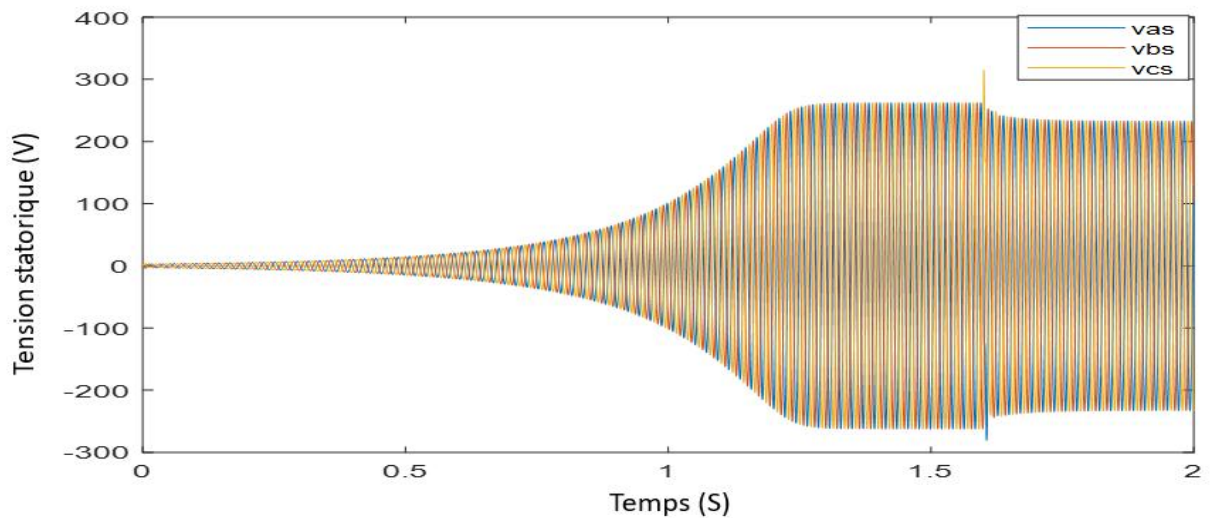


Figure III.5: Les tensions statorique

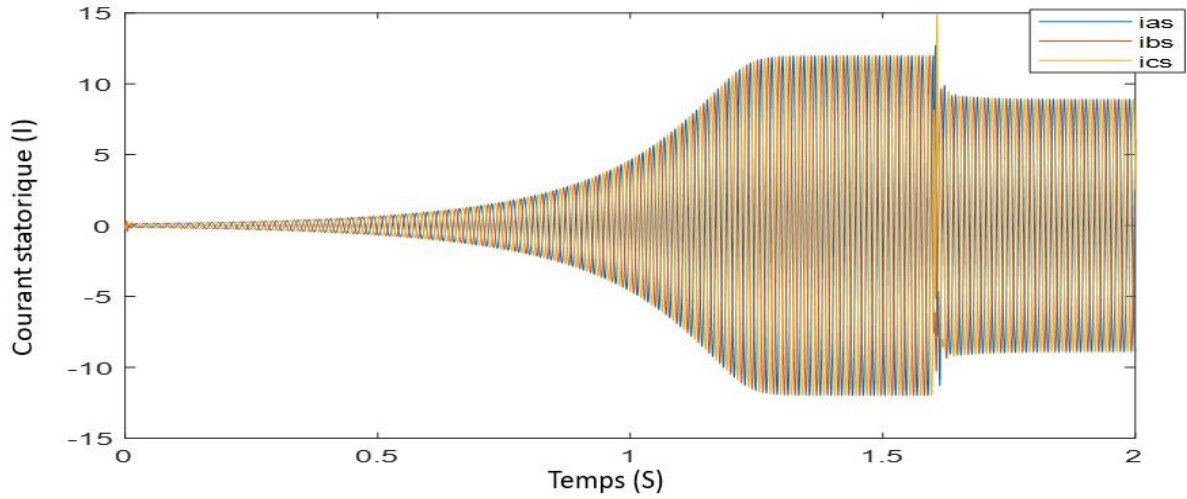


Figure III.6: Les courant statorique

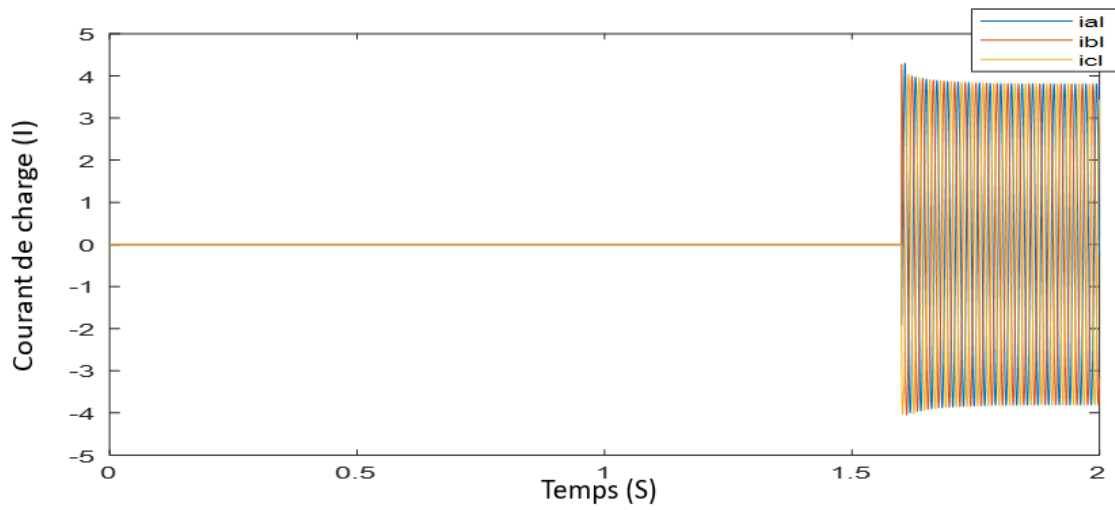


Figure III.7: Les courant de charge

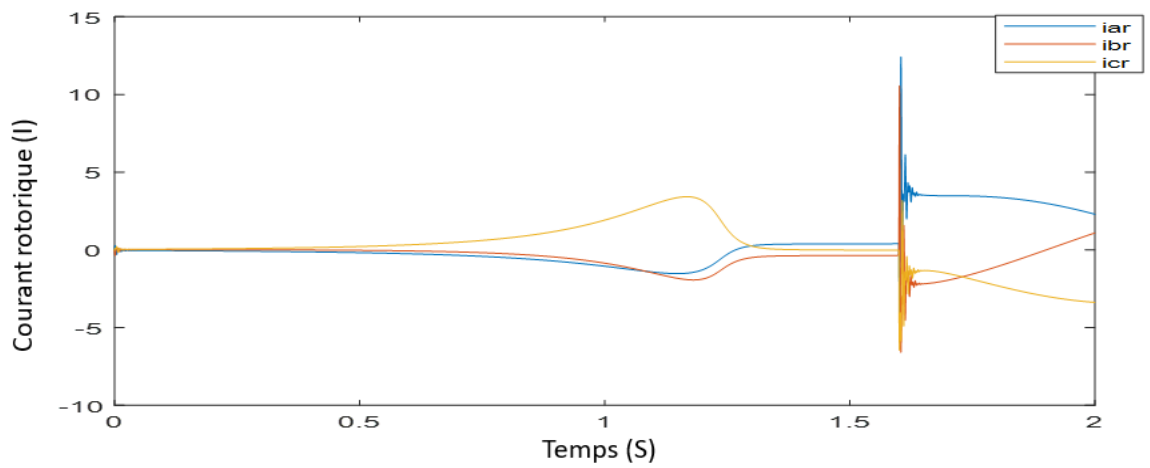


Figure III.8: Les courant rotorique

Nous observons des résultats similaires à ceux obtenus avec la charge résistive, mais nous notons une aggravation de la chute de la tension statorique en présence de l'inductance, car l'impédance totale du système est maintenant plus élevée. De même, le courant statorique diminue également en raison de la baisse de la tension statorique. En d'autres termes, l'introduction d'une charge résistive-inductive entraîne une consommation d'énergie réactive. Cette énergie réactive est alors fournie par la capacité d'amorçage, ce qui diminue automatiquement l'énergie de magnétisation de la machine, entraînant ainsi une diminution accrue de la tension et du courant statorique. De plus, le courant de charge reste nul jusqu'à l'insertion de la charge. Une fois la charge introduite, l'inductance augmente l'impédance totale, ce qui accentue la chute de tension statorique et réduit le courant statorique

III.4. Charge déséquilibrée

L'utilisation d'une génératrice asynchrone pour la production d'électricité dans un site isolé implique souvent que la charge peut être déséquilibrée. Pour analyser cette situation, nous pouvons utiliser le modèle de Park de la machine, qui a été initialement proposé pour les charges équilibrées. Ce modèle transforme les équations triphasées en un cadre de référence de deux axes (d et q), simplifiant ainsi l'analyse des machines électriques.

Cependant, lorsque nous traitons des charges déséquilibrées, il est nécessaire de revenir à la formulation triphasée originale (en abc) pour les équations du circuit électrique extérieur. Cela permet de capturer les effets asymétriques des charges déséquilibrées, qui ne peuvent pas être correctement représentés dans le cadre de référence d,q. En effet, les déséquilibres de charge se manifestent par des différences dans les courants et les tensions entre les phases, ce qui nécessite une approche plus détaillée.[4]

III.4.1. Simulation du générateur asynchrone charge R

Nous avons un déséquilibre des résistances : les résistances des trois phases ne sont plus identiques, chacune ayant sa propre valeur. Les résistances sont spécifiées comme suit : pour la phase a, R_{cha} ; pour la phase b, R_{chb} ; et pour la phase c, R_{chc} . Les équations correspondantes sont :

$$v_{sa} = R_{cha} \cdot i_{cha}$$

$$v_{sb} = R_{chb} \cdot i_{chb} \quad \text{(III.25)}$$

$$v_{sc} = R_{chc} \cdot i_{chc}$$

III.4.2. Simulation du générateur asynchrone charge RL

Nous avons un déséquilibre des résistances et des inductances, chaque résistance et chaque inductance ayant sa propre valeur. Les valeurs sont spécifiées comme suit : pour la phase a, R_{cha} et L_{cha} ; pour la phase b, R_{chb} et L_{chb} ; et pour la phase c, R_{chc} et L_{chc} :

$$\begin{aligned} v_{sa} &= R_{cha} \cdot i_{cha} + L_{cha} \cdot \frac{di_{cha}}{dt} \\ v_{sb} &= R_{chb} \cdot i_{chb} + L_{chb} \cdot \frac{di_{chb}}{dt} \\ v_{sc} &= R_{chc} \cdot i_{chc} + L_{chc} \cdot \frac{di_{chc}}{dt} \end{aligned} \quad (\text{III.26})$$

III.4.3. Les résultats de la simulation pour le premier cas (charge R)

Les figures III.9, III.10 et III.11 montrent respectivement les tensions et les courants statoriques et les courants rotoriques.

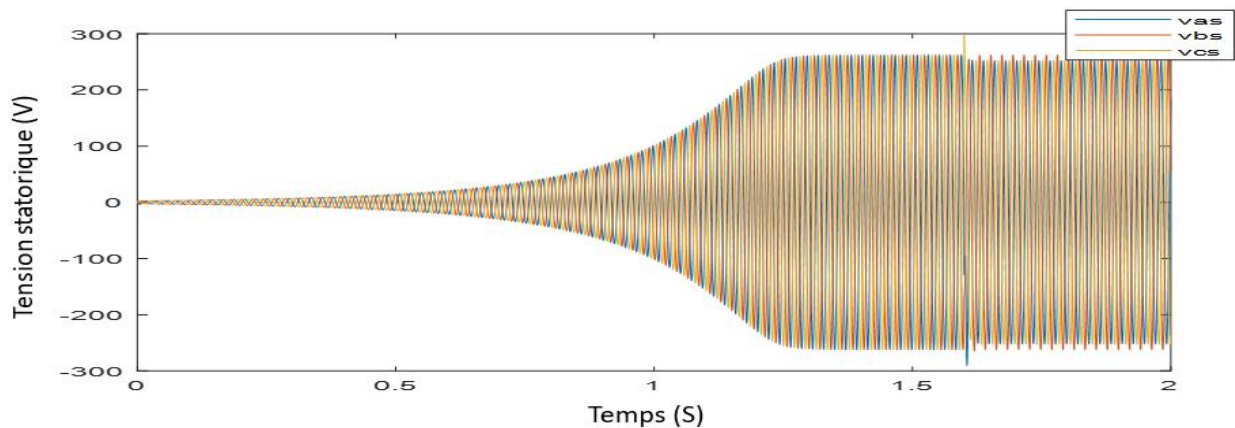


Figure III.9: Les tensions statoriques

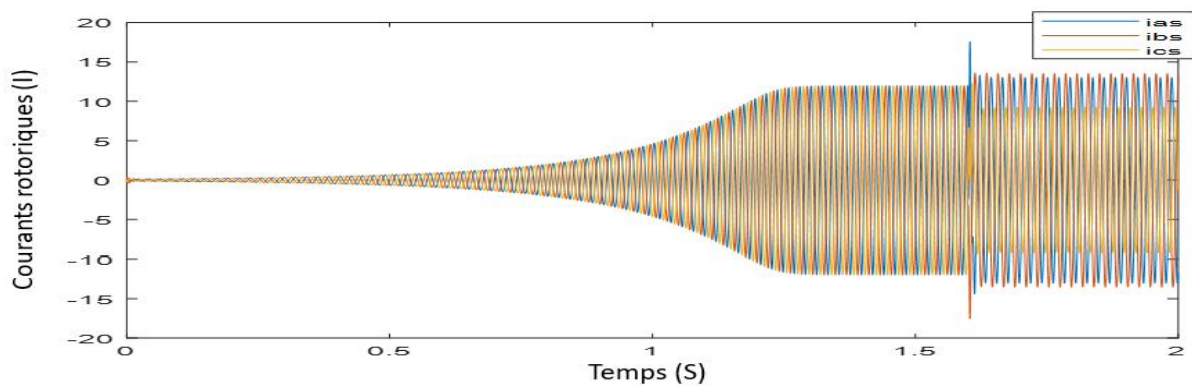


Figure III.10: Les courants rotoriques

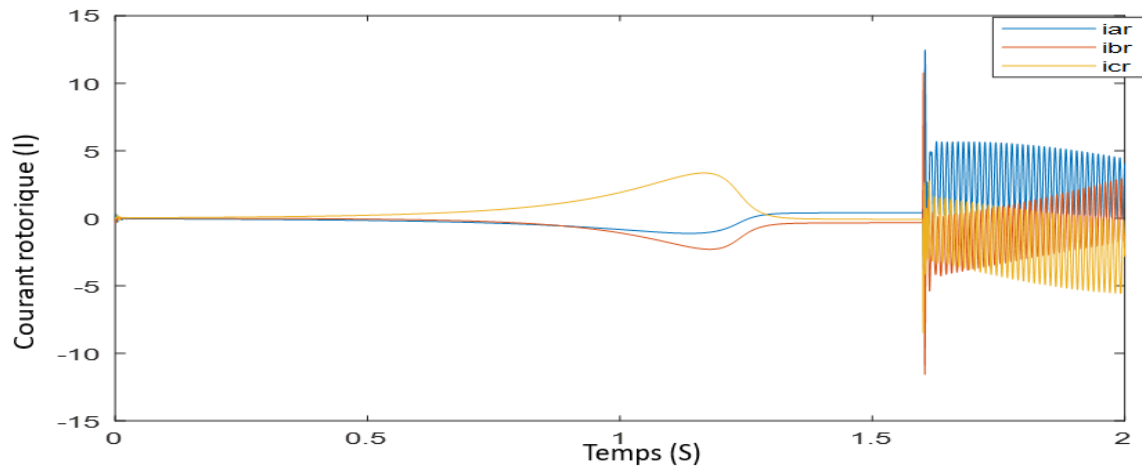


Figure III.11: Les courants rotoriques

III.4.4. Résultat de la simulation pour le deuxième cas (charge RL)

Les figures III.12, III.13, III.14 et III.16 montrent respectivement les tensions et les courants statoriques et les courants de charge et les courants rotoriques

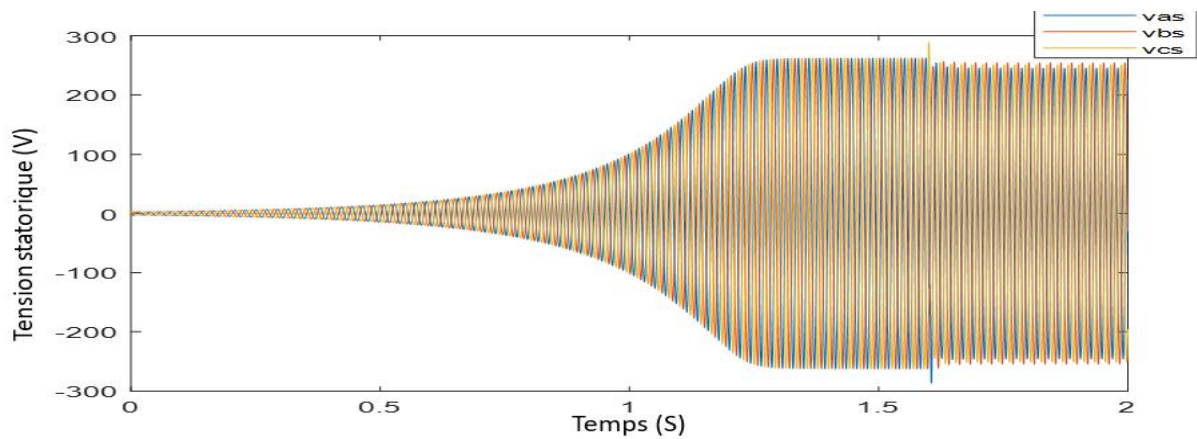


Figure III.12 : Les tensions statoriques

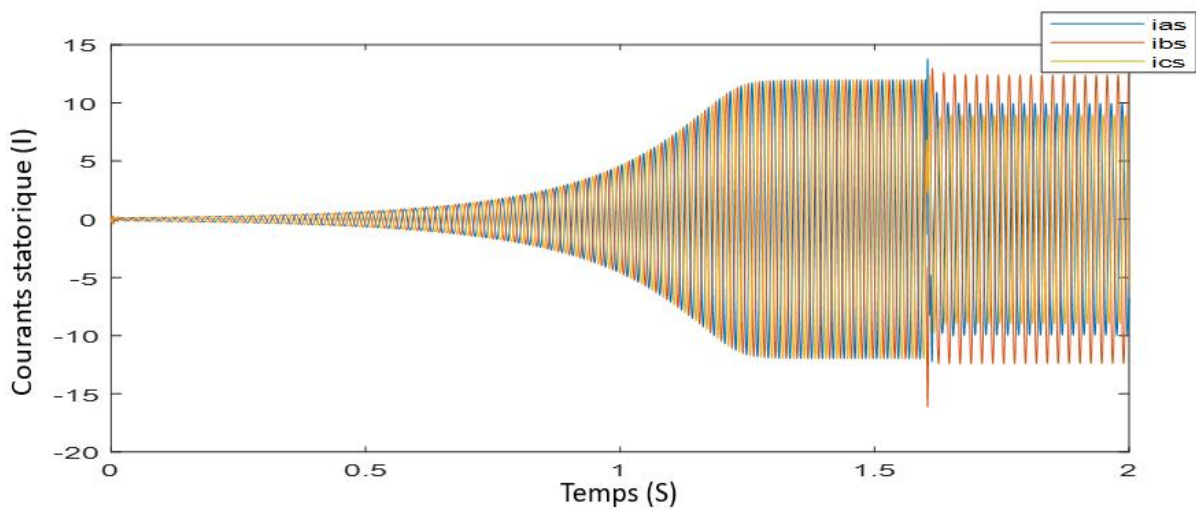


Figure III.13 : Les courants statoriques

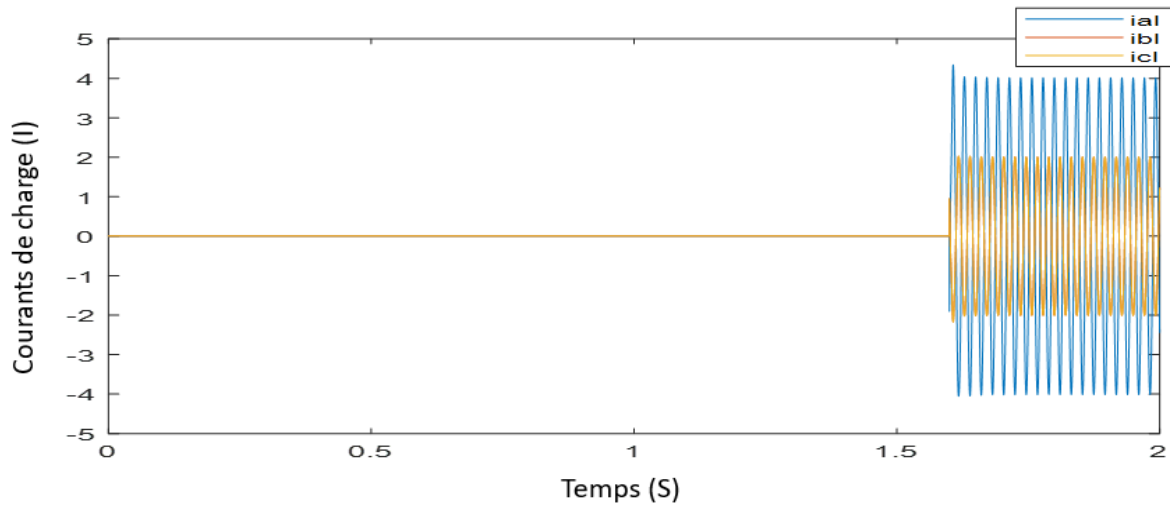


Figure III.14: Les courants de charge

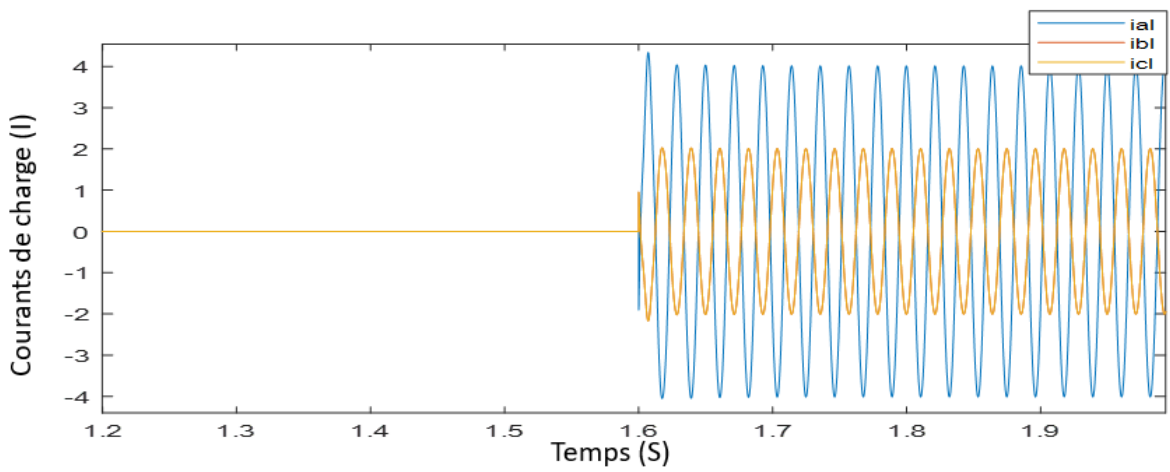


Figure III.15: Un zoom sur les courants de charge

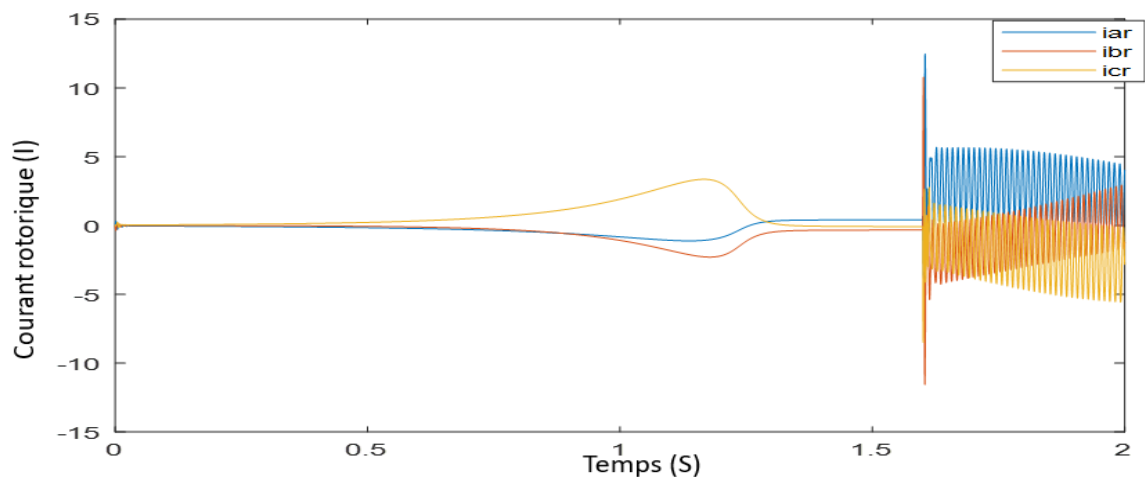


Figure III.16: Les courants rotoriques

Dans les résultats de la simulation, on observe que les charges déséquilibrées de type R et RL induisent une chute des tensions et des courants statoriques. Ces variations non uniformes entre les phases du générateur se traduisent par des écarts significatifs d'amplitude et de phase. De telles conditions peuvent conduire à des inefficacités opérationnelles telles que des pertes d'énergie accrues, des vibrations mécaniques indésirables et une surchauffe des composants. Pour optimiser la performance du générateur et garantir sa durabilité, il est essentiel de détecter et de corriger efficacement les déséquilibres de charge, assurant ainsi un fonctionnement stable et une efficacité énergétique maximale du système

III. Conclusion

Les tests en charge ont révélé que l'introduction d'une charge résistive équilibrée entraîne une chute de tension et du courant statorique, proportionnelle à l'augmentation de la charge. L'ajout d'une charge résistive-inductive aggrave cette chute de tension et du courant, car l'inductance consomme l'énergie réactive fournie par le condensateur qui magnétise la machine. Les charges déséquilibrées provoquent des effets similaires aux charges équilibrées, mais avec des amplitudes de chute de tension variables selon les valeurs des résistances et inductances.

La gestion des génératrices asynchrones auto-excités nécessite une attention particulière à l'équilibrage des charges et à l'ajustement des paramètres de résistance et d'inductance pour minimiser les chutes de tension et assurer des performances optimales. Cela souligne l'importance de stratégies de gestion et de correction adaptées pour maintenir la stabilité et l'efficacité du système sous diverses conditions de charge.

Conclusion générale

Conclusion générale

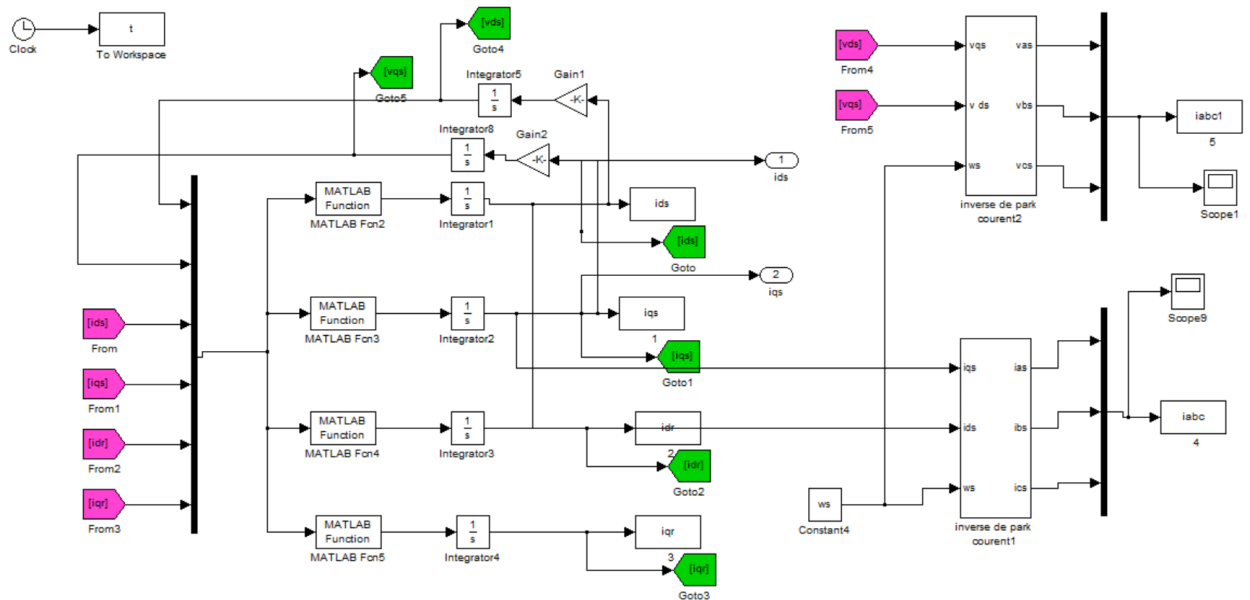
L'essor des énergies renouvelables, et en particulier de l'énergie éolienne, est crucial face à la crise climatique et la raréfaction des ressources fossiles. Ce travail de mémoire nous a permis d'approfondir la compréhension des éoliennes, en se concentrant spécifiquement sur la modélisation et la simulation des génératrices asynchrones auto-excitées.

Nous avons d'abord examiné les différents types d'éoliennes, mettant en évidence les avantages des éoliennes à axe horizontal pour les grandes installations. Ensuite, la modélisation des génératrices asynchrones auto-excitées a été explorée, en détaillant les concepts théoriques et les transformations nécessaires pour simplifier l'analyse dynamique de ces machines. Les modèles linéaires et saturés ont été comparés pour offrir une perspective complète sur leur performance.

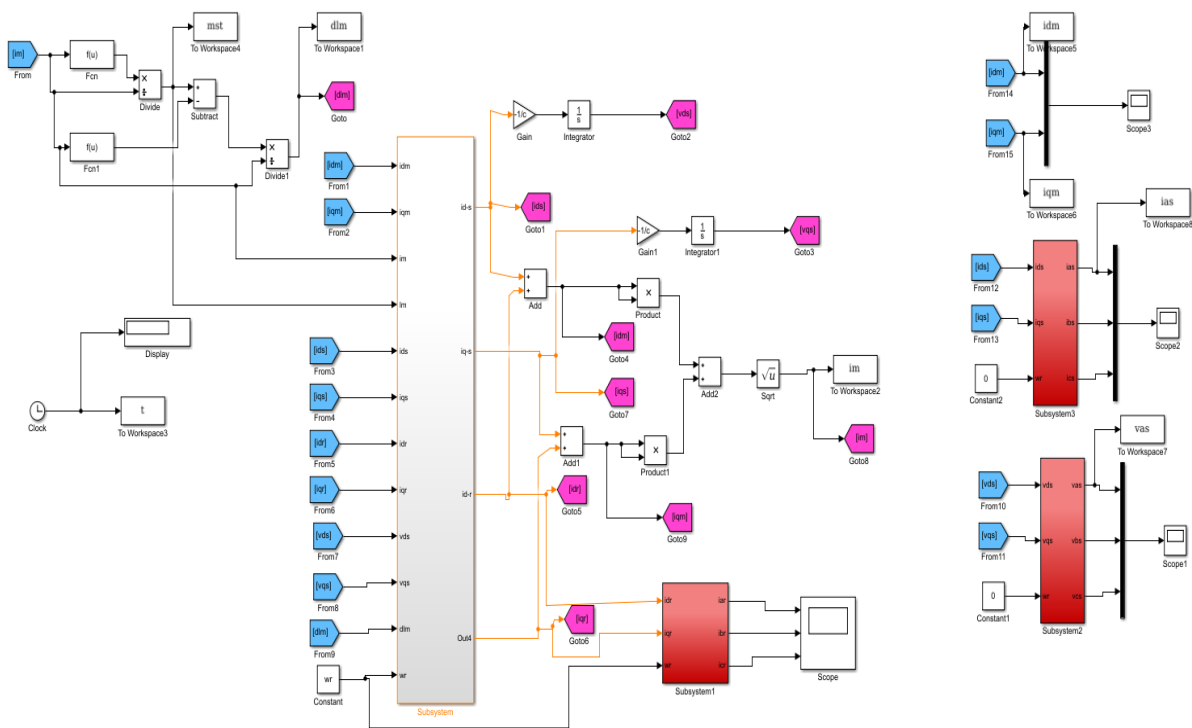
La simulation du générateur asynchrone auto excite sous Matlab/Simulink pour différents types de charge ont révélé que l'introduction d'une charge résistive équilibrée entraîne une chute de tension et du courant statorique, proportionnelle à l'augmentation de la charge. L'ajout d'une charge résistive-inductive aggrave cette chute de tension et du courant, car l'inductance consomme l'énergie réactive fournie par le condensateur qui magnétise la machine. Les charges déséquilibrées provoquent des effets similaires aux charges équilibrées, mais avec des amplitudes de chute de tension variables selon les valeurs des résistances et inductances.

La gestion des génératrices asynchrones auto-excitées nécessite une attention particulière à l'équilibrage des charges et à l'ajustement des paramètres de résistance et d'inductance pour minimiser les chutes de tension et assurer des performances optimales. Cela souligne l'importance de stratégies de gestion et de correction adaptées pour maintenir la stabilité et l'efficacité du système sous diverses conditions de charge.

ANNEXES



Annexe 1 : Schéma de Simulation du générateur asynchrone en régime linéaire



Annexe 2 : Schéma de Simulation du générateur asynchrone en régime saturée

Paramètre de la machine

Paramètre de la machine :

Nombre de pôles : $p=2$

Puissance nominale $P_n=3.5$ kW

Tension nominal $U_n=380/220$ V

Résistance du stator : $R_s=0.79\Omega$

Résistance du rotor : $R_r=0.74\Omega$

Résistance du charge : $R_c=50\Omega$

Inductance mutuelle : $M=0.074$ H

Inductance statorique : $L_s=0.003$ H

Inductance rotorique : $L_r=0.002$ H

La capacite du condensateur : $C=155e-6$

Courant statorique : $I_s =14/8$ A

Courant rotorique : $I_r =9$ A

Inductance : $L=0.12$ H

Tension nominal : $U_n=380/220$ V

Inductance de fuite des enroulements statorique : $l_{\sigma s}=0.003$ H

Inductance de fuite des enroulements rotorique : $l_{\sigma r}=0.003$ H

Vitesse nominale de la machine : $N=1410$ tr/min

Bibliographie

- [1] **KOUKI, Z., BEN MEBARK, F. Z., & HARROUZ, A.** (2020). Contrôle et dimensionnement d'une machine GADA utilisée dans un système éolien (Doctoral dissertation, université Ahmed Draia-ADRAR).
- [2] **HASSAD, M. A.** (2016). Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques (Doctoral dissertation).
- [3] **Ghania, B., & Younes, H.** (2012). Modélisation et simulation de la génératrice asynchrone auto-excitée, application à la conversion de l'énergie éolienne (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri)
- [4] **FARID, Zemmouk et GHILES, Rouas.** Développement du modèle dynamique d'une génératrice asynchrone auto-excitée en régime saturé. 2015. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri
- [5] [**TotalEnergies Électricité et Gaz France SA**, anciennement Total Direct Énergie, est un fournisseur et producteur français privé d'électricité et de gaz présent sur le marché français depuis 2003, filiale de la compagnie pétrolière française TotalEnergies]
- [6] **AL_massrir, A.** Optimisation d'un système de conversion éolienne basé sur la MADA.
- [7] **www .Open AI .com, chat GPT**
- [8] **Abdelmadjid, attar** .conférence scientifique sur l'Énergie en Algérie .13/mai/2023
- [9] **Fairouz, B., & belkacem Nadia, O.** (2017). Modélisation; identification et régulation de tension d'une génératrice asynchrone auto-excitée (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [10] **Frédéric POITIERS** « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », thèse de doctorat l'université de Nantes. France, 2003
- [11] **M. Kassa IDJDARENE** « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », thèse de doctorat de l'Université Abderrahmane MIRA – Béjaia (Algérie), 2010
- [12] **Redjai Walid Bensabra Hamza**, « Commande d'une génératrice asynchrone auto-excite application éoliennes » 2011/2012 ,Université Kasdi Merbah–Ouargla.

[13] Z. KHENNACHE O MELLOUL, « Identification Paramétrique d'une Génératrice Asynchrone autoexcité dédiée à la Conversion d'Energie Eolienne et Micro-hydraulique dans un Site Isolé », PFE, Université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2013.

[14] Z.DAMECH B.MOKHTARI, « Modélisation et simulation d'une génératrice asynchrone en saturation », Diplôme de Master en Génie Electrique, Université Kasdi Merbah, Ouargla 2011/2012.

[15] I. HAMZAOU, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de magister de l'école nationale polytechnique année 2008