

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention : Électrotechnique
Spécialité : Machines Electriques

Présenté par

Megamez El Mokhtar

&

Joka Talent

Modélisation et Identification d'une génératrice asynchrone (GADA)

Proposé par : Mr. R. Hachelaf

Année Universitaire 2017-2018

Remerciements

Avant tout, nous aimerions remercier Dieu qui nous a donné la force, le courage et la santé pendant toutes ces années universitaires. Si ce n'était de Sa grâce, ce travail n'aurait pas été possible.

Un grand merci à nos enseignants Mr. D. Kouchi et Mr. R. Hachelaf. Ces hommes ont travaillé sans relâche avec nous et nous ont donné un aperçu et des conseils à travers notre travail. Nous sommes sincèrement humiliés par leur humilité car ils étaient toujours là pour nous donner la main quand nous en avons besoin. Que Dieu verse continuellement ses bénédictions sur leurs vies.

Nous tenons à remercier le personnel du Laboratoire d'électrotechnique aéronautique de nous avoir permis de réaliser nos expériences.

Nous remercions s'adressent également à nos parents pour leur soutien inconditionnel et irremplaçable. Ils ont été présents pour enlever les doutes, soigner les blessures et partager les joies. Un grand merci aussi à nos frères, nos sœurs et nos amis.

Dernier point, mais non des moindres, nous aimerions remercier toutes les enseignantes et tous les enseignants qui nous ont aidés à gravir ce chemin. Ils ont fait de leur mieux pour nous guider.

Megamez El Mokhtar

Joka Talent

Dédicace

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

A mon frères et mes sœurs.

A mes chers Grands-parents. (Que Dieu les gardes pour moi).

A mes tantes et mes Oncles et leurs familles.

A mon binôme JOKA TALENT

A toutes les familles : megamez et yagoub.

DEDICACES

Ce grand et modeste travail est dédié à mes parents, Mr et Mme Lebson Guriranaï Joka et ma tante Loveness Joka. Leurs efforts ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui et donc je dédié cela aujourd'hui comme un signe d'appréciation pour les reconnaître que leurs efforts n'ont pas été vains. Ils ont toujours été là à travers toutes ces années

Avec grand plaisir je dédiés aussi c'est travail à :

- Mes frères et sœurs amicales, Tatenda, Tinashe, Takunda et Tanaka.*
- Mes frères Algériens d'Electrotech notamment Megamez Mokhtar, Boumba et Fellag Amine. Ils m'ont fait sentir à la maison et mon séjour en Algérie agréable.*
- Ma famille bien-aimée depuis 2012 (Kudakwashe Kawanzaruwa, Manuel Farai, Tatenda Goso, Zhou Tatenda and Gazana Livingstone).*
- Mon amie bien-aimé et amour Grace Makuyana*
- Mon binôme Megamez El Mokhtar*

Listes des acronymes et abréviations

Abréviations

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
MAS	Machine Asynchrone
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
fmm	force magnétomotrice
fem	force électromotrice
MT	moyenne tension
MCC	Machine à courant continu

Symboles

a_s, b_s, c_s	trois enroulements statoriques
a_r, b_r, c_r	trois enroulements rotoriques
C_e, C_r	couple électromagnétique, couple résistant
F	Force électromotrice
V	vitesse
e	longueur d'entrefer
f_v	frottement visqueux
J	moment d'inertie
Ω_m	vitesse mécanique
ω_s, ω_r	Pulsation statorique, pulsation rotorique
ψ	Liaison de flux par seconde
θ_r	l'angle de position de rotor
f_s, f_r	fréquence statorique, fréquence rotorique
g	glissement
$\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}$	les trois flux statoriques
$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$	les trois flux rotoriques
ω_{er}, ω_{es}	La largeur des encoches rotoriques/statoriques
τ_{er}, τ_{es}	pas d'encoche de rotor/stator
i_{ar}, i_{br}, i_{cr}	les trois courants dans les enroulements rotorique
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	les trois courants dans les enroulements statorique
v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	les trois tensions statoriques
v_{ar}, v_{br}, v_{cr}	les trois tensions rotoriques
L_s, L_r, L_m	les inductances statorique, rotorique et mutuelle
X_s, X_r	les réactances statorique, réactances rotoriques
W_1	le nombre de tours par bobine
K_E	le facteur de force électromotrice
V_{SN}	la tension de phase de stator
K_{W1}	facteur de bobinage
$\varnothing ds, \varnothing dr$	flux maximale dans les dents de stator et rotor
D	diamètre d'alésage
D_{ext}, D_{int}	diamètre externe, diamètre interne
D_{fes}, D_{fer}	diamètre du fond d'encoches stator, rotor

e_{bs} , e_{br}	épaisseur des becs d'encoches du stator, rotor
e_{cs} , e_{cr}	l'épaisseur de la culasse stator et rotor
k_{becs} , k_{becr}	Facteur d'ouverture des encoches stator, rotor
A_s	densité linéique de courant statorique
S_{es} , S_{er}	surface totale de la fenêtre d'une encoches stator et rotor
N_s	Vitesse de champ tournant
N_{sync}	Vitesse de synchronisme
N_r	Vitesse mécanique
m	nombre de phases
σ	coefficient de dispersion
T_r	temps de réponse
R_e	Résistance d'entrée
X_e	Réactance d'entrée

Tableau des matières

Remerciements

Résumé

Listes des symboles et abréviations

Listes des figures

Listes des tableaux

Introduction	1
Chapitre 1 : Généralités sur la Machine Asynchrone	2
1.Introduction.....	2
1.1 Constitution de la MAS.....	2
1.1.1 Stator.....	3
1.1.2 Rotor.....	3
1.2 Principe de fonctionnement.....	5
1.2.1 Le concept de glissement de la machine asynchrone.....	6
1.3 Technologies pour les machines asynchrone.....	7
1.4 Les avantages et inconvénients de la MAS.....	7
1.4.1 Avantages.....	7
1.4.2 Inconvénients.....	8
1.5 Générateur Asynchrone.....	8
1.5.1 Générateur à double alimentation sans balais (Brushless).....	8
1.5.2 Générateur à double alimentation.....	8
1.6 Principe de fonctionnement.....	9
1.7 Modes opérationnelles de la MADA.....	11
1.8 Avantages de GADA.....	12
1.9 Composition de système GADA.....	12
1.10 Convertisseurs bidirectionnels.....	14
1.11 Interconnexions au réseau.....	14
1.12 Réduction des pertes magnétisantes.....	15
1.13 Types des machines à double alimentation.....	16
1.13.1 Machines à double alimentation en cascade.....	17
1.13.2 Machine à double alimentations sans balais.....	17

Chapitre 2 Modélisation analytique de la GADA.....	19
2 Introduction.....	19
2.1 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasé.....	19
2.1.1 Expressions électriques dans la repère abc.....	19
2.1.2 Expressions flux magnétiques dans la repère abc.....	20
2.1.3 Equation dynamique du mouvement.....	21
2.2 Modélisation dans le repère dq0.....	21
2.2.1 Transformation de Park.....	21
2.2.2 Choix de repère de référence de Park.....	22
2.2.3 Equations mathématiques de la GADA dans le repère (dq).....	23
2.3 Modèle d'état de la GADA.....	27
2.3.1 Résolution de modèle d'état.....	28
2.5 Résultats de la simulation de la machine.....	28
Chapitre 3 Modélisation de la GADA par la méthode des éléments finis.....	33
3 Introduction.....	33
3.1 Méthodes des éléments finis.....	33
3.2 Modèle Employé.....	34
3.2.1 Mode magnétique transitoire.....	34
3.3 Principe de la méthode des éléments finis.....	34
3.3.1 Fonction d'approximation sur le domaine 2D.....	35
3.4 Logiciel Flux-2D.....	36
3.4.1 Résolution avec logiciel Flux-2D.....	36
3.4.2 Organigramme de simulation avec logiciel Flux-2D.....	36
3.5 Avantages et les inconvénients	38
3.6 Dimensionnement de la GADA.....	37
3.6.1 Sélections des matériaux.....	38
3.6.2 Structures de bobinage de GADA.....	39
3.6.3 Structure de circuit magnétique.....	41
3.6.4 Principe de conservation de flux magnétique.....	41
3.6.5 Dimensionnement du stator.....	42
3.6.6 Dimensionnement de rotor.....	43

3.6.7 Dimensionnement d'entrefer.....	44
3.7 Résultats de Simulation.....	45
3.7.1 Régime Sain.....	45
3.7.2 Tensions rotoriques déséquilibrés avec équilibré.....	52
Chapitre 4 Etudes expérimentaux et Identification des paramètres de la MADA.....	53
4.1 Introduction.....	53
4.2 Identification paramétrique.....	53
4.2.1 Schéma Equivalent.....	53
4.2.2 Méthode de la plaque signalétique.....	54
4.2.3 Méthode des essais classiques.....	54
4.2.4 Identification de la machine asynchrone à rotor bobiné.....	55
4.2.4.1 Mesure des résistances.....	55
4.2.4.2 Méthode statique du quadripôle.....	55
4.2.4.3 Essai à rotor ouvert.....	56
4.2.4.4 Essai à stator ouvert.....	56
4.2.4.5 Essai à rotor en court-circuit et rotor bloqué.....	57
4.2.4.6 Essai à stator en court-circuit et rotor bloqué.....	57
4.2.5 Identification des paramètres mécaniques.....	58
4.2.5.1 Essai à ralentissement.....	58
4.2.6 Résultats expérimentaux.....	60
4.2.6.1 Introduction.....	60
4.2.6.2 Procédure d'identification des paramètres.....	60
4.2.7 Résultats d'identification.....	62
4.2.7.1 Identification des paramètres mécaniques.....	63
4.2.8 Test des paramètres d'identification.....	64
4.3 Etude expérimentale des caractéristiques de la GADA	65
4.3.1 Introduction.....	65
4.3.2 Procédure des essais de GADA.....	65
4.3.3 Résultats des essais pratiques.....	67
Conclusion générale.....	75
Annexes.....	76

Bibliographie.....81

Listes des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Aperçu d'une machine asynchrone	2
Figure 1.2 : Stator d'une machine asynchrone triphasé.....	3
Figure 1.3(a) : rotor à cage (b) : les barres de rotor à cage court-circuité	4
Figure 1.4 : rotor bobiné.....	4
Figure 1.5 : Modes et régimes de fonctionnement de MADA.....	11
Figure 1.6 : machine à double alimentation dans une chaine des systèmes éolienne.....	13
Figure 1.7 : Connection de GADA au réseau en utilisant (a) transformateurs à 2 enroulements (b) transformateurs à 3 enroulements.....	14
Figure 1.8 : Configuration court circuité.....	15
Figure 1.9 : Configuration triangle-étoile.....	15
Figure 1.10 : Principe de MADA en cascade.....	16
Figure 1.11 : principe de machine à double alimentation sans balais.....	17

Chapitre 2

Figure 2.1 : Représentation schématique d'une MAS triphasée au stator et rotor.....	18
Figure 2.2 : Modèle de Park de la MADA.....	21
Figure 2.3 : Représentation de schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé.....	24
Figure 2.4 : Evolution de courants rotoriques.....	27
Figure 2.5 : (a) Evolution des tension statoriques (b) Partie zoomé de tension statorique..	27
Figure 2.6 : (a) Evolution des courants statoriques (b) Partie zoomé des courant statorique.....	28
Figure 2.7 : (a) Evolution des tension statoriques (b) partie zoomée des tensions statorique.....	28
Figure 2.8 : (a) Evolution des courants statoriques ; (b) et (c) Zoom d'évolution des courants statoriques.....	29

Figure 2.9: (a) Evolution des tensions statoriques (b) zoom d'évolution des tensions statoriques.....	29
Figure 2.10 : (a) Evolution des courants statoriques ; (b) et (c)Zoom d'évolution des courants statoriques.....	30
Figure 2.11 : Evolution des tensions statoriques.....	30

Chapitre 3

Figure 3.1: Fonction d'interpolation d'un élément.....	34
Figure 3.2 : Différents modules du logiciel de CAO (Flux2D)	38
Figure 3.3 : graphe B(H) du matériau magnétique fer.....	40
Figure 3.4: Bobinage triphasé, 4 pôles en définissent des connexions.....	41
Figure 3.5: structure de circuit magnétique.....	42
Figure 3.6 : Illustration de la conservation du flux dans le circuit magnétique du stator...	43
Figure 3.7: distribution de densité de flux magnétique.....	45
Figure 3.8 : Répartition des pôles et isovalues de flux magnétiques.....	46
Figure 3.9 : Evolution de composant normale d'induction de la machine.....	46
Figure 3.10 : Evolution de la composant tangentielle d'induction.....	47
Figure 3.11 : Evolution de tension statorique.....	47
Figure 3.12 : Evolution de tension statorique.....	48
Figure 3.13 : Zoom d'évolution des tensions statoriques.....	48
Figure 3.14 : Vitesse de rotation de la machine à 500tr/min.....	49
Figure 3.15 : Evolution de tension statorique.....	50
Figure 3.16: vitesse mécanique de rotor.....	50
Figure 3.17 : (a) évolution des tensions statoriques ; (b) : Zoom d'évolution des tensions statoriques.....	50
Figure 3.18 : (a) évolution des courants statoriques (b) évolution de courants juxtaposé...	51
Figure 3.19 : Evolution des tensions statoriques.....	51
Figure 3.20 : (a) Evolution des courants statoriques ; (b) Zoom d'évolution des courants statoriques.....	52
Figure 3.21 : évolution de courant statorique et les spectres des harmoniques.....	53

Chapitre 4

Figure 4.1 : Circuit équivalent approximatif en régime permanent ramené au stator.....	55
Figure 4.2 : Machine asynchrone assimilée à un quadripôle.....	57
Figure 4.3 : graphe de ralentissement.....	61
Figure 4.4 : montage de deux wattmètres.....	63
Figure 4.5 : Schéma équivalent dans l'essai à vide.....	63
Figure 4.6 : Schéma équivalent dans l'essai à rotor bloqué.....	64
Figure 4.7 : Ralentissement de la machine.....	65
Figure 4.8 : évolution des courants rotoriques avec un zoom.....	66
Figure 4.9 : évolution des tensions statoriques avec zoom.....	67
Figure 4.10 : évolution des courants statoriques avec zoom.....	67
Figure 4.11 : Poste de travail avec les matériels d'expérience.....	68
Figure 4.12 : évolution des tensions statoriques par l'oscilloscope.....	69
Figure 4.13 : Evolution des tensions statoriques.....	69
Figure 4.14 : évolution des courants statoriques.....	70
Figure 4.15 : évolution des tensions statoriques.....	70
Figure 4.16 : Les spectres des tension statoriques avec charge équilibré.....	69
Figure 4.17 : évolution des courants statoriques.....	71
Figure 4.18 : Les spectres des harmoniques de courants statoriques.....	72
Figure 4.19 : (a) Evolution des tensions statoriques (b) évolution en zoom.....	72
Figure 4.20 : Evolution des tensions statoriques.....	73
Figure 4.21 : Les spectres des harmoniques des tension statoriques.....	73
Figure 4.22 : Evolution des courants statoriques.....	74
Figure 4.23 : Les spectres des harmoniques des courants statoriques.....	74
Figure 4.24 : Evolution de tensions statoriques.....	75
Figure 4.25 : Les spectres des harmoniques des tensions statoriques.....	75

Annexes

Figure A.1 : Circuit équivalent électrique de la GADA en charge.....	78
Figure A.2 : (a) Maillage triangulaire du modèle simulé (b) Zoom de maillage.....	79

Figure A.3 : Plan original de stator.....	80
Figure A.4 : Plan original d'encoche statorique.....	81
Figure A.5 : Plan original d'encoche rotorique.....	81
Figure B.1 : Plaque signalétique de MCC de laboratoire.....	82
Figure B.2 : Plaque signalétique de la MADA de laboratoire.....	82

Liste de tableaux

Tableau 3.1 : B(H) du matériau magnétique fer.....	40
Tableau 4.1 : Résultats de la méthode de plaque signalétique.....	64
Tableau 4.2 : Résultats des mesures et calculs d'un rotor bloqué.....	65
Tableau 4.3 : Résultats des mesures et calculs à vide.....	65
Tableau A.1 : Description du stator de la machine.....	79
Tableau A.2 : Description du rotor de la machine.....	80

Introduction

Ces dernières années, l'intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles ; l'énergie éolienne est véhiculée par les vents, ceux-ci sont dus indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents. Un aérogénérateur (couramment appelé éolienne) est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants. Parmi les machines utilisées dans l'exploitation de l'énergie éolienne est la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

La MADA avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement. Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. La MADA a un grand avantage que la machine synchrone car il peut être utilisé dans un système hybride par rapport la machine synchrone qui est utilisée dans les systèmes éoliens autonomes.

Chapitre 1 : Généralités sur la Machine Asynchrone

1. Introduction

La machine asynchrone est la plus commune de toutes les machines électriques. Également la machine à courant continu, une machine asynchrone est formée d'un stator et d'un rotor, ces derniers étant montés sur des paliers et séparés du stator par un entrefer. Le noyau du stator, composé de tôles, porte des conducteurs encastrés dans les encoches. Ces conducteurs sont interconnectés d'une façon prédéterminée et composent les enroulements d'induit. Une machine asynchrone marche sur la base de l'interaction des courants de rotor induits et du champ d'entrefer. Si le rotor est fait à marcher sous le couple développé par cette interaction, la machine fonctionnera comme un moteur. D'autre part, le rotor peut être entraîné par une agence externe au-delà de la vitesse de telle sorte que la machine commence à produire de l'énergie électrique, il fonctionne alors comme un générateur asynchrone [1].

1.1 Constitution

L'ordre d'une machine asynchrone triphasée est présentée sur la figure 1.0, Elle est composée d'une partie fixe (stator) et d'une partie tournante (rotor) magnétiquement couplées.

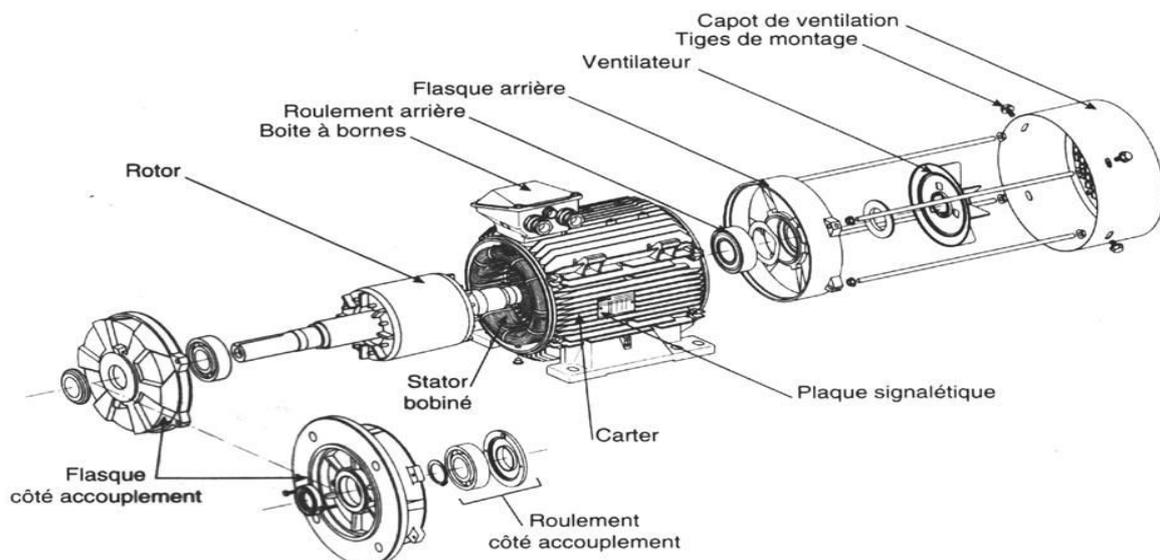


Figure 1.1 : Aperçu d'une machine asynchrone

1.1.1 Stator

La partie immobile appelée stator comporte en fait un circuit magnétique totalement feuilleté en forme de couronne dont la périphérie interne est entaillée régulièrement d'un certain nombre d'encoches similaires. Dans ces encoches arrivent s'arranger les conducteurs des enroulements statoriques identiques correctement disposés le long d'un entrefer de telle sorte que leurs axes forment des angles de 120° entre eux.



Figure 1.2: Stator d'une machine asynchrone triphasé

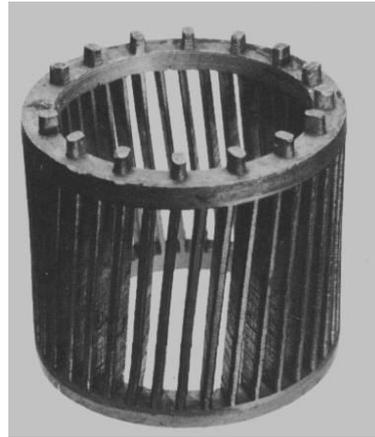
1.1.2 Rotor

Le rotor est réalisé de deux façons :

- a) **Rotor à cage** : Une le rotor à cage est constitué d'une série de barres conductrices disposées dans des encoches creusées dans la face du rotor et court-circuitées à chaque extrémité par de grands anneaux de court-circuit. Cette manière est appel comme un rotor à cage parce que les conducteurs, si elles sont observées par eux-mêmes, correspondrait à l'une des roues d'exercice que les écureuils ou les hamsters courent sur.



a)



b)

Figure 1.3 : a) rotor à cage b) les barres de rotor à cage court-circuité

b) **Rotor bobiné** : Le rotor bobiné a un ensemble complet des enroulements triphasés qui sont semblables aux enroulements sur le stator. Les trois phases des enroulements du rotor sont couplées généralement en Y, et les extrémités des trois fils du rotor sont attachées aux bagues collectrices sur l'arbre du rotor. Les enroulements du rotor sont court-circuités à travers des brosses circulant sur les bagues collectrices.

Les machines asynchrones à rotor bobiné sont plus coûteuses que les machines asynchrones à cage et nécessitent beaucoup plus d'entretien en raison de l'usure de leurs balais et de leurs bagues.



Figure 1.4 : rotor bobiné

1.2 Principe de fonctionnement

Un courant alternatif est appliqué dans l'induit du stator qui crée un flux dans le circuit magnétique du stator. Ce flux induit une force électromotrice dans les barres conductrices du rotor car elles sont "coupées" par le flux pendant le déplacement de l'aimant ($E = BVL$ (loi de Faraday)). Un courant circule dans le circuit du rotor en raison de la force électromotrice induite qui, à terme, produit une force, ($F = BIL$) peut être changé en couple comme sortie [1] [2].

Le couple est gardé tant que le flux de rotation et le courant du rotor sont présents. Le rotor tournera toujours dans le sens du champ tournant à la vitesse $N_r, N_r < N_{sync}$. Le fonctionnement d'un moteur asynchrone est divisé en deux parties, stationnaire et les périodes de fonctionnement. Au stationnaire, toujours $N_r = 0$ et $S = 1$.

En raisonnement de la vitesse relative entre le champ tournant et les conducteurs stationnaires, une force électromotrice est induit dans ce dernier (loi de Faraday). La fréquence de ce force électromotrice de rotor est la même que la fréquence du stator.

Alors que l'amplitude de cette force électromotrice est proportionnelle à la vitesse relative entre le flux et les conducteurs du rotor, la direction est déterminée par la règle de la main droite. Cette force électromotrice va créer du courant dans les conducteurs du rotor, dont la direction est déterminée par la loi de Lenz. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique [3].

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement, lorsqu'il est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine marche en générateur alternatif mais son stator doit être forcément connecté au réseau car lui seul peut créer le champ magnétique essentiel pour faire apparaître les courants rotorique un fonctionnement en générateur alternatif autonome est toutefois possible à l'aide de condensateurs reliés sur le stator, à stipulation qu'il existe un champ magnétique rémanent.

Sur les moteurs asynchrones triphasés, le champ tournant est créé par trois bobinages fixes géométriquement décalés de 120° , et parcourus par des courants alternatifs montrant

le même décalage électrique, les trois champs alternatifs qu'ils créent se composent pour établir un champ tournant d'amplitude constante.

1.2.1 Le concept de glissement de la machine asynchrone

La tension induite dans une barre rotorique d'un moteur à asynchrone dépend de la vitesse du rotor par rapport aux champs magnétiques. On désigne par n_s la vitesse de synchronisme, c'est-à-dire la fréquence de rotation du champ statorique dans la machine et n la vitesse de rotation de la machine. Le mouvement relatif est le glissement, qui est la vitesse relative formulée par unité ou par pourcentage [1][7].

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} (\times 100\%) \quad (1.1)$$

Cette équation peut être exprimée en termes de vitesse angulaire ω comme :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} (\times 100\%) \quad (1.2)$$

La vitesse mécanique peut être exprimée comme :

$$n = (1 - g)n_s \quad (1.3)$$

Ou

$$\omega = (1 - g)\omega_s \quad (1.4)$$

La vitesse du champ tournant par rapport au rotor est $\Omega_s - \Omega_m$ et la pulsation ω_r des courant rotorique est alors :

$$\omega_r = p(\Omega_s - \Omega_m) \quad (1.5)$$

Soit $\omega_r = g\omega_s$, Le courant rotorique de pulsation ω_r créent une tension magnétique tournante d'entrefer dont la vitesse par rapport au rotor est : $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$

Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pourcents : d'environ 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut arriver à 10 % pour les petites machines monophasées.

Normalement, le glissement est négatif pour le fonctionnement en génératrice. Les courants induits dans les enroulements rotoriques pulsent à une vitesse angulaire déterminée par la différence entre le synchronisme la vitesse et la vitesse du rotor. En effet, les courants du

stator, ω_r , voit le champ magnétique tournant généré par le stator pulsé à $\omega_s - \omega_r$. Cela signifie la fréquence des courants de rotor, f_r est :

$$f_r = g f_s \quad (1.6)$$

Si le glissement est positif, il signifie que le champ tournant créé par les enroulements du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor.

1.3 Technologies pour les machines asynchrone

- a. **Machines avec un couple standard à rotor bloqué (NEMA design B)** : La plupart des machines asynchrone appartiennent à ce groupe. Le couple à rotor bloqué par unité réduit à mesure que la machine augmente. Il change de 1,3 à 0,7, car la puissance passe de 20 hp à 200 hp. Le courant de rotor bloqué correspondant ne doit pas dépasser 6,4 fois le courant nominal de pleine charge [3].
- b. **Machines à couple de démarrage élevé (NEMA Design C)** : Ces machines sont usées lorsque les conditions de démarrage sont difficiles. Dans la plage de 20 hp à 200 hp, le rotor bloqué est à 200% du couple à pleine charge, ce qui correspond à un par unité de 2 [3].
- c. **Machines à glissement élevé (NEMA Design D)** : La vitesse nominale des machines à glissement élevé se situe généralement entre 85% et 95% de la vitesse synchrone. Ces machines sont utilisées pour accélérer les charges de forte inertie, ce qui prend relativement beaucoup de temps pour atteindre la pleine vitesse [3].

1.4 Les avantages et les inconvénients de la MAS

1.4.1 Avantages

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence

1.4.2 Inconvénient

- Le couple de démarrage très grand que les couples nominaux
- Variation de vitesse (besoin d'un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est strictement non linéaire et l'existence d'un fort couplage

1.5 Générateur Asynchrone

Le générateur asynchrone est beaucoup plus rare que l'alternateur, mais on le trouve dans quelques applications de puissance limitée comme les microcentrales hydrauliques, il adopte surtout la plus grande part du marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à cage d'écureuil pour les puissances modestes, mais aussi avec des machines à rotor bobiné pour les installations plus importantes. Parmi les générateurs asynchrones, il existe le générateur à cage (brushless) et générateur à rotor bobiné.

1.5.1 Générateur à double alimentation sans balais (Brushless)

Le GADA Brushless conserve l'avantage d'utiliser un convertisseur partiellement évalué, mais conseil une plus grande fiabilité, et donc un coût de propriété plus faible, que le GADA à bague en raison du manque de bagues. Le GADA sans balais est principalement une machine à vitesse moyenne, permettant l'utilisation d'une boîte de vitesses simplifiée à un ou deux étages, diminuant ainsi le coût global et le poids de la transmission et améliorer encore la fiabilité [5].

1.5.2 Générateur à double alimentation

La même configuration de machine asynchrone à rotor bobiné peut identiquement servir de générateur asynchrone à double alimentation. Dans ce cas, la puissance mécanique de l'arbre de la machine est convertie en énergie électrique fournie au réseau d'alimentation en courant alternatif par la moyenne des enroulements du stator et du rotor. En outre, la machine fonctionne comme un générateur synchrone dont la vitesse synchrone peut être modifiée en ajustant la fréquence des courants alternatifs alimentant les enroulements du rotor.

Le champ magnétique tournant qui traverse les enroulements du stator du générateur ne tourne pas seulement en raison de la rotation du rotor du générateur, mais aussi en compréhension de l'effet de rotation produit par les courants alternatifs alimentant les enroulements du rotor du générateur. Par conséquent, dans un générateur asynchrone à double alimentation, la vitesse de rotation du rotor et la fréquence des courants alternatifs alimentant les enroulements du rotor déterminent la vitesse du champ magnétique tournant passant dans les enroulements du stator, et donc la fréquence du courant induite à travers les enroulements du stator. Compte tenu des principes de fonctionnement des générateurs

asynchrone doublement alimentés, on peut donc déterminer que, lorsque le champ magnétique du rotor tourne dans le même sens que le rotor du générateur, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique du rotor ajoutent. La fréquence des tensions induites aux bornes des enroulements du stator du générateur peut ainsi être calculée à l'aide de l'équation suivante [5] :

$$f_s = \frac{n_r \times p}{120} + f_r \quad (1.7)$$

f_r est fréquence de courants alimentés au rotor.

Réciproquement, lorsque le champ magnétique au rotor tourne dans le sens opposé à celui du rotor du générateur, la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique du rotor se soustraient l'une de l'autre. La fréquence des tensions induites aux bornes des enroulements du stator du générateur peut être calculée à comme suivante :

$$f_s = \frac{n_r \times p}{120} - f_r \quad (1.8)$$

La fréquence des tensions alternatives produites au niveau du stator d'un générateur asynchrone à double alimentation est proportionnelle à la vitesse du champ magnétique tournant au niveau du stator. La vitesse du champ tournant du stator lui-même dépend de la vitesse du rotor (résultant de la puissance mécanique sur l'arbre du rotor) et de la fréquence des courants introduit dans le rotor de la machine.

1.6 Principe de fonctionnement

Le GADA fonctionne à la fois hypo-synchrone (vitesse du rotor inférieure à la vitesse synchrone) et modes hyper-synchrones (vitesse du rotor supérieure à la vitesse synchrone) qui permet plage de vitesse opérationnelle d'environ 30% autour de la vitesse synchrone.

Les enroulements du stator peuvent être directement connectés au réseau qui impose la fréquence du courant du stator, f_s . Les courants du stator créent un champ magnétique tournant dans l'entrefer. La vitesse de rotation de ce champ ω_s est proportionnelle à f_s .

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (1.9)$$

Si le rotor tourne à une vitesse différente de celle du champ tournant, il voit une variation de flux magnétique. Par conséquent, selon la loi d'induction de Faraday, des courants sont

induits dans les enroulements de rotor. La vitesse mécanique, ω_m , du rotor et la vitesse électrique, ω_r , peuvent être définies comme :

$$\omega_r = p\omega_m \quad (1.10)$$

Le flux lié par les enroulements de rotor change avec le temps si $\omega_r \neq \omega_s$. La machine fonctionne en génératrice si $\omega_r > \omega_s$. Le glissement, g , définit la vitesse relative du rotor par rapport à celui du stator :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1.11)$$

Normalement, le glissement est négatif pour le moteur en génératrice. Les courants induits dans les enroulements de rotor pulsent à une vitesse angulaire déterminée par la différence entre la vitesse synchrone et la vitesse du rotor. En effet, les courants du stator, ω_r , voient le champ magnétique tournant créé par le stator pulsé à $\omega_s - \omega_r$. Cela signifie la fréquence des courants de rotor, f_r est

$$f_r = gf_s \quad (1.12)$$

Si le glissement est positif, il signifie que le champ tournant créé par les enroulements du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor (régime hypo synchrone) et si le glissement est négatif c'est-à-dire les champs tournants créés par les enroulements du stator et du rotor sont dans des sens opposés et que la machine fonctionne en régime hyper-synchrone.

1.7 Modes opérationnelles de la MADA

Nous pouvons réécrire l'équation (1.11) comme suit :

$$g = \frac{f_r}{f_s} \quad (1.13)$$

D'après cette équation on peut distinguer 4 régimes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [1][2] :

- Mode stationnaire ($g=1$) : le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s ; par conséquent, le rotor est le siège d'une force électromotrice induite avec une fréquence f_r . Dans ce mode, la machine fonctionne comme un transformateur.

- Mode hypo-synchrone ($0 < g < 1$) : en dirigeant le rotor dans la sens de flux du stator, la fréquence f_r de rotor commence à diminuer. Plus la vitesse de rotor s'approche de celle du synchronisme plus f_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor déclin linéairement et adapte une valeur très faible qui correspond à la vitesse de synchronisme. Le glissement étant positif, dans cette mode le rotor recevoir l'énergie électrique de réseau mais le stator continue envoyer l'énergie électrique au réseau
- Mode synchrone ($g=0$) : au point où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas, les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique, donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier. Par conséquent, il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- Mode hyper-synchrone ($g < 0$), l'augmentation de la vitesse relative des enroulements de rotor par rapport à celle de flux statorique même à une augmentation de la tension induite du rotor. Car la vitesse rotorique est supérieure à la vitesse de synchronisme de stator, le glissement est négatif et le rotor fourni l'énergie électrique vers le réseau. Cette mode est le plus efficace.

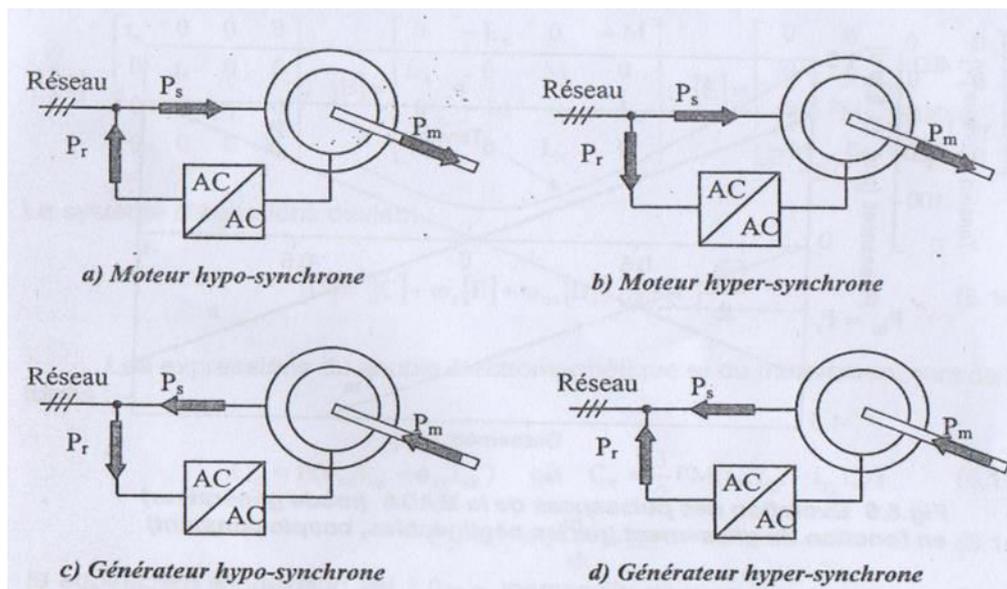


Figure 1.5: Modes et régimes de fonctionnement de MADA [2]

Les puissances de la machine en négligeant les pertes sont donne par :

$$P_r = -gP_s \quad (1.14)$$

$$P_m = -(1 - g)P_s \quad (1.15)$$

Quand la machine fonctionne en mode génératrice, en supposant qu'elle entraînée à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme, la puissance P_r est absorbée par le rotor. Si la vitesse d'entraînement augmente au-delà de la vitesse de synchronisme, la puissance P_r change de direction et le rotor fournit de la puissance pour une éventuelle récupération.

1.8 Avantages de GADA

Il a la capacité pour le fonctionnement à vitesse variable, le contrôle de puissance réactive, et réduit la puissance nominale de convertisseur. En raison du fait que le côté du rotor présente des tensions, qui sont au plus 20% du stator si de tension, le kVA minimum du convertisseur est d'environ 20% du cas d'une machine connectée par convertisseur bidirectionnel.

La vitesse optimale peut être choisie en ajustant la fréquence et la phase de la tension qui est appliquée au rotor et on peut avoir la puissance maximale. La GADA peut être contrôlé avec précision en raison du fait que le convertisseur de puissance peut ajuster à la fois l'amplitude et la phase de la tension appliquée au rotor. Cet attribut, associé à la commande de tangage dans les éoliennes, offre à l'opérateur un contrôle de puissance plus précis, en particulier dans les vents violents où une puissance élevée peut causer de graves dommages à l'équipement [6].

Les rotors du générateur sont typiquement bobinés avec 2 à 3 fois le nombre de tours du stator. Cela signifie que les tensions du rotor seront plus élevées et les courants respectivement inférieurs. Ainsi, dans la plage de vitesse opérationnelle typique de $\pm 30\%$ autour de la vitesse synchrone, le courant nominal du convertisseur est par conséquent plus bas, ce qui conduit à un coût inférieur du convertisseur [6].

1.9 Composition de système de GADA

GADA est fondamentalement une machine asynchrone conventionnelle que le stator est directement connecté au réseau à travers un transformateur, et la connexion du rotor vers le stator (et le réseau) est via un convertisseur de source de tension bidirectionnel. Le rotor, le système de convertisseur se compose d'un convertisseur de côté de réseau et du

convertisseur côté de rotor connecté via un lien à courant continu. Un schéma simplifié d'une énergie éolienne basée sur le GADA système de génération est illustré à la figure 1.6.

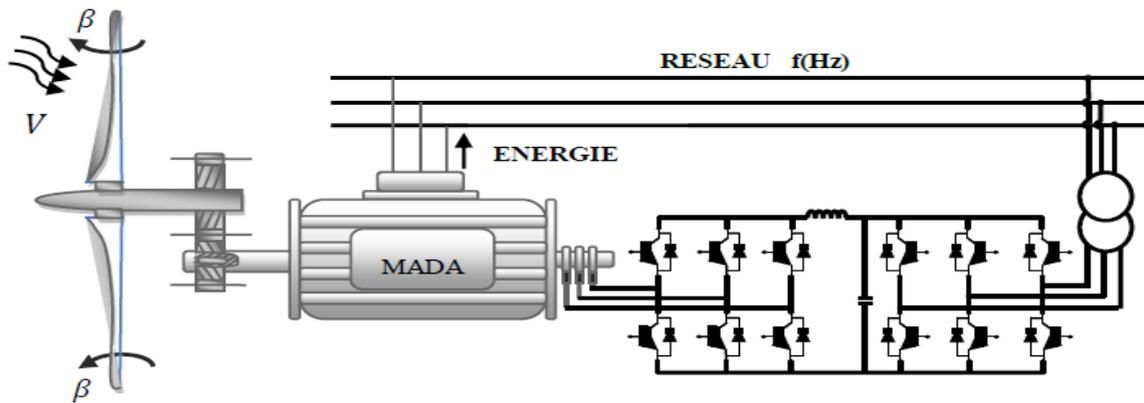


Figure 1.6 : machine à double alimentation dans une chaîne des systèmes éolienne

La taille du convertisseur n'est pas liée à la puissance totale du générateur mais à la plage de vitesse sélectionnée et, par conséquent, à la puissance de "glissement", ainsi le coût du convertisseur augmente lorsque la plage de vitesse devient plus large. Le choix de la plage de vitesse est donc basé sur l'optimisation des coûts d'investissement et augmentation de l'efficacité. Puisque le GADA est connecté au réseau les courants transitoires élevés dus aux perturbations du réseau peuvent détruire les composants du convertisseur de rotor. Un système de protection appelé "crowbars" est utilisé dans lequel le l'enroulement du rotor peut être court-circuité pendant la période de défaut via une petite résistance et libéré lorsque la faute est effacée.

1.10 Convertisseurs Bidirectionnel

Les convertisseurs qui sont connectés entre le rotor et le stator de la machine sont généralement convertisseurs de source de tension bidirectionnel, cependant un convertisseur matriciel pourrait être utilisé alternativement. Les avantages par rapport à la machine connectée sont que l'évaluation du convertisseur est réduit d'environ un facteur compris entre 2 et 5, puisque le calibre est maintenant basé sur le rotor les tensions qui sont liées à la plage de vitesse de la machine. Les tensions du rotor sont liées aux tensions du stator par :

$$|v_r| = g|v_s| \quad (1.16)$$

La puissance nominale du convertisseur est alors définie par la vitesse maximale et le courant et tension maximale de stator à cette vitesse. Le rapport de tours qui existe à travers la machine est normalement supposé être 1 pour la simplicité et, par conséquent, la magnitude du courant du rotor est égale à l'amplitude du courant du stator. Si la limite de vitesse supérieure est considérée comme étant de 1,2 vitesse de synchronisme, le taux de conversion minimum sera de 20% de celui de la machine. Cependant, pour des raisons pratiques, une note de 30 à 50% pourrait être utilisée en fonctionnement transitoire et la capacité de fournir une puissance réactive du stator.

1.11 Interconnexions au réseau

Le GADA est connecté au réseau de niveau moyenne tension (MT) par un transformateur élévateur. Puisque le convertisseur côté réseau a besoin d'ajouter un transformateur supplémentaire pour faire correspondre la tension de sortie du convertisseur à la tension de ligne, soit deux, des transformateurs à 2 enroulements ou un transformateur à 3 enroulements peuvent être utilisés figure 1.7.

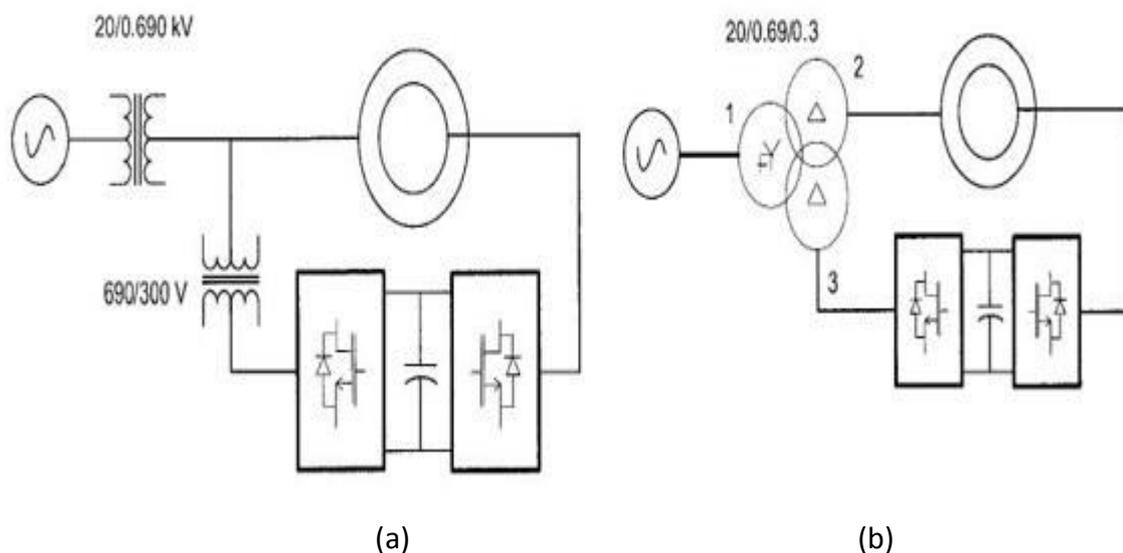


Figure 1.7 : Connection de GADA au réseau en utilisant (a) transformateurs à 2 enroulements (b) transformateurs à 3 enroulements

1.12 Réduction des pertes magnétisantes

Dans une machine asynchrone ordinaire, le stator est alimenté par un convertisseur, ce qui signifie qu'il est possible de réduire les pertes dans la machine en utilisant un niveau de

flux approprié. En cas de faibles charges, il est possible de réduire le niveau de flux, ce qui réduit les pertes magnétisantes et améliore le rendement. Cependant, dans le système GADA, le stator est connecté au réseau et le niveau de flux est étroitement lié à la tension du stator. Il existe 2 méthodes pour réduire les pertes magnétisantes du GADA. Cela peut être fait par :

- Court-circuiter le stator de GADA à basse vitesse. Cette mise en place s'appelle GADA en court-circuit.
- Avoir le stator connecté en triangle à haute vitesse et connecté en étoile à basse vitesse. Ceci est appelé GADA triangle-étoile connexion.

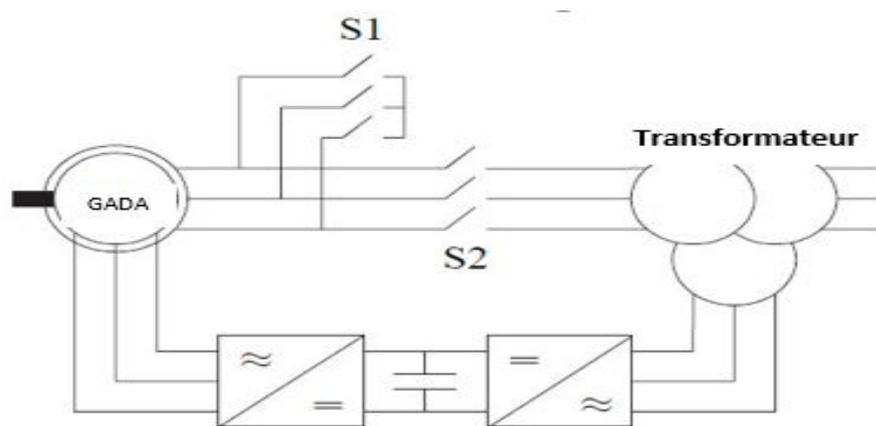


Figure 1.8: Configuration court circuit

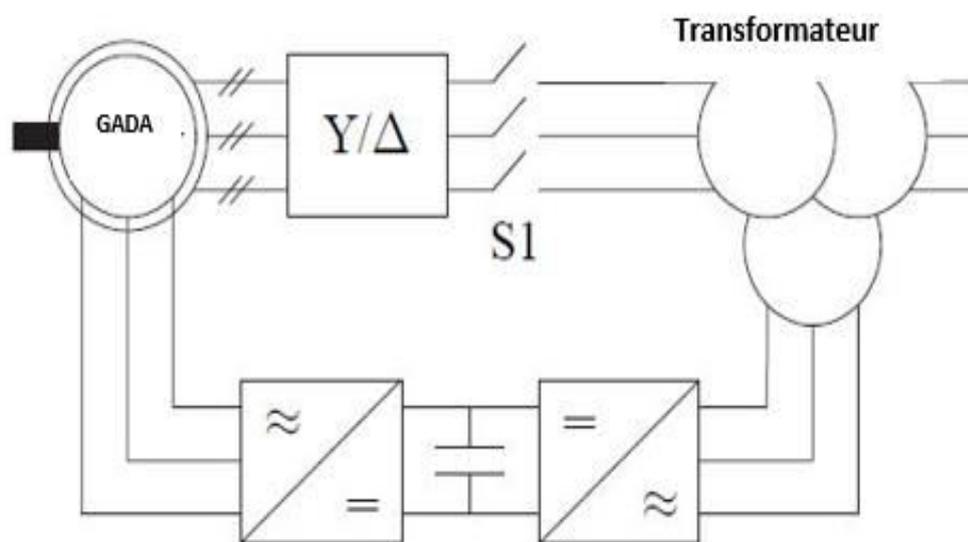


Figure 1.9 : Configuration triangle-étoile

1.13 Types de machines à double alimentation

1.13.1 Machines à double alimentation en cascade

La MADA en cascade se compose de deux MADA avec des rotors enroulés qui sont connectés mécaniquement à travers le rotor et électriquement à travers les circuits du rotor. Le circuit stator de l'une des machines est directement connecté au réseau tandis que le stator de l'autre machine est connecté via un convertisseur au réseau. Les tensions de rotor des deux machines étant égales, il est possible de commander la machine directement connectée au réseau.

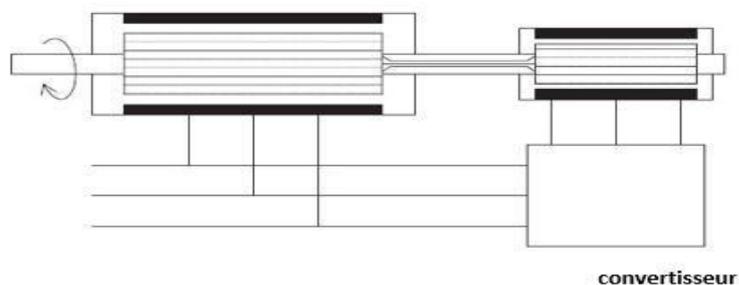


Figure 1.10 : Principe de MADA en cascade

1.13.2 Machine à double alimentation sans balais

C'est une machine asynchrone avec deux enroulements de stator dans la même encoche. C'est-à-dire, un enroulement pour la puissance et un autre pour la commande. Pour éviter un couplage direct du transformateur entre les deux enroulements du stator, ils ne peuvent pas avoir le même nombre de paires de pôles. De plus, pour éviter une traction magnétique déséquilibrée sur le rotor, la différence entre les paires de pôles doit être supérieure à un. Le nombre de pôles dans le rotor doit être égal à la somme du nombre de pôles dans les deux enroulements de stator.

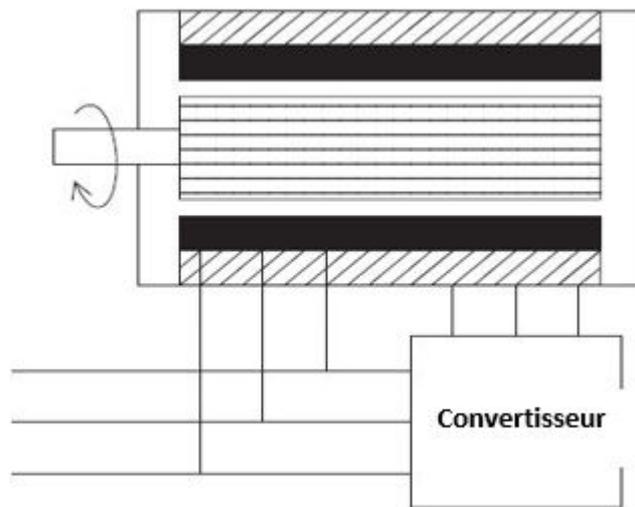


Figure 1.11 : principe de machine à double alimentation sans balais

1.14 Conclusion

Nous avons vu une introduction sur les machines asynchrones qui présentent les différents technologies, constitution simple de la machine asynchrone et le principe de fonctionnement. Nous allons alors voir la modélisation de la GADA avec la méthode analytique dans le chapitre suivant.

■

Chapitre 2 : Modélisation de la GADA

2 Introduction

Cette modélisation est établie termes des équations différentielle et est basé sur la transformation de de Park. Cette transformation permet le passage du système triphasé au système biphasé qui s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composants homopolaires, directe et en quadrature [6].

2.1 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

La figure 2.1 représente dans l'espace électrique les six enroulements de la machine : trois enroulements statoriques (a_s, b_s, c_s) et trois enroulements rotoriques (a_r, b_r, c_r). L'angle θ repère l'axe de la phase a_r du rotor par rapport à l'axe fixe de la phase a_s du stator.

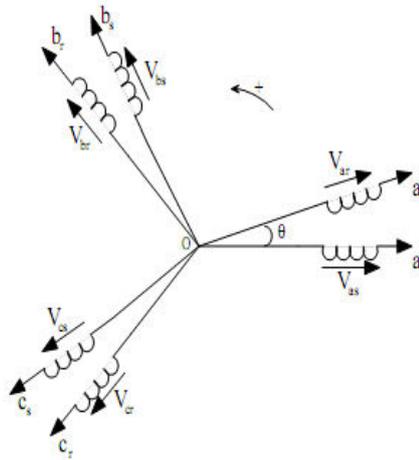


Figure 2.1: Représentation schématique d'une MAS triphasée au stator et rotor

2.1.1 Expressions électriques dans la repère abc

Les relations de tension sur les côtés du rotor et du stator sont obtenues par la loi de Kirchhoff et Faraday :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.0)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

2.1.2 Expressions flux magnétiques dans la repère abc

Les liaisons de flux sont couplées aux courants par les inductances :

a. Flux statoriques :

$$\varphi_{sa} = -L_s i_{sa} - M_s i_{sb} - M_s i_{sc} + M \cos \theta i_{ra} + M \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) i_{rb} + M \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) i_{rc}$$

$$\varphi_{sb} = -L_s i_{sb} - M_s i_{sa} - M_s i_{sc} + M \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) i_{ra} + M \cos \theta i_{rb} + M \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) i_{rc}$$

$$\varphi_{sc} = -L_s i_{sc} - M_s i_{sa} - M_s i_{sb} + M \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) i_{ra} + M \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) i_{rb} + M \cos \theta i_{rc}$$

En forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_s & -M_s & -M_s \\ -M_s & -L_s & -M_s \\ -M_s & -M_s & -L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

$$\text{Alors : } [\varphi_s] = [-L_s][i_s] + [M_{rs}][i_r] \quad (2.2)$$

b. Flux rotoriques :

$$\varphi_{ra} = L_r i_{ra} + M_r i_{rb} + M_r i_{rc} - M \cos \theta i_{sa} - M \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) i_{sb} - M \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) i_{sc}$$

$$\varphi_{rb} = L_r i_{rb} + M_r i_{ra} + M_r i_{rc} - M \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) i_{sa} - M \cos \theta i_{sb} - M \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) i_{sc}$$

$$\varphi_{rc} = L_r i_{rc} + M_r i_{ra} + M_r i_{rb} - M \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) i_{sa} - M \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) i_{sb} - M \cos \theta i_{sc}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\cos \theta & -\cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

$$\text{Alors : } [\varphi_r] = [L_r][i_r] + [M_{sr}][i_s] \quad (2.3)$$

Le l'amplitude maximale de l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est M. Le déplacement angulaire électrique du rotor par rapport au stator peut défini à partir de ω_r , la vitesse du rotor est :

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r dt + \theta_r(0) \quad (2.4)$$

où $\theta_r(0)$ est la position initiale du rotor à $t = 0$.

2.1.3 Equation dynamique du mouvement

La dynamique de l'arbre du générateur relie la vitesse du rotor et le couple électromagnétique. Le couple électromagnétique doit équilibrer à tout instant l'action résultante exercée sur l'arbre du rotor par :

- Le couple mécanique ;
- Le couple des frottements visqueux $f\Omega$;
- Le couple d'inertie des masses en rotation rapporté au diamètre du rotor $J \frac{d\Omega_m}{dt}$;

D'où l'équation dynamique du mouvement :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m - C_e - f_v \Omega \quad (2.5)$$

2.2 Modélisation dans le repère dq0

2.2.1 Transformation de Park

La transformation de Park est un moyen mathématique qui permet de simplifier les équations de la machine triphasée. Cela nous permet de passer d'un système alternatif triphasé (abc) à un système biphasé (dq). L'utilisation de la transformation de Park permet d'obtenir un système d'équations à coefficients indépendants de la position (constants) et donc facile à résoudre. L'orientation stator-flux est adoptée, où l'axe d du cadre d'excitation est aligné avec le flux du stator [4][6].

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = h \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

X= variables électriques de stator ou rotor

θ = angle de transformation

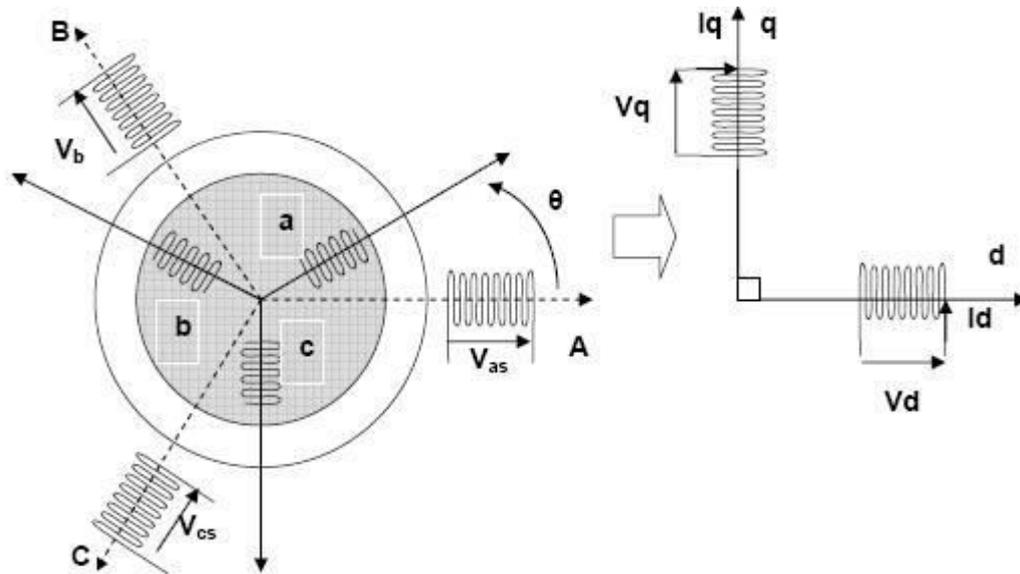


Figure 2.2 : Modèle de Park de la MADA

Ce dernier est pour représenter la quantité dans un autre référentiel, en projetant le vecteur sur les deux axes orthogonaux du nouveau repère, $\bar{X} = X_d + jX_q$. Le coefficient, h , est le facteur d'échelle qui peut être soit $\sqrt{2/3}$ pour la transformation invariante de puissance ou $2/3$ pour une transformation invariante de magnitude. L'angle de transformation pour les quantités de stator et de rotor sont différents [7].

2.2.2 Choix de repère de référence de Park

Pour choisir la référence du Park repose avant tout sur l'objectif de modélisation et la compatibilité de la machine en cours de réalisation. Nous avons trois références de Park, qui sont :

- i. Le repère fixe au stator appelé référentiel stationnaire où $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$; Ce repère a adapté les grandeurs instantanées.
- ii. Le repère fixe au rotor appelé référentiel tournant, $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$. Ce repère de référence a été adapté pour les cas dans les régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.
- iii. Le repère fixe au champ tournant appelé référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone, $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt}$. Ce repère de référence a été adapté pour l'utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones.

2.2.3 Equations mathématiques de la GADA dans le repère (dq)

Pour passer d'un système triphasé à un système triphasé au système biphasé est comme suit :

$$[X_{dq0}] = [K(\theta)][X_{abc}]$$

a. Equations magnétiques

La transformation de Park appliquée aux équations de flux magnétiques :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [-L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\varphi_r] = [L_r][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases}$$

$$[\varphi_s][K_s] = [K_s][-L_s][i_s] + [M_{sr}][K_s][i_r]$$

$$[\varphi_r][K_r] = [K_r][L_r][i_r] - [M_{rs}][K_r][i_s]$$

$$\begin{cases} [\varphi_{dqos}] = [K_s][-L_s][K_s]^{-1}[i_{dqos}] + [K_s][M_{sr}][K_s]^{-1}[i_{dqor}] \\ [\varphi_{dqor}] = [K_r][L_r][K_r]^{-1}[i_{dqor}] - [K_r][M_{rs}]^t[K_r]^{-1}[i_{dqos}] \end{cases}$$

$$[K_s][-L_s][K_s]^{-1} = - \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & Ll_s \end{bmatrix};$$

$$[K_r][L_r][K_r]^{-1} = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & Ll_r \end{bmatrix};$$

$$[K_s][L_{sr}][K_s]^{-1} = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\begin{cases} L_s = \frac{3}{2}L_{sr} + Ll_s \\ L_r = \frac{3}{2}L_{rs} + Ll_r \\ M = \frac{3}{2}L_{sr} \end{cases}$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{os} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & Ll_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & Ll_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Donc nous avons les équations de flux dans le nouveau repère :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = -L_s i_{ds} + M_{sr} i_{dr} \\ \varphi_{qs} = -L_s i_{qs} + M_{sr} i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} - M_{rs} i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} - M_{rs} i_{qs} \end{cases} \quad (2.9)$$

b. Equations Electriques

La transformation de Park appliquée aux équations de flux magnétiques, les équations (2.0), (2.1) devenir :

$$\begin{cases} [v_{dqos}] = -[R_s][i_{dqos}] + [K_s] \frac{d[K_s]^{-1}}{dt} [\varphi_{dqos}] \\ [v_{dqor}] = [R_r][i_{dqor}] + [K_r] \frac{d[K_r]^{-1}}{dt} [\varphi_{dqor}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} [v_{dqos}] = -[R_s][i_{dqos}] + [K_s] \frac{d[K_s]^{-1}}{dt} [\varphi_{dqos}] + \frac{d[\varphi_{dqos}]}{dt} \\ [v_{dqor}] = [R_r][i_{dqor}] + [K_r] \frac{d[K_r]^{-1}}{dt} [\varphi_{dqor}] + \frac{d[\varphi_{dqor}]}{dt} \end{cases}$$

D'où :

$$[K_s] \frac{d[K_s]^{-1}}{dt} = \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } [K_r] \frac{d[K_r]^{-1}}{dt} = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\omega_r = \omega_s - \omega ;$$

$$\text{Donc : } \begin{cases} \vec{v}_{dqos} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} -\varphi_{qs} \\ \varphi_{ds} \end{bmatrix} \\ \vec{v}_{dqor} = \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -\varphi_{qr} \\ \varphi_{dr} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2.10)$$

En remplaçant les flux par leurs expressions dans le system d'équations des tensions nous obtenons :

$$v_{ds} = -r_s i_{ds} - L_s \frac{di_{ds}}{dt} + M \frac{di_{dr}}{dt} + \omega_s L_s i_{qs} - \omega_s M i_{qr} \quad (2.11)$$

$$v_{qs} = -r_s i_{qs} - L_s \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di_{qr}}{dt} - \omega_s L_s i_{ds} + \omega_s M i_{dr} \quad (2.12)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} - M \frac{di_{ds}}{dt} - (\omega_s - \omega) L_r i_{qr} + (\omega_s - \omega) M i_{qs} \quad (2.13)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} - M \frac{di_{qs}}{dt} + (\omega_s - \omega) L_r i_{dr} + (\omega_s - \omega) M i_{ds} \quad (2.14)$$

Un schéma unifilaire équivalent peut-être dessiner pour la machine comme dans la figure 2.6. Dans ce diagramme et dans ce qui suit, la convention de générateur est utilisée en inversant tous les courants.

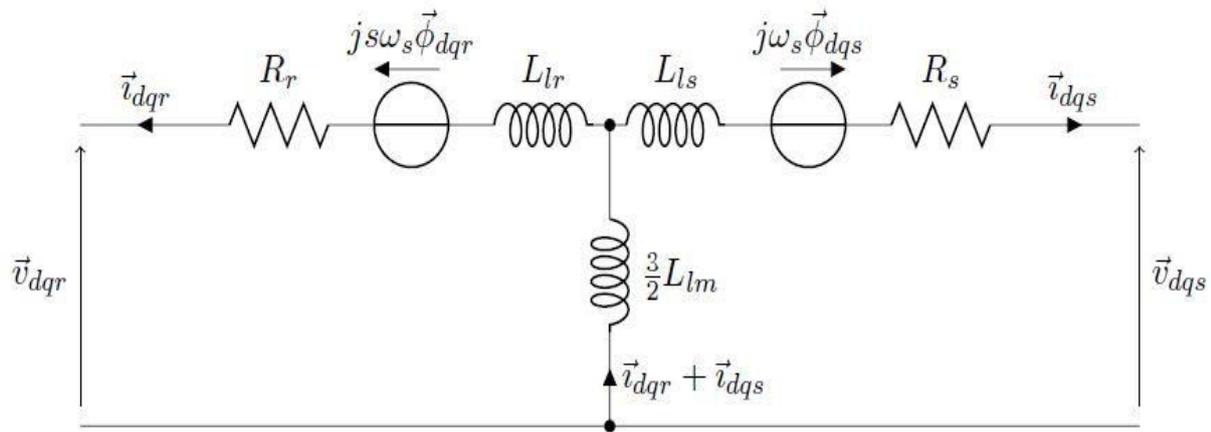


Figure 2.3 : Représentation de schéma équivalent de la GADA dans le référentiel de Park généralisé

c. Couple électromagnétique

Les puissances instantanées d'entre au stator dans le repère d-q sont calculé :

$$P_s = [v_{abcs}]^t [i_{abcs}]$$

$$P_s = [[K_s]^{-1} [v_{dqos}]]^t [[K_s]^{-1} [i_{dqos}]]$$

$$P_s = [v_{dqos}]^t \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} [i_{dqos}]$$

$$P_s = \frac{3}{2} ((-v_{ds} i_{ds} - v_{qs} i_{qs}) - 3v_{os} i_{os})$$

Comme :

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = -R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases}$$

Alors :

$$P_s = \frac{3}{2} \left(- \left(-R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \right) i_{ds} - \left(R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \right) i_{qs} \right)$$

$$P_s = \frac{3}{2} R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) - \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + \omega_s \varphi_{qs} i_{ds} - \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_s \varphi_{ds} i_{qs}$$

D'où

$$\begin{cases} R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) : \text{pertes joules qui sont supposé négligeables} \\ \frac{d\varphi_{ds}}{dt}, \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = 0 \text{ car flux constantes} \end{cases}$$

Donc :

$$P_s = \frac{3}{2} \omega_s (\varphi_{qs} i_{ds} - \varphi_{ds} i_{qs}) \quad (2.15)$$

Le couple électromagnétique de GADA est obtenu comme :

$$C_e = \frac{P_s}{\Omega_s} = \frac{3}{2} p (\varphi_{qs} i_{ds} - \varphi_{ds} i_{qs})$$

Où $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$

Comme :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = -L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = -L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases}$$

Alors :

$$C_e = \frac{3}{2} p \left(- \left(-L_s i_{qs} + M i_{qr} \right) i_{ds} - \left(-L_s i_{ds} + M i_{dr} \right) i_{qs} \right)$$

$$C_e = \frac{3}{2} p (M i_{dr} i_{qs} - M i_{qr} i_{dr})$$

$$C_e = \frac{3}{2} p M (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{dr}) \quad (2.16)$$

L'équation mécanique est écrite comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_m - C_e \quad (2.17)$$

2.3 Modèle d'état de la GADA

Le modèle d'état de la GADA s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X, u) \\ y = h(X, u) \end{cases}$$

\dot{X} : vecteur d'état

y : vecteur de sortie

u : vecteur de commande

f, h : fonctions d'état

Pour le choix de composants de vecteur d'état nous avons la possibilité de choisir entre le flux et les courants ou de faire une combinaison entre les deux (courants et flux).

Nous avons choisi le vecteur comme suit :

$$X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

En mettant le système d'équations précédent en forme compacté nous obtenons :

$$[B][V] = [L][\dot{I}] + \omega[C][I] + [D][I] \quad (2.18)$$

$$\text{Avec } [V] = [v_{ds} \ v_{qs} \ v_{dr} \ v_{qr}]^T,$$

$$[I] = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr}]^T,$$

$$[\dot{I}] = \frac{d}{dt}[I],$$

$$[L] = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix},$$

$$[B] = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 1],$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & -L_r \\ -M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix},$$

$$[D] = \begin{bmatrix} -r_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ -\omega_s L_s & -r_s & M & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

Nous pouvons faire un modelé d'état pour obtenir un système suivant :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}\{[B][U] - [D][I] - \omega_m[C][I]\} \quad (2.19)$$

2.3.1 Résolution de modèle d'état

Pour résoudre le modèle d'état, nous allons utiliser la méthode d'Euler pour un système multivariable :

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X, u) \\ y = h(X, u) \end{cases}$$

L'algorithme d'Euler s'écrit :

$$X_{k+1} = X_k + hf(X_k, u_k)$$

2.5 Résultats de la simulation de la machine

La machine en question est une MAS triphasée à rotor bobiné de 5KW de la simulation ayant les indications nominales suivantes :

Tension 220/380V, fréquence 50Hz, Vitesse = 1000tr/min, Nombre de pôles =3

a) en charge (R=100Ω)

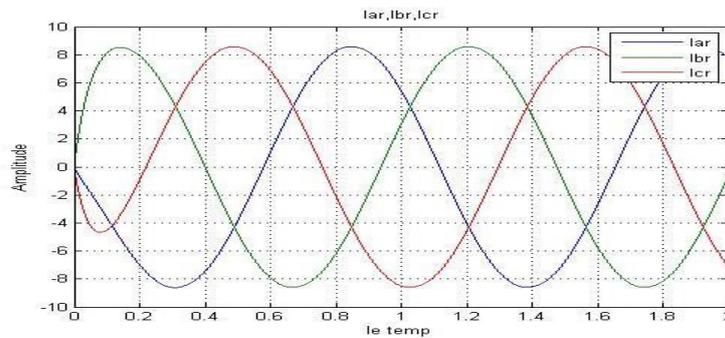
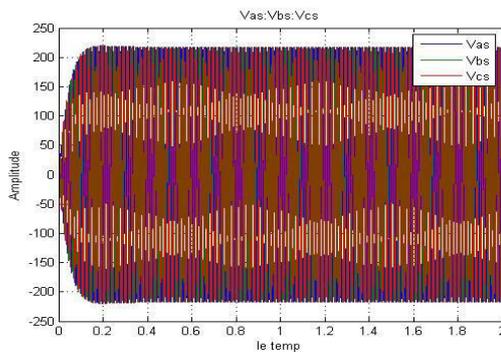
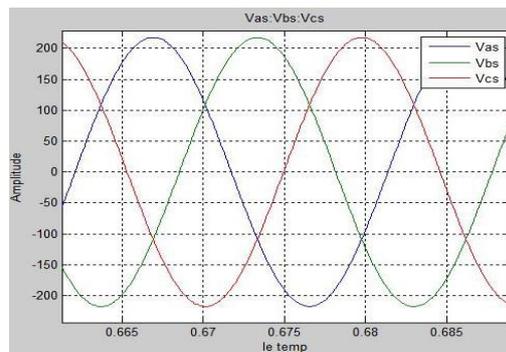


Figure 2.4 : Evolution de courants rotoriques

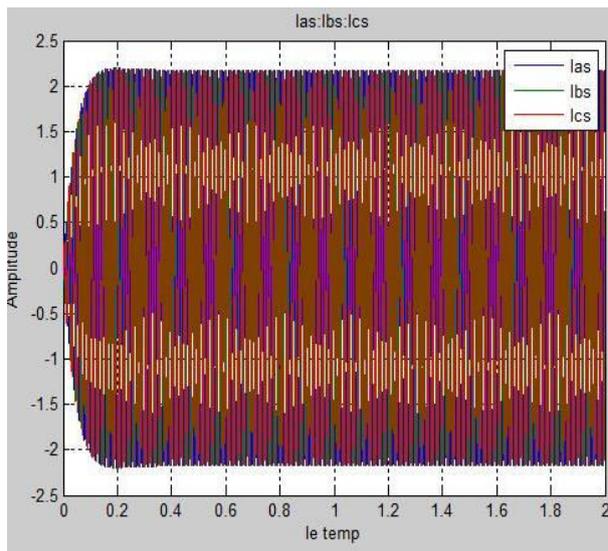


(a)

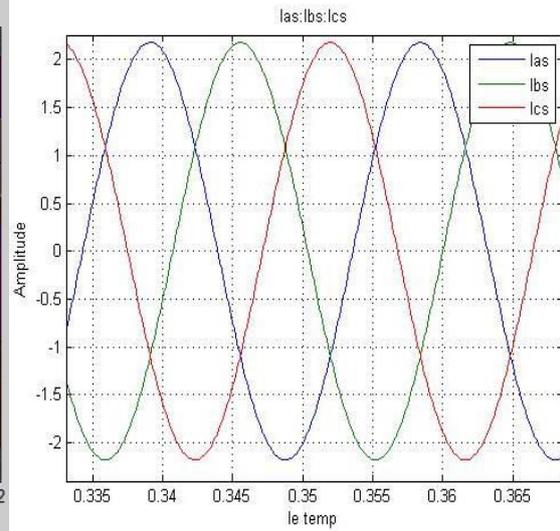


(b)

Figure 2.5 : (a) Evolution des tension statoriques (b) Partie zoomée de tension statorique



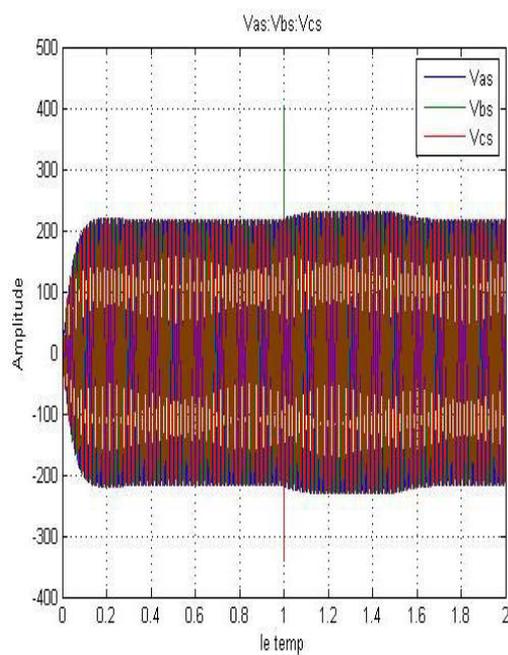
(a)



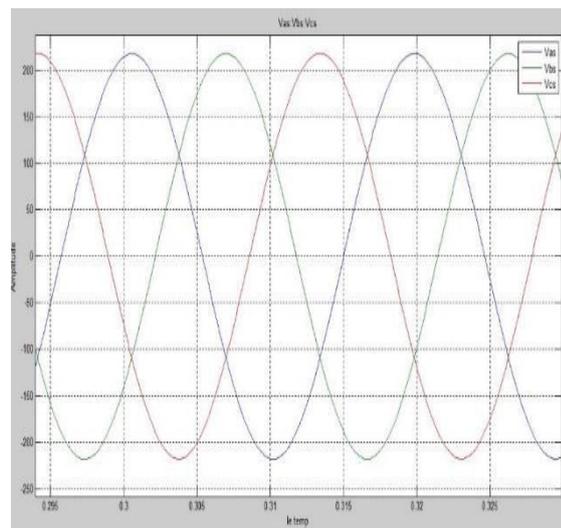
(b)

Figure 2.6 : (a) Evolution des courants statoriques (b) Partie zoomée des courants statoriques

b. En charge (tension rotorique = 12V , pulsation rotorique = 320rad/sec)

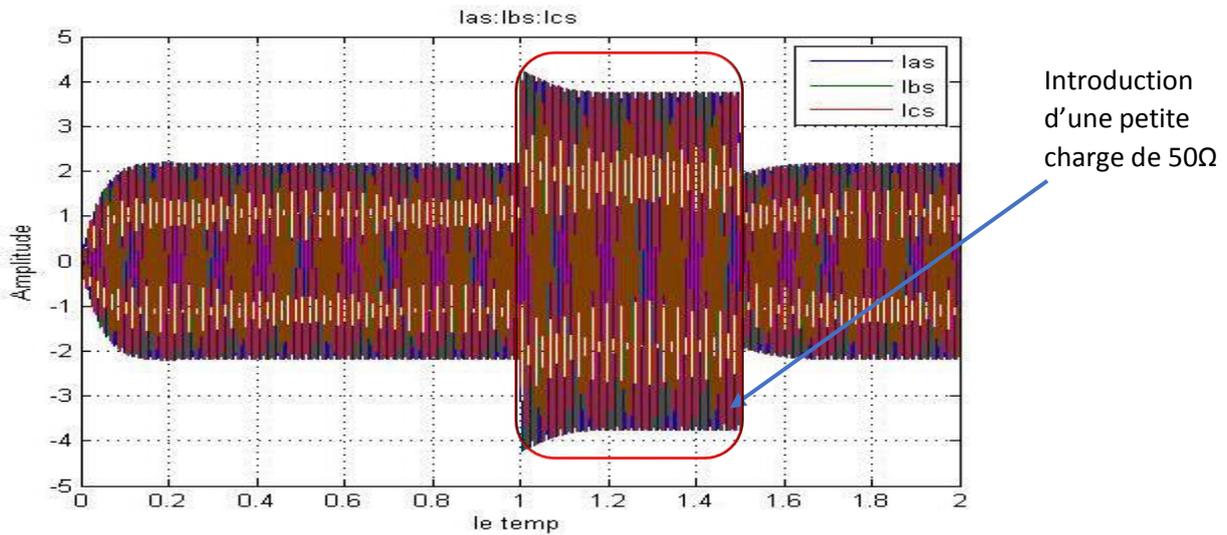


(a)

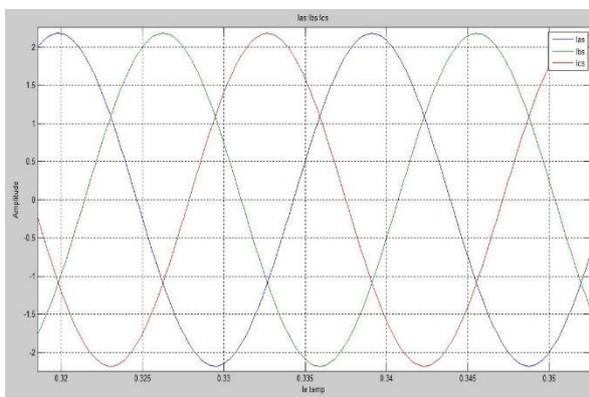


(b)

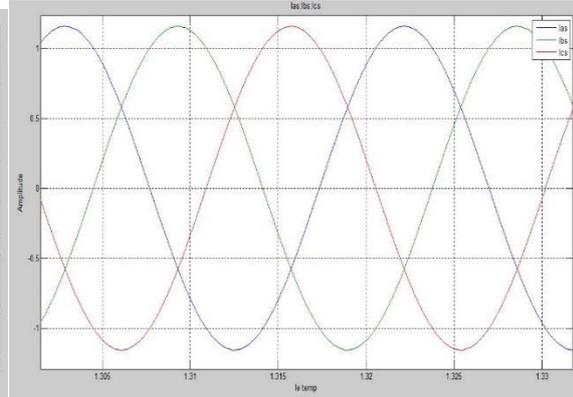
Figure 2.7 : (a) Evolution des tensions statoriques (b) partie zoomée des tensions statoriques



(a)



charge = 100Ω



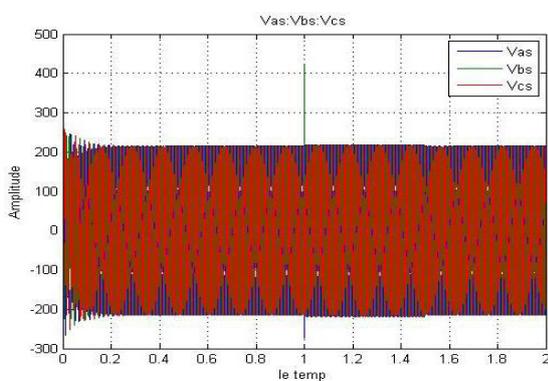
(c) charge = 200Ω

(b)

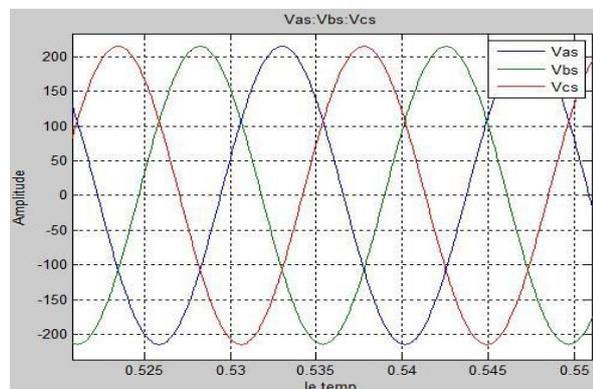
Figure

2.8 : (a) Evolution des courants statoriques ; (b) et (c) Zoom d'évolution des courants statoriques

c. En charge (tension rotorique = 220V , pulsation rotorique = 125rad/sec)

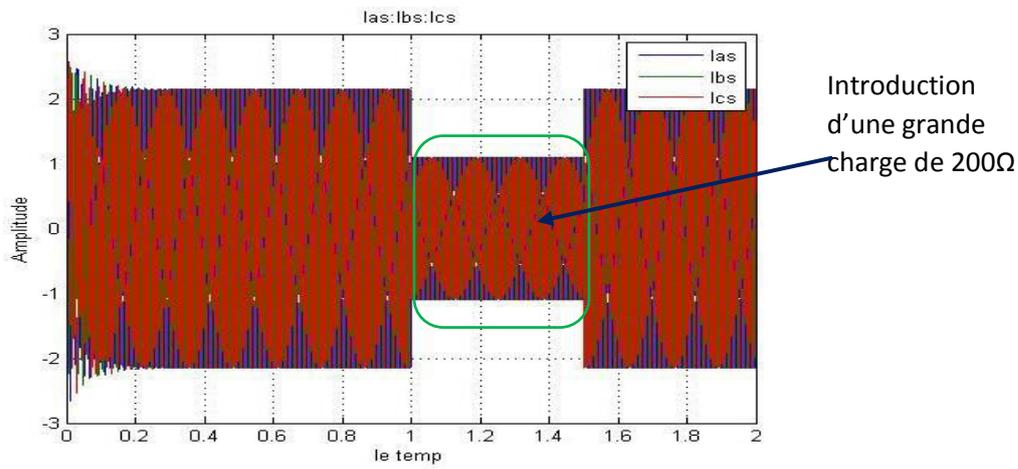


(a)

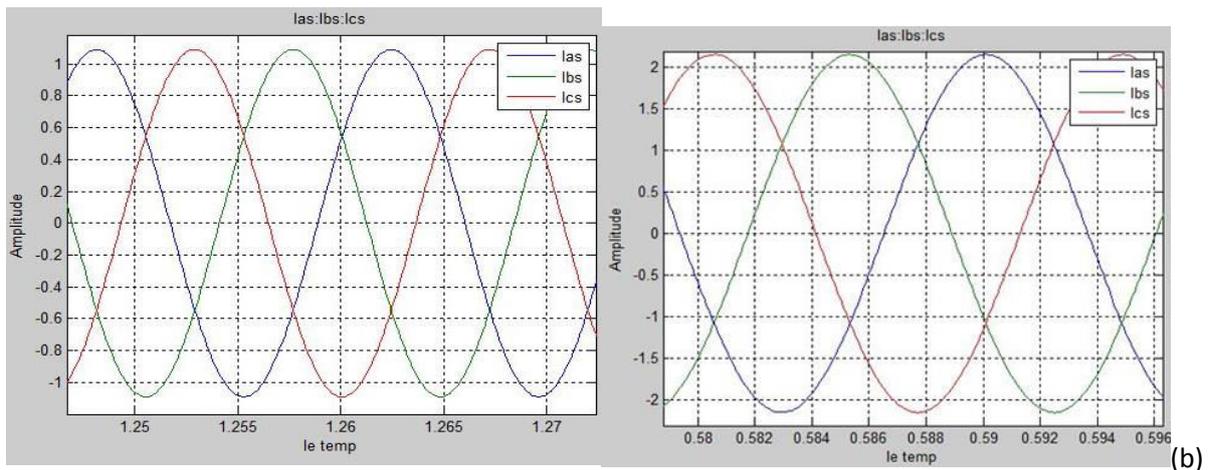


(b)

Figure 2.9: (a) Evolution des tensions statoriques ; (b) zoom d'évolution des tensions statoriques



(a)



(c)

Figure 2.10 : (a) Evolution des courants statoriques ; (b) et (c) Zoom d'évolution des courants statoriques

2.6 Régime déséquilibré de tension rotorique

a. En charge

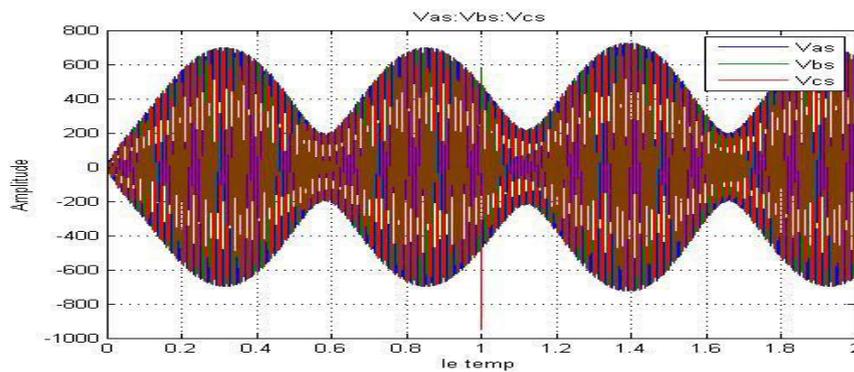


Figure 2.11 : Evolution des tension statorique

2.6 Intepretation des résultats

La figure 2.5 montre que au démarrage l'évolution de la tension dans un régime transitoire croient avec la forme exponentiel jusqu'à ce qu'elle conserve son amplitude dans la régime permanent. La forme d'onde des courants de la figure 2.6 a les mêmes caractéristiques que les formes d'onde (car les courants prennent les formes de tension seulement qu'ils sont dephasé avec le tension) de tension correspondantes commençant à partir de 0A en transitoire jusqu'à ce qu'elle atteigne régime où la valeur d'amplitude maximale de 2,2A est maintenu. Les courants sont en équilibre parce que la charge qu'ils traversent est égale et donc consomment la même quantité de courant.

La figure 2.7 montrent la même forme de tension mais le courant augmente sur la figure 2.8 lors de l'introduction d'une charge plus faible (résistance plus faible) et diminue sur la figure 2.9 en ajoutant une charge plus grande (résistance plus grande) qui consomme moins de courant alors que la plus grande résistance consomme plus de courant que le précédent.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu la modélisation de la GADA dans la repere lie au champ tournant qui réduit la complexité du modèle puis nous avons vu les different forme d'ondes dans les different essais effectués. Ces essais nous permettent de connaitre les reponses de la machines et caracteristiques de la machine dans les different cas étudiés. Cette modèle de la GADA a été simulé par le logiciel MATLAB. Nous allons alors voir la modélisation de la GADA avec la methode des elements finis dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 : Modélisation de la GADA par la méthode des éléments finis

3 Introduction

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone double alimentation a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic. La diversité des objectifs a fait paraître plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié.

Mais ces outils sont souvent trop spécifiques à une topologie ou à une machine bien déterminée. Il serait, cependant, intéressant de disposer d'un outil simple et générique, pouvant servir comme un banc d'essai pour les machines électriques.

Dans cette partie, nous allons élaborer un modèle qui tient compte de la topologie et des dimensions de la MADA, basée sur la méthode des éléments finis.

3.1 Méthode des éléments finis

Cette méthode est établie sur la résolution numérique des équations différentielles. L'idée est de découvrir un résultat pour la solution globale en remplaçant au problème complexe par une série de problèmes plus simples. Cela explique mettre en place la difficulté par des équations de système linéaire plus faciles à résoudre. L'équation doit être discrétisé dans des sous-équations appropriés. Les sous-équations sont décrits géométriquement par les éléments qui sont géométriquement simples tels que des triangles ou des rectangles pour des problèmes bidimensionnels et principalement des tétraèdres pour des problèmes tridimensionnels [9].

Dans les machines électriques les équations qui conduisent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré. On les définites comme suit [9], [10] :

Les relations de couplage électromagnétique :

$$\overline{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (3.1)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (3.2)$$

Les relations de la conservation des flux :

$$div \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$div \vec{E} = 0 \quad (3.4)$$

La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (3.5)$$

La relation d'Ohm :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3.6)$$

3.2 Modèle Employé

La méthode des éléments finis comporte trois modes, à savoir le mode magnétostatique, le mode magnéto dynamique et le mode magnétique transitoire. Dans ce travail, nous utilisons le mode magnétique transitoire puisque nous simulons le régime transitoire de la machine [9].

3.2.1 Mode magnétique transitoire

Ce mode est le plus complet. Il interprète précisément la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système précédent des équations caractéristiques, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps.

Donc le système à résoudre est comme suit :

$$\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{vrot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{rot} \vec{B}_r + \sigma \overrightarrow{grad} V = 0$$

3.3 Principe de la méthode des éléments finis

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis est basé dans la discrétisation du domaine d'étude en domaines simples de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être poursuivi par des fonctions d'approximations, dont la formule varie d'un type à un autre.

Ces fonctions d'estimations doivent garantir la continuité du potentiel aux bornes des éléments. La majorité des formes d'estimations du potentiel dans un élément sont des estimations polynomiales [9], [10].

Pour les éléments triangulaires :

$$A_e(x, y) = a + bx + cy$$

Pour les éléments quadrilatéraux :

$$A_e(x, y) = a + bx + cy + dxy$$

Les constants a , b , c et d doivent être déterminés. Le potentiel A_e est en général non nul dans les éléments et nul pour le reste.

3.3.1 Fonction d'approximation sur le domaine 2D

La valeur approchée du potentiel dans un point de domaine globale de résolution est s'exprime par l'assemblage de toutes les fonctions élémentaires comme suit [10]:

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{ne} A_e(x, y)$$

e : numéro d'élément, ne : nombre totale des éléments dans le domaine.

Le potentiel en tous points d'un élément donc la densité de courant sont absolument définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets comme dans figure suivant.

a) Cas d'un élément triangulaire linéaire 2D

Dans le cas où l'élément de référence est un triangle linéaire, les fonctions d'interpolation sont calculées comme suit :

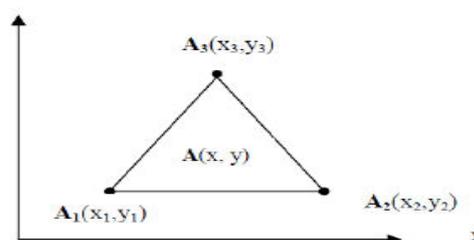


Figure 3.1: Fonction d'interpolation d'un élément

A partir du triangle de Pascal, on trouve que :

$$A_e(x, y) = a + bx + cy$$

On pose A_1, A_2, A_3 les valeurs de la fonction respectivement aux nœuds 1, 2, 3. Dans chaque point, on a :

$$\begin{cases} A(x_1, y_1) = a + bx_1 + cy_1 = A_1 \\ A(x_2, y_2) = a + bx_2 + cy_2 = A_2 \\ A(x_3, y_3) = a + bx_3 + cy_3 = A_3 \end{cases}$$

On obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

Alors

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} x_2y_3 - y_2x_3 & x_3y_1 - y_3x_1 & x_1y_2 - y_1x_2 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix}$$

$$\det = \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}$$

$$\det = (x_2y_3 - x_3y_2) - x_1(y_3 - y_2) + y_1(x_3 - x_2)$$

$$\det = x_2y_3 - x_3y_2 - x_1y_3 + x_1y_2 + y_1x_3 - y_1x_2$$

Nous ajoutons et on soustrait le terme y_3x_3 à l'expression du déterminant.

$$\det = x_2y_3 - x_3y_2 - x_1y_3 + x_1y_2 + y_1x_3 - y_1x_2 + y_3x_3 - y_3x_3$$

Alors :

$$\det = (y_2 - y_3)(x_1 - x_3) - (y_3 - y_1)(x_3 - x_2)$$

Finalement, nous avons :

$$\det = 2\Delta$$

Avec Δ l'aire du triangle.

Alors :

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} x_2 y_3 - y_2 x_3 & x_3 y_1 - y_3 x_1 & x_1 y_2 - y_1 x_2 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

Et :

$$A(x, y) = [1 \quad x \quad y] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

$$A(x, y) = \frac{1}{2\Delta} [1 \quad x \quad y] \begin{bmatrix} x_2 y_3 - y_2 x_3 & x_3 y_1 - y_3 x_1 & x_1 y_2 - y_1 x_2 \\ y_2 - y_3 & y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_3 - x_2 & x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

On trouve que :

$$A = [N_1 \quad N_2 \quad N_3] \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

Avec :

$$N_1 = \frac{1}{2\Delta} [(x_2 y_3 - y_2 x_3) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y]$$

$$N_2 = \frac{1}{2\Delta} [(x_3 y_1 - y_3 x_1) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y]$$

$$N_3 = \frac{1}{2\Delta} [(x_1 y_2 - y_1 x_2) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y]$$

Pour chaque élément du domaine, on a alors :

$$A^e(x, y) = [N_1^e \quad N_2^e \quad N_3^e] \begin{bmatrix} A_1^e \\ A_2^e \\ A_3^e \end{bmatrix}$$

$$N_1^e = \frac{1}{2\Delta^e} (a_1^e + b_2^e x + c_1^e y)$$

$$N_2^e = \frac{1}{2\Delta^e} (a_2^e + b_2^e x + c_2^e y)$$

$$N_3^e = \frac{1}{2\Delta^e} (a_3^e + b_3^e x + c_3^e y)$$

Avec :

$$a_1^e = x_2^e y_3^e - y_2^e x_3^e \quad b_1^e = y_2^e - y_3^e \quad c_1^e = x_3^e - x_2^e$$

$$a_2^e = x_3^e y_1^e - y_3^e x_1^e \quad b_2^e = y_3^e - y_1^e \quad c_2^e = x_1^e - x_3^e$$

$$a_3^e = x_1^e y_2^e - y_1^e x_2^e \quad b_3^e = y_1^e - y_2^e \quad c_3^e = x_2^e - x_1^e$$

$$\Delta^e = \frac{1}{2}(b_1^e c_2^e - b_2^e c_1^e)$$

3.4 Logiciel Flux-2D

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite « bande de roulement » pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage.

3.4.1 Résolution avec logiciel Flux-2D

En général, la procédure d'analyse d'une machine électromagnétique peut être fragmentée en trois étapes [10] :

- Pré-processus
- En processus
- Post processus

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés :

a. Module préprocesseur

Permet, à travers nombreuses modules, de déterminer la géométrie de la machine à étudier (PREFLU), de choisir une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de déterminer

le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Ils nous permettent également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

b. Module processeur (SOLVER 2D)

Composé essentiellement d'un module de résolution 2D des distincts modèles collectifs de l'électromagnétisme et des cas thermiques.

c. Module postprocesseur (PostPro 2D)

Permet, de dessiner les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D suivant un passage prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs totales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

3.4.2 Organigramme de simulation avec Logiciel FLUX 2D

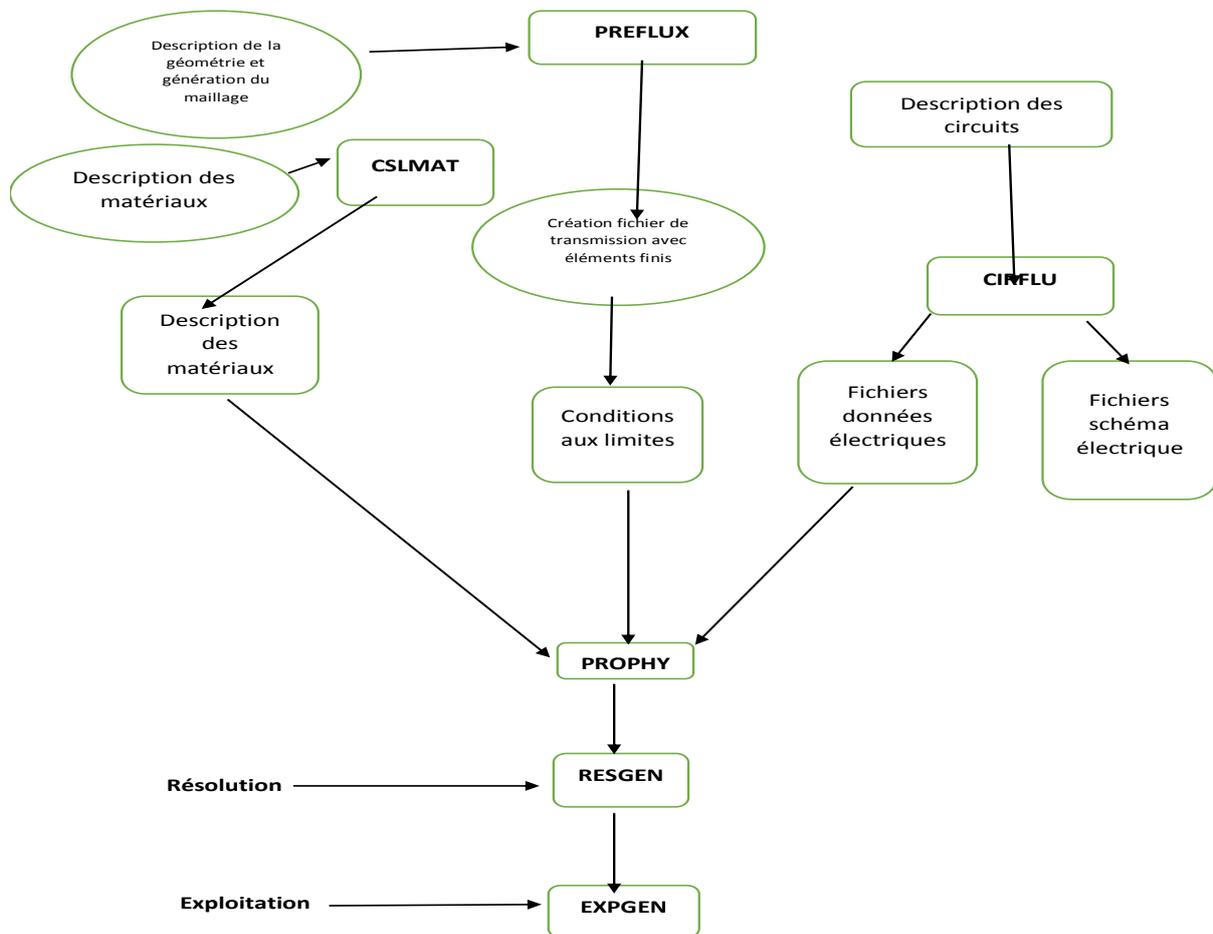


Figure 3.2 : Différents modules du logiciel de CAO (Flux2D)

3.5 Avantages et les inconvénients de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis présente les avantages et les inconvénients suivants :

Les avantages :

- Adaptation aux géométries compliqués.
- Prise en compte des non linéarités.
- Temps de calcul proportionnellement favorable.

Les inconvénients :

- Inapproprié sur les domaines illimités.
- Existence des singularités dans le domaine d'étude.
- Mise en œuvre partiellement difficile.

3.6 Dimensionnement de la GADA

3.6.1 Sélection des matériaux

a) Conducteurs électriques

En En général, les conducteurs en cuivre sont utilisés pour les enroulements de machines électriques. Le type de conducteur, soit circulaire ou rectangulaire dépend de la cote de la machine. Les machines à rotor bobiné ont trois enroulements de phase sur leur stator et rotor. La taille des conducteurs dans les enroulements triphasés dépend de la densité de courant. Aussi, il est signalé que la densité de courant affecte le système de refroidissement, le rapport cyclique et l'efficacité ciblée. La densité de courant est comprise entre 3,5 et 6A / mm² pour une efficacité élevée machines. Il est possible d'enrouler plusieurs conducteurs élémentaires (6 à 8) en parallèle pour réduire l'effet de la peau à des niveaux acceptables [13].

b) Matériaux magnétiques

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques B(H) (Tableau 3.1).

H(A/m)	B(Tesla)
0.00	0.00
129.50	0.50
243.25	1.10
1850.00	1.60
3700.00	1.70
9900.00	1.85
22100.00	2.00
43000.00	2.10

Tableau 3.1 B(H) du matériau magnétique fer

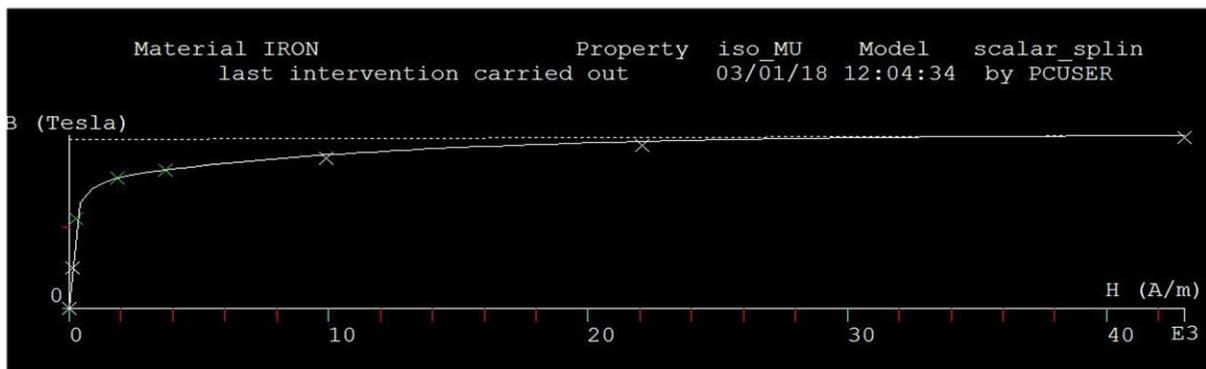


Figure 3.3 : graphe B(H) du matériau magnétique fer

3.6.2 Structures de bobinage de GADA

En général, le système d'enroulement est conçu en assignant des bobines aux encoches pour différents phases, en établissant la direction des courants dans les côtés de la bobine, en calculant le nombre de tours pour diverses bobines, et enfin dimensionner les conducteurs pour les encoches. Le nombre de bobines est déterminé par le nombre de paires de pôles et le nombre de phases. Le grand nombre de tours par bobine produit une grande

force magnétomotrice dans l'enroulement, ce qui diminue la capacité de surcharge de machine. Le nombre de tours par bobine est calculé comme suit [13] :

$$W_1 = \frac{K_E \frac{V_{SN}}{\sqrt{3}}}{2\sqrt{2}fk_f K_{W1} B_g \tau l_i} \quad (3.7)$$

Où K_E est le facteur de force électromotrice ($0.97 < K_E < 0.98$), V_{SN} est la tension de phase de stator, f est le fréquence, K_{W1} est le facteur de bobinage et B_g est la densité de flux d'entrefer supposé et k_f est le facteur de remplissage. Une considération importante dans un enroulement triphasé est de produire résistance égale et inductance de fuite par phase, afin d'assurer un équilibre enroulement. Les enroulements des machines électriques sont limités du mouvement dans la direction radiale [13], [15].

Les bobinages répartis dans les encoches d'une MADA sont habituellement de type imbriqué ou ondulé à double couche, avec un nombre entier d'encoches par pôle et par phase. Le bobinage de type ondulé est employé principalement au rotor pour diminuer le nombre d'interconnexions entre les groupes de bobines qui sont montées sur une partie tournante.

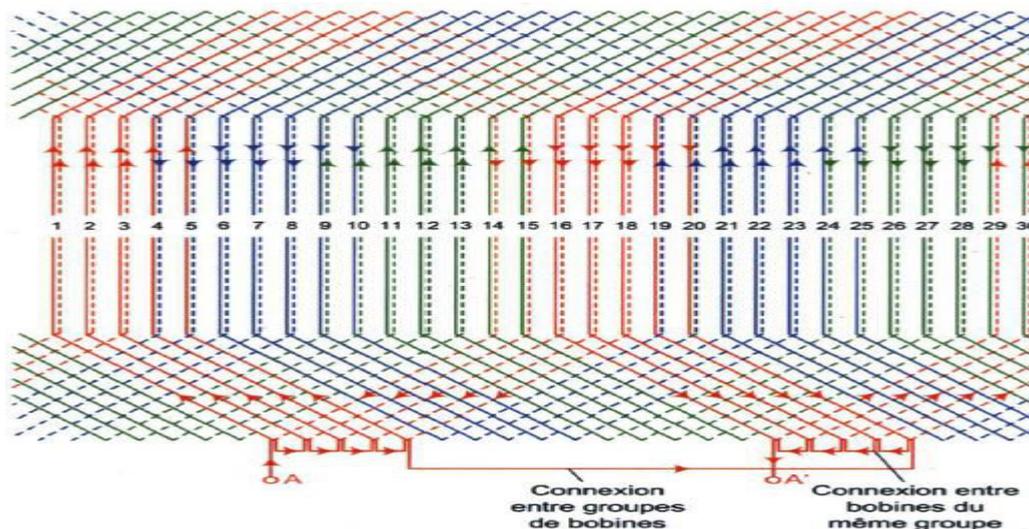


Figure 3.4: Bobinage triphasé, 4 pôles en définissent des connexions

Le paramètre de grande importance est le nombre des encoches par pole par phase q [11], [15].

$$q = \frac{N_s}{2p_1 m}; \quad q : \text{doivent être un nombre entier.}$$

3.6.3 Structure de circuit magnétique

La topologie de la machine étudiées est présentée sur la Figure 3.4. On considère généralement l'existence de becs d'encoches, bien qu'ils soient le plus souvent absents dans les machines de grande puissance afin de permettre l'insertion de bobinages préformés dans les encoches.

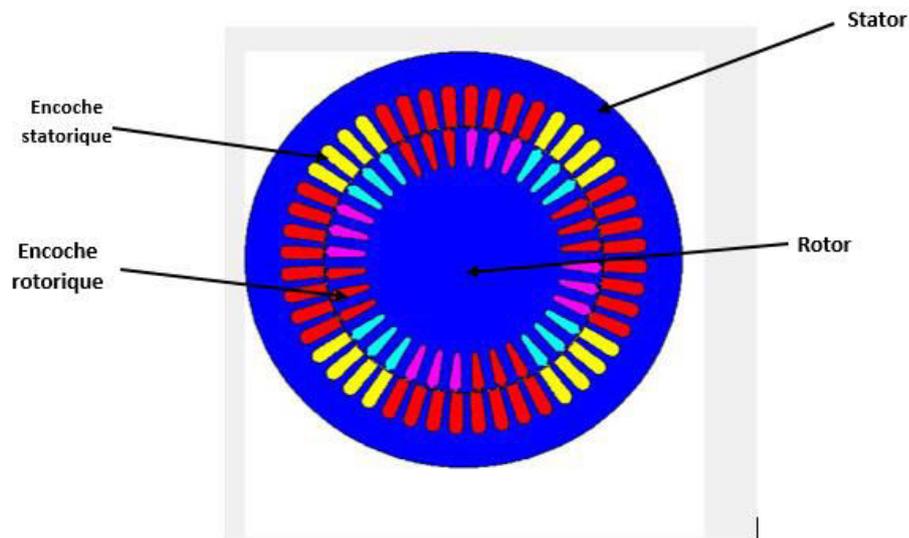


Figure 3.5: structure de circuit magnétique

3.6.3.1 Principe de conservation de flux magnétique

Un abord pour la résolution analytique des dimensions des parts magnétiques d'une machine asynchrone comprend à mettre systématiquement le principe de conservation du flux magnétique. L'induction dans l'entrefer étant une variable de dimensionnement, il est faisable de conduire le flux magnétique d'entrefer ϕ_{pp} sous un pôle à partir des variables de dimensionnement D et L, et du nombre de pôles p donné par le cahier des charges [14].

$$\phi_{pp} = B \frac{\pi DL}{2p} \quad (3.9)$$

Il faut voir que le calcul de ϕ_{pp} repose sur le principe d'une répartition radiale du champ d'induction magnétique B. Ce principe revient à observer que l'influence des dentures du stator et du rotor est négligée.

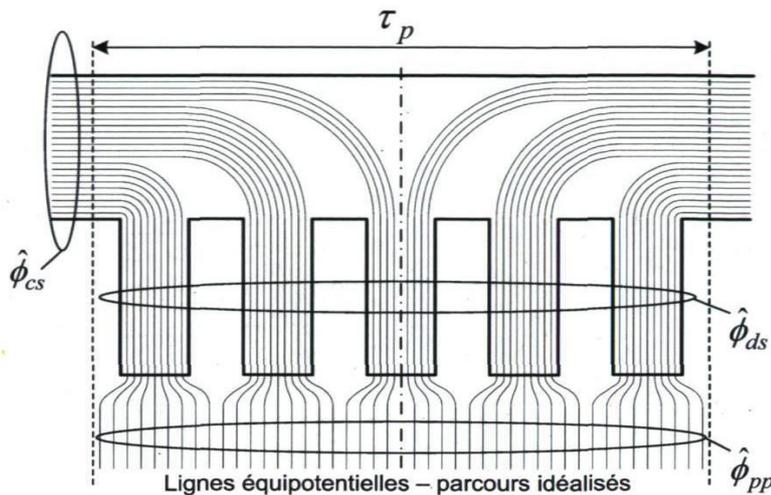


Figure 3.6 : Illustration de la conservation du flux dans le circuit magnétique du stator

3.6.4 Dimensionnement du stator

Le stator d'une machine asynchrone est constitué des encoches et le noyau. En générale, il existe 3 types des encoches statoriques ; les encoches ouvertes, les encoches effilées et les encoches semi-ouvertes. La performance d'une machine asynchrone dépend sur la forme des encoches statorique et alors il est important à choisi le type plus approprié [10] [12].

A) Sélection de nombre des encoches statorique : le nombre des encoches statorique doivent être bien choisi car il contribue au poids, coût et caractéristiques de fonctionnement de la machine. Il n'y a pas des règles pour choisir le nombre des encoches statorique mais on examiner les avantages et les inconvénients d'un grand nombre des encoches [11].

Le flux maximal commun qui traverse l'entrefer, les dents ainsi que la culasse peut être calculé à partir des inductions maximales et des sections respectives des trois parties. A partir de circuit magnétique dans la figure 3.6, nous posons la relation suivante [14] :

$$\phi_{pp} = \phi_{ds} = \phi_{dr} = 2\phi_{cs} = 2\phi_{cr} \quad (3.10)$$

Les flux ϕ_{ds} , ϕ_{dr} , ϕ_{cs} , ϕ_{cr} désignent respectivement le flux maximal dans les dents et le flux dans les culasses du stator et du rotor.

L'équation (3.10) peut être écrite comme suit :

$$B \frac{\pi DL}{2p} = B_{ds} \frac{\pi DL}{2p} \frac{\tau_{es} - \omega_{es}}{\tau_{es}} = 2B_{cs} \cdot e_{cs} \cdot L \quad (3.11)$$

Avec τ_{es} le pas d'encoche du stator. Si les inductions maximales dans les dents B_{ds} et dans la culasse B_{cs} sont connues a priori, il est possible de déterminer la largeur des encoches ω_{es} et l'épaisseur de la culasse e_{cs} à partir de (3.11).

La surface totale, S_{es} , de la fenêtre d'une encoche est déterminée en considérant un certain coefficient de remplissage en cuivre des fenêtres α_s , et le nombre des encoches n_s . Il est inférieur à l'unité à cause de la présence des isolants électriques dans les encoches.

$$S_{es} = \pi(D + 2e_{bs})A_s / (n_s \alpha_s J_s) \quad (3.12)$$

Le diamètre externe du stator est donné par :

$$D_{ext} = D_{fes} + 2e_{cs} \quad (3.13)$$

3.6.5 Dimensionnement de rotor

Le dimensionnement du rotor se fait de la même façon de celui du stator. La largeur des encoches, l'épaisseur de la culasse et la hauteur des encoches du rotor sont [14] :

$$\omega_{er} = \left(1 - \frac{\dot{B}}{\dot{B}_{cr}}\right) \tau_{er} \quad (3.14)$$

$$e_{cr} = \frac{\pi D}{4p} \frac{\dot{B}}{\dot{B}_{cr}} \quad (3.15)$$

$$D_{fer} = \sqrt{(D - 2e - 2e_{br})^2 + \frac{4(D - 2e - 2e_{br})A_r}{J_r \alpha_r} \frac{\tau_{er}}{\omega_{er}}} \quad (3.16)$$

Le diamètre interne s'exprime par :

$$D_{int} = D_{fer} - 2e_{cr} \quad (3.17)$$

3.6.6 Dimensionnement d'entrefer

Le choix de l'entrefer influe fortement sur les performances d'une machine asynchrone. Généralement, il faut choisir un entrefer très faible pour obtenir une machine asynchrone de bonnes performances. L'air magnétisant nécessite de grandes forces magnétomotrices ou ampères. Le plus petit l'air (non magnétique) écart, le plus petit l'aimantation fmm. La limite inférieure d'entrefer est déterminée par des contraintes mécaniques et par le rapport entre le stator et la fente ouvertures b_{os} , b_{or} à entrefer afin de garder des pertes supplémentaires de noyau de surface et la pulsation du flux dentaire dans les limites. La dent est le secteur radial de stratification entre deux emplacements voisins [10] [11].

La largeur d'entrefer peut calculer comme suit :

$$e = \frac{D - D_{int}}{2} \quad (3.18)$$

3.7 Résultats de Simulation

3.7.1 Régime Sain

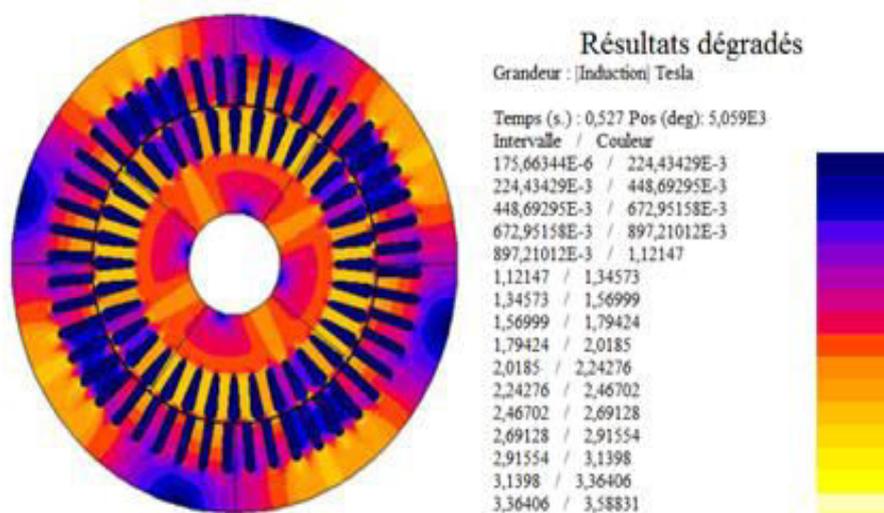


Figure 3.7: distribution de densité de flux magnétique

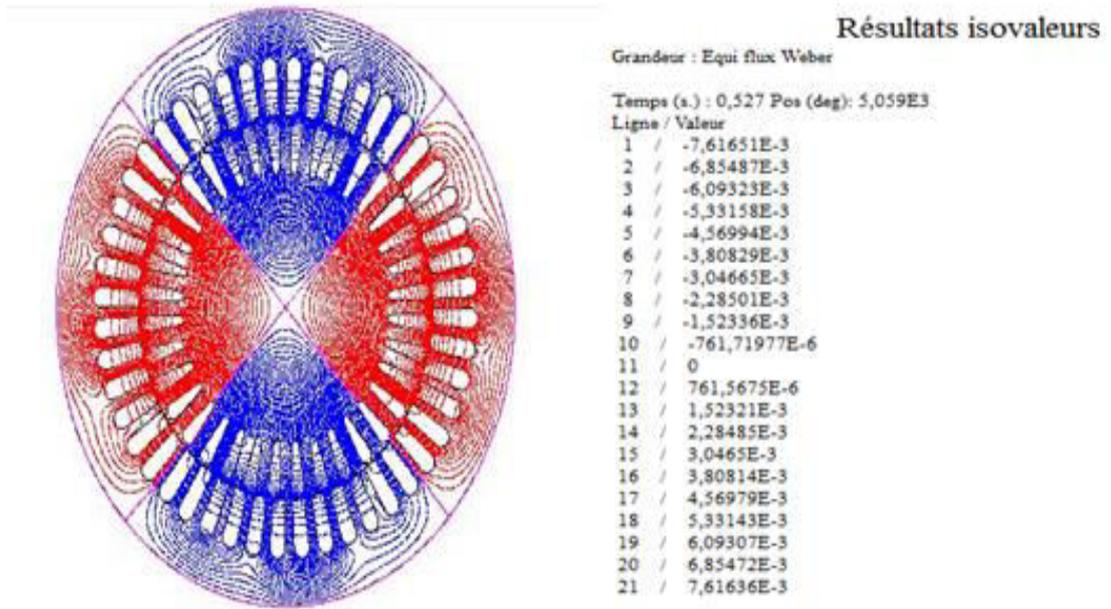


Figure 3.8 : Répartition des pôles et isovaleurs de flux magnétiques

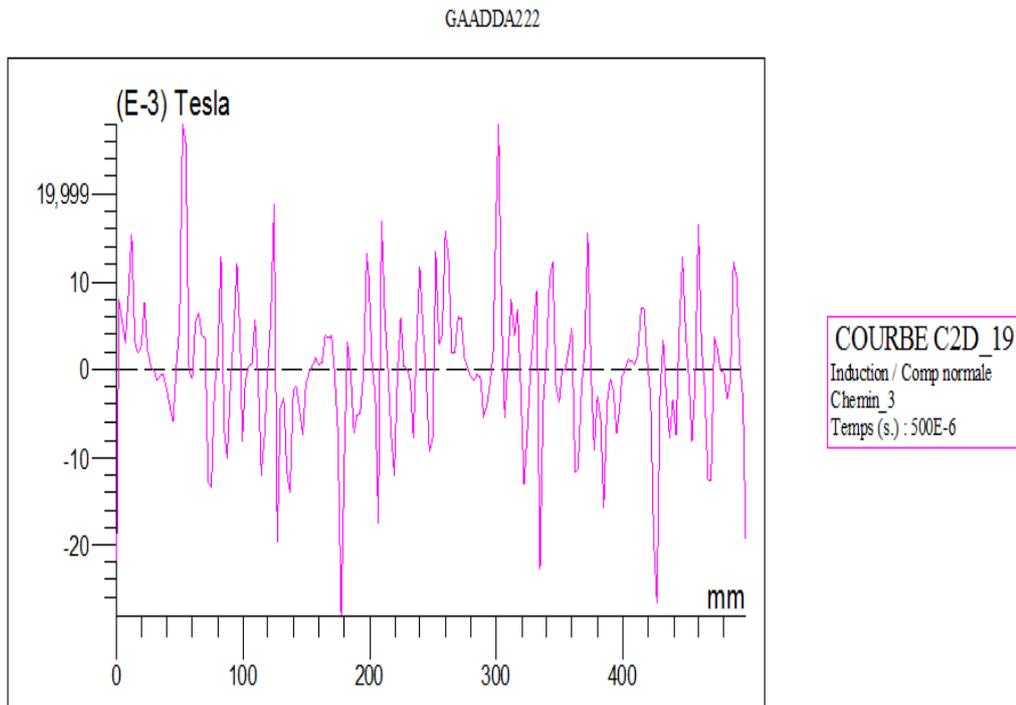


Figure 3.9 : Evolution de composant normale d'induction de la machine

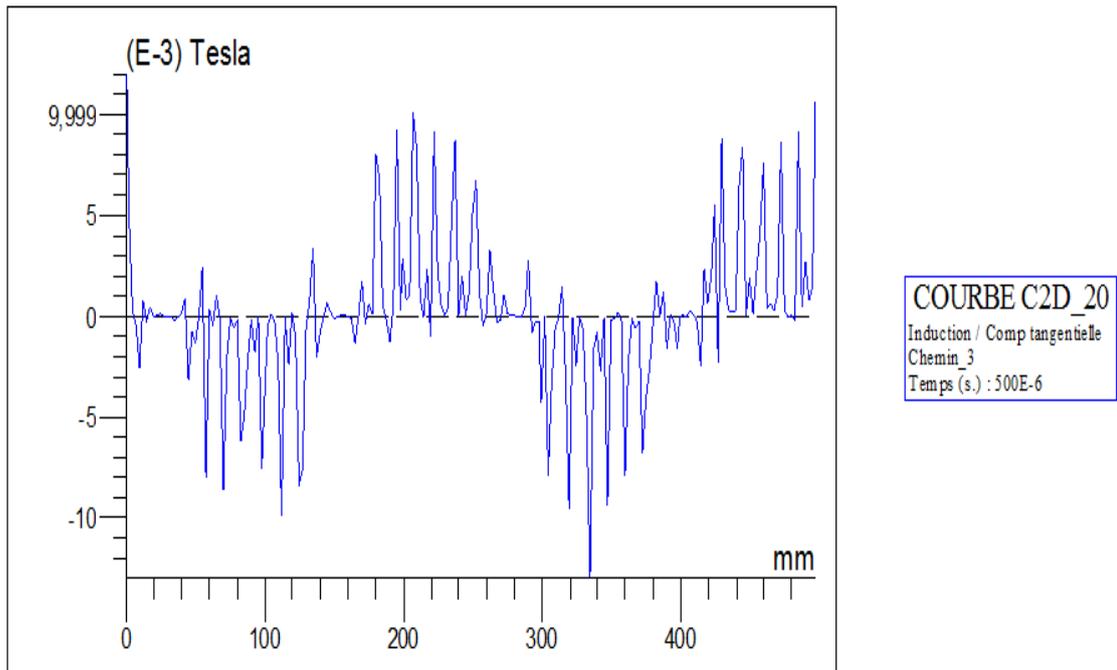


Figure 3.10 : Evolution de la composant tangentielle d'induction

a) **Essai à vide**

i. **Tension de rotor 12V ; vitesse mécanique 1500 tr/min**

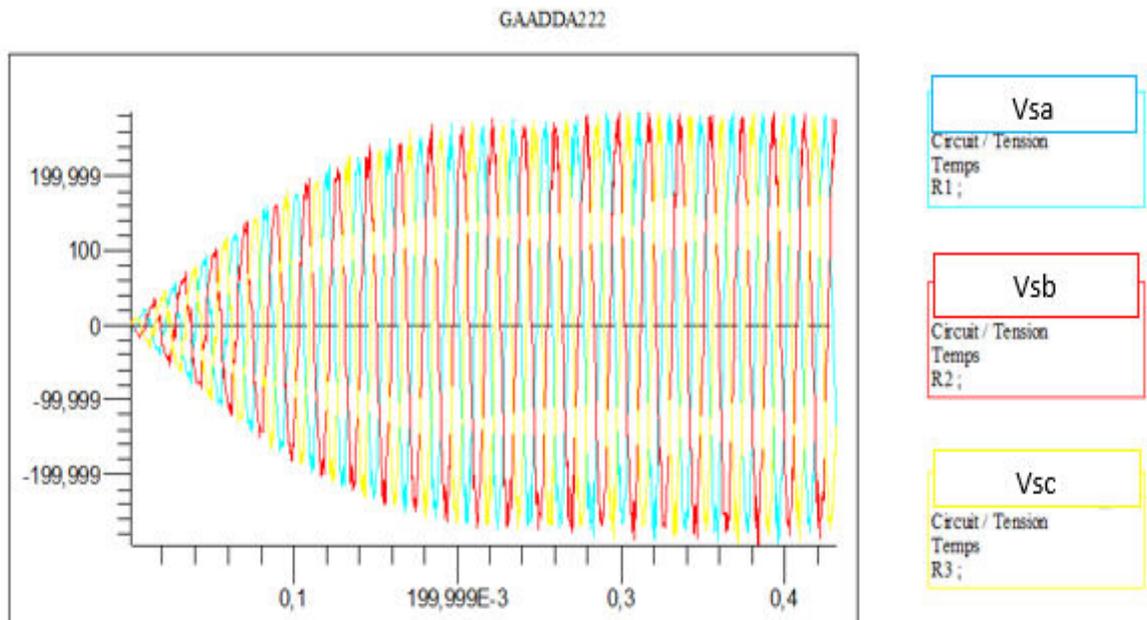


Figure 3.11 : Evolution de tension statorique

ii. Tension de rotor 220V, fréquence 50Hz, vitesse 500

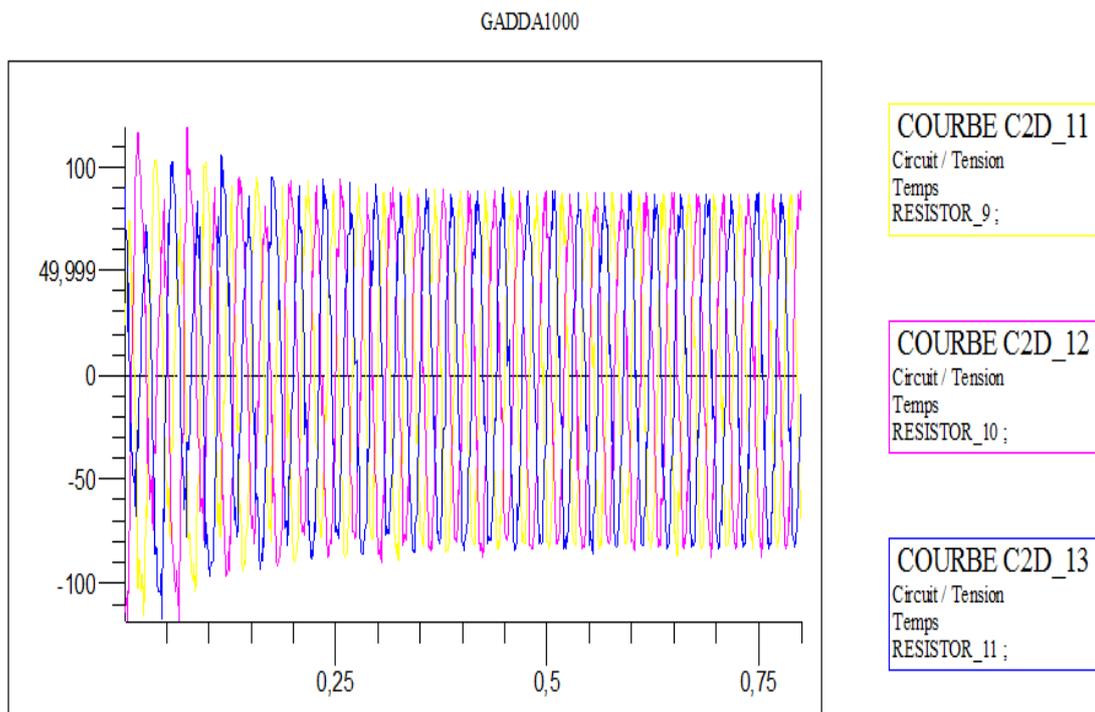


Figure 3.12 : Evolution de tension statorique

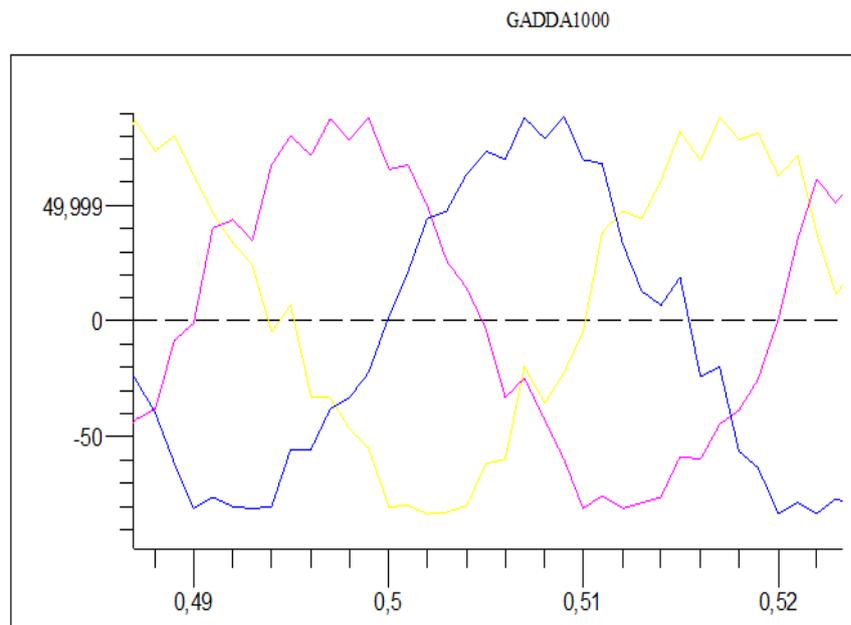


Figure 3.13 : Zoom d'évolution des tensions statoriques

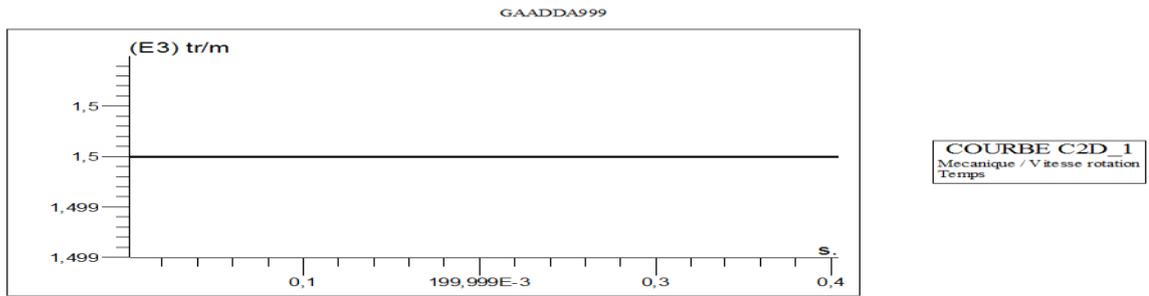


Figure 3.14 : Vitesse de rotation de la machine à 1500tr/min

iii. Tension de rotor 200V, fréquence 50Hz, vitesse 1500

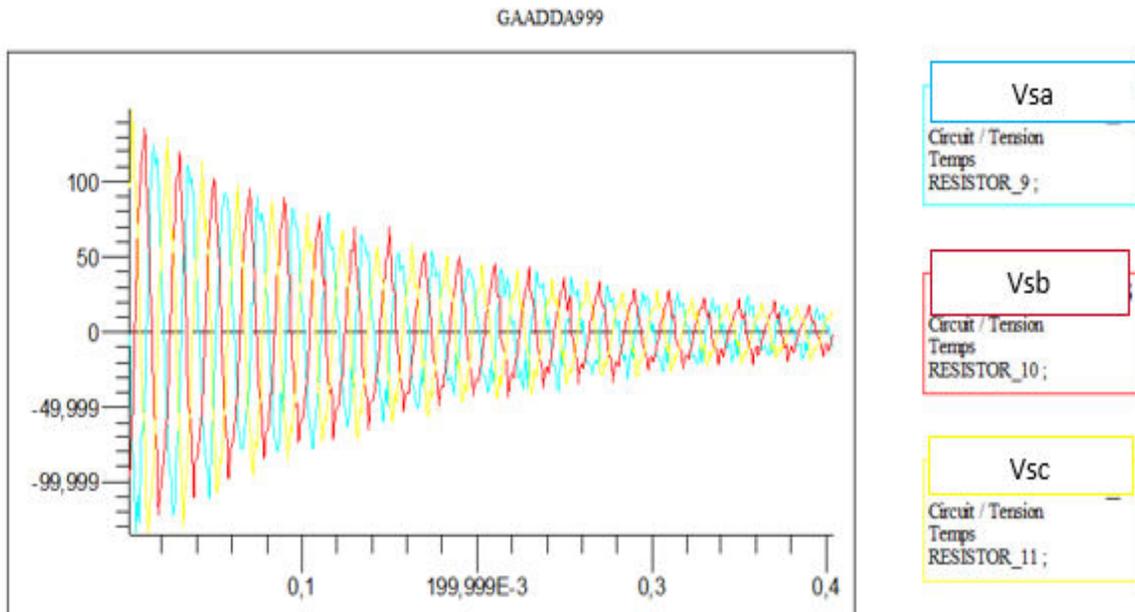


Figure 3.15 : Evolution de tension statorique

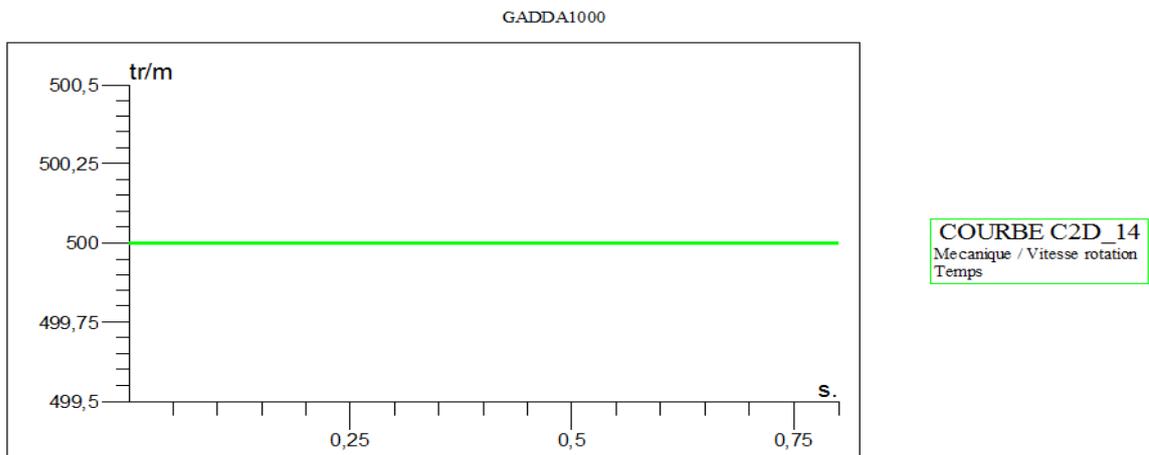
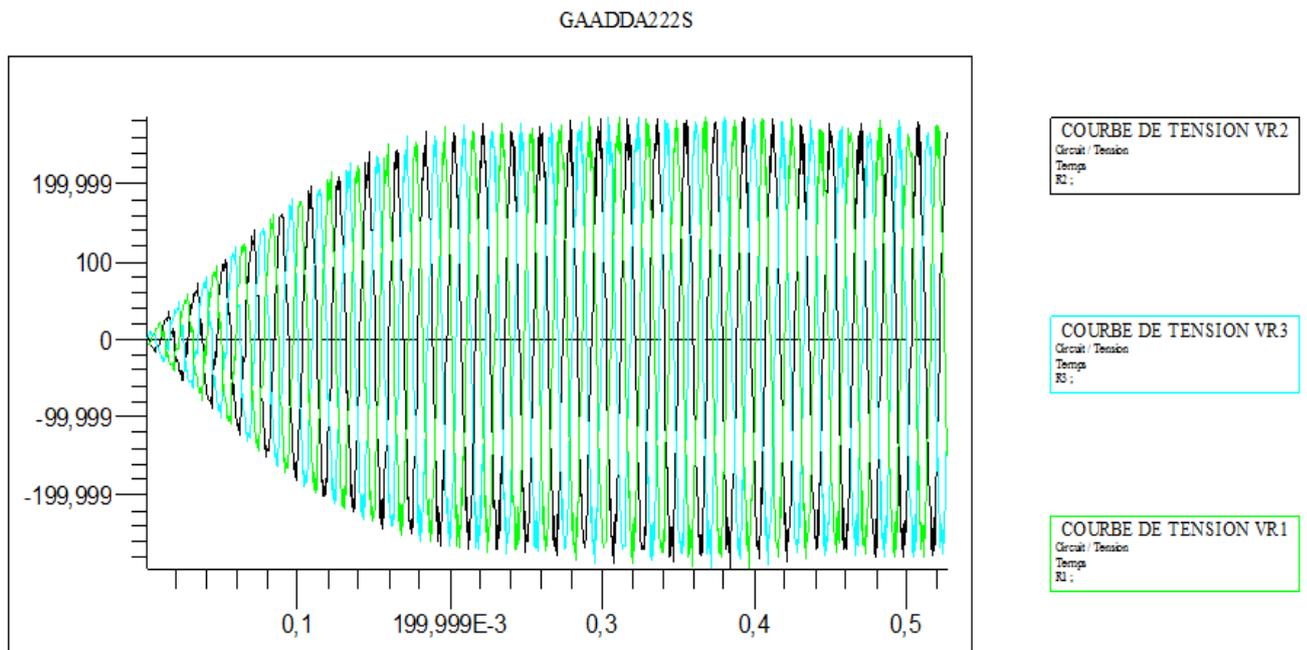


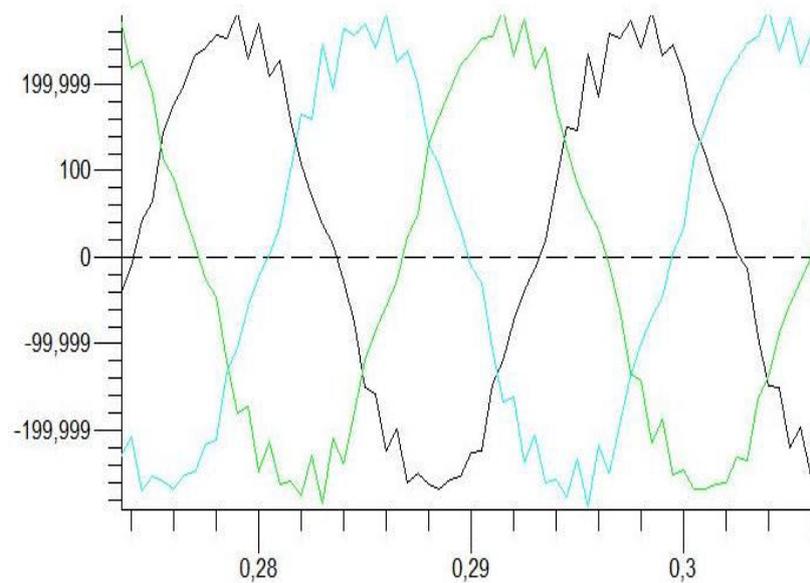
Figure 3.16: vitesse mécanique de rotor 500tr/min

b) En charge déséquilibré ($R_1=R_2=100$, $R_3=200$)

Tension dans le rotor 12V, Vitesse 500, fréquence 50Hz



(a)



(b)

Figure 3.17 : (a) évolution des tensions statoriques ; (b) : Zoom d'évolution des tensions statoriques

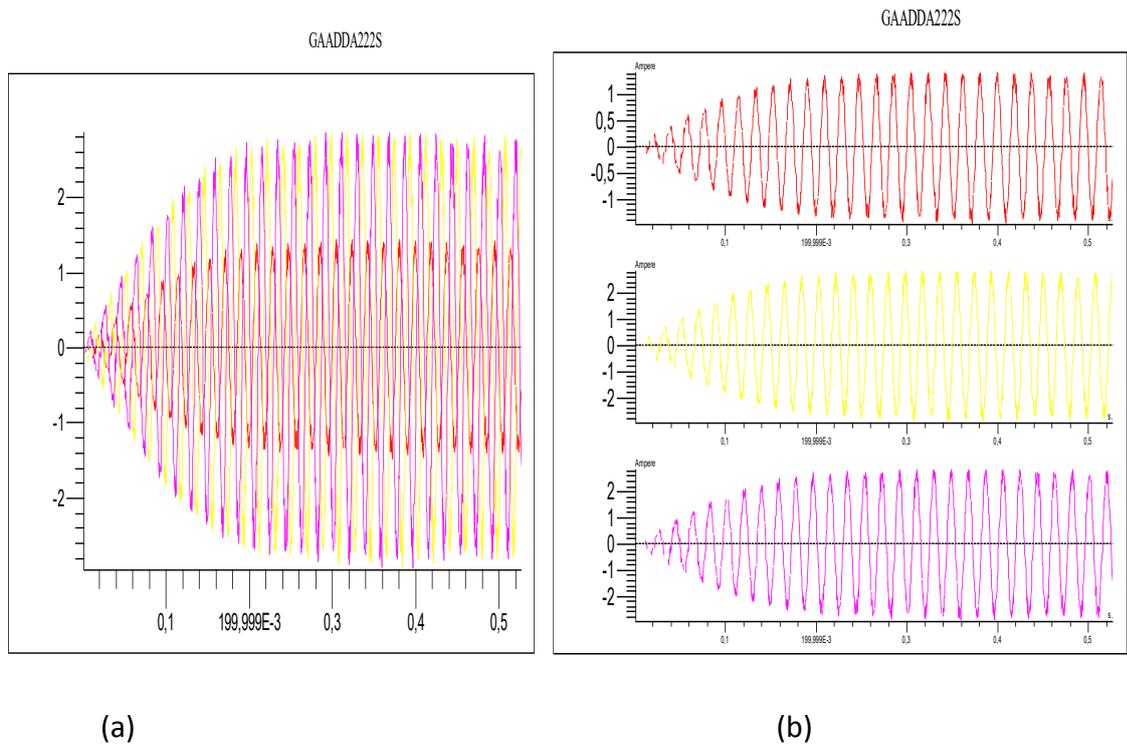


Figure 3.18 : (a) évolution des courants statoriques (b) évolution de courants juxtaposé

C. Charge Equilibré

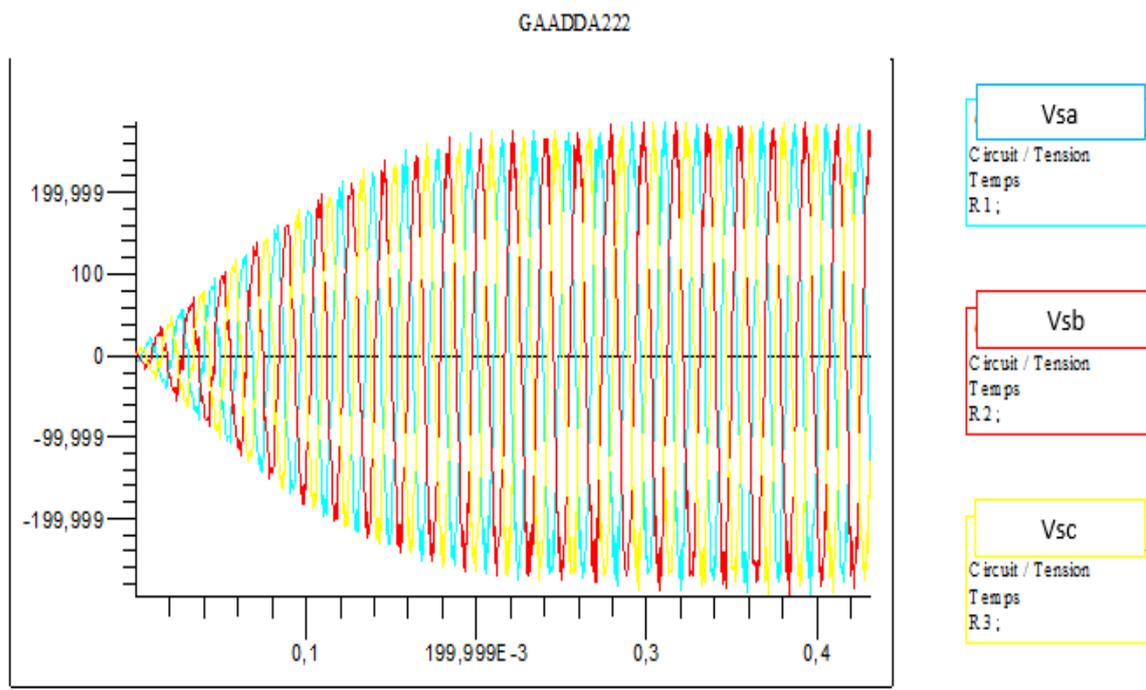
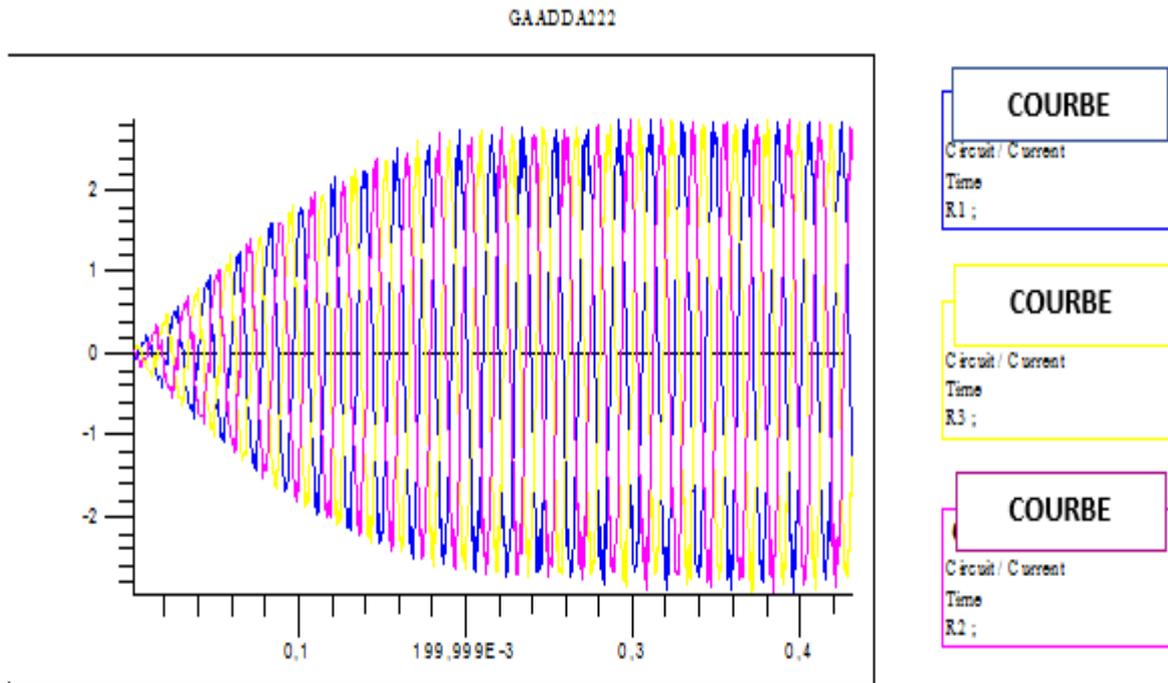


Figure 3.19 : Evolution des tensions statoriques



(a)

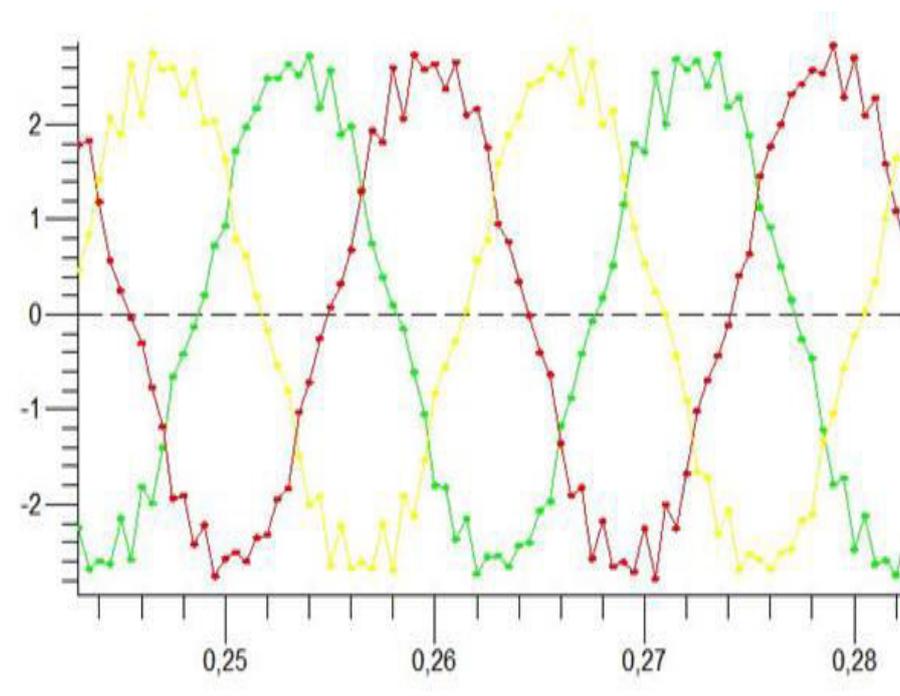


Figure 3.20 : (a) Evolution des courants statoriques ; (b) Zoom d'évolution des courants statoriques

3.7.2 Tensions rotoriques déséquilibrés avec charge équilibré

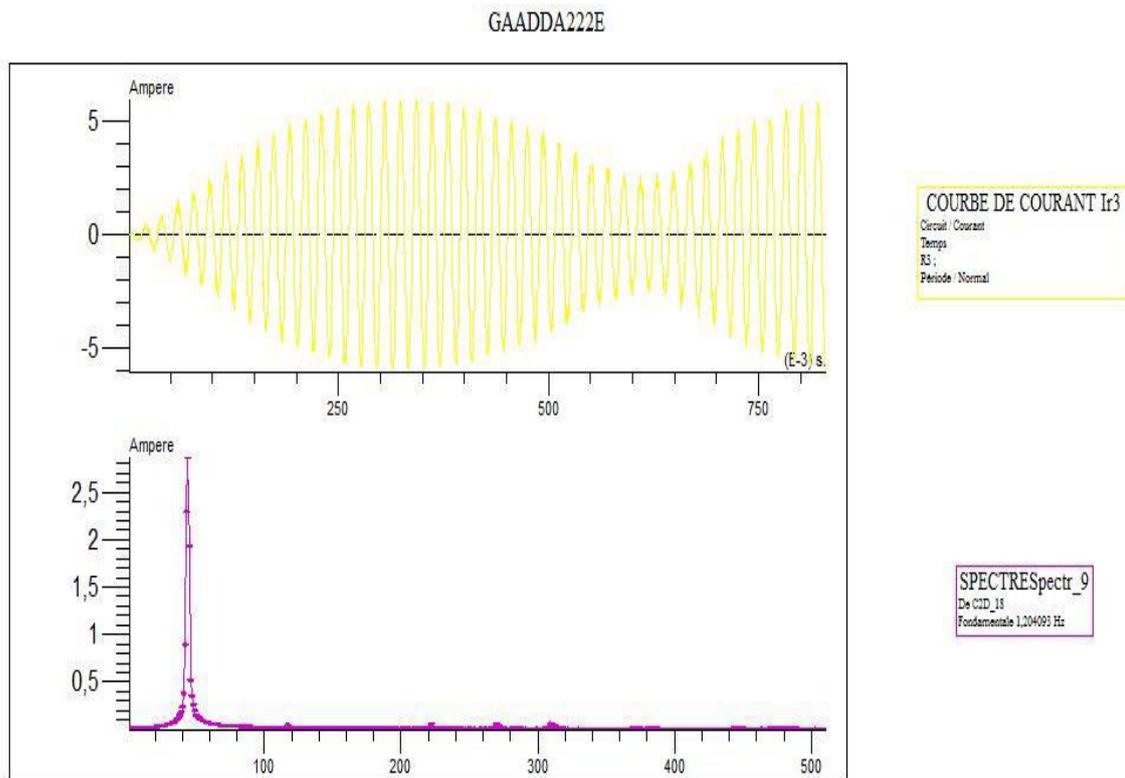


Figure 3.21 : évolution de courant statorique et les spectres des harmoniques

3.8 Interprétation des résultats

La densité de flux magnétique est répartie comme indiqué à la figure 3.7. La distribution varie avec la quantité de courant induite dans les enroulements du stator. Cela donne naissance à différentes densités de flux à différentes positions et vitesses du rotor en raison du courant alternatif induit dans les enroulements de différents pôles. Les pôles sont représentés sur la figure 3.8 où les isovalues du flux magnétique ont été bien représentés pour montrer les surfaces avec la magnitude de flux magnétiques. Les figure 3.9 et figure 3.10 montre la variation de composants normale et tangentielle respectivement. A chaque moment de rotation de la machine il existe les composantes normales et tangentielles qui sont 90° à l'autre.

L'évolution des courants et des tensions électriques est semblable à celle du chapitre 2 avec la charge en déséquilibre consommant différents courants comme le montre la figure

3.18 et en équilibre consommant la même quantité que dans la figure 3.20. La vitesse a été maintenue à 500 tr/min pour assurer la même vitesse qui a été utilisée dans les expériences pratiques. Dans la figure 3.12 la tension statorique croit plus rapide et dépasse sa valeur de régime permanent et il stabiliser et maintenir son amplitude à 60V et dans la figure 3.15 l'évolution avec une grand tension rotorique de 220V à 50Hz et une vitesse de 1500tr/min la tension décroît tend vers 0 qu'il approche le régime permanent. Dans la figure 3.21 le courant périodiquement augmente et décroît dans un essai des tension rotoriques déséquilibrés. Il existe les harmoniques montrent par les spectres dans la même figure, c'est-à-dire les tensions déséquilibrées affecté la santé de la machine.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu le dimensionnement du GADA pour obtenir les paramètres nécessaires à la construction du modèle de méthode des éléments finis dans Flux 2D. Les résultats de ces simulations par Flux 2D sont similaires à ceux obtenus dans la simulation du chapitre 2 par MATLAB. La cohérence de ces résultats nous garantit de la performance du GADA dans différents tests. Les résultats des deux simulations des chapitres 2 et 3 vont être confirmés par les expériences pratiques. Maintenant, dans le prochain chapitre, nous allons identifier les paramètres du GADA utilisés dans les expériences.

Chapitre 4 : Identification paramétrique et validation expérimentale

4.1 Introduction

Le manque des paramètres donné par le constructeur pour déterminer ces paramètres et la difficulté de leur mesure directe, font intervenir l'identification paramétrique par différentes approches. Dans ce qui suit, on va aux moyens d'identification conventionnelles pour déterminer ces paramètres électriques, et après on passera à l'identification des paramètres mécaniques.

4.2 Identification paramétrique

4.2.1 Schéma Equivalente

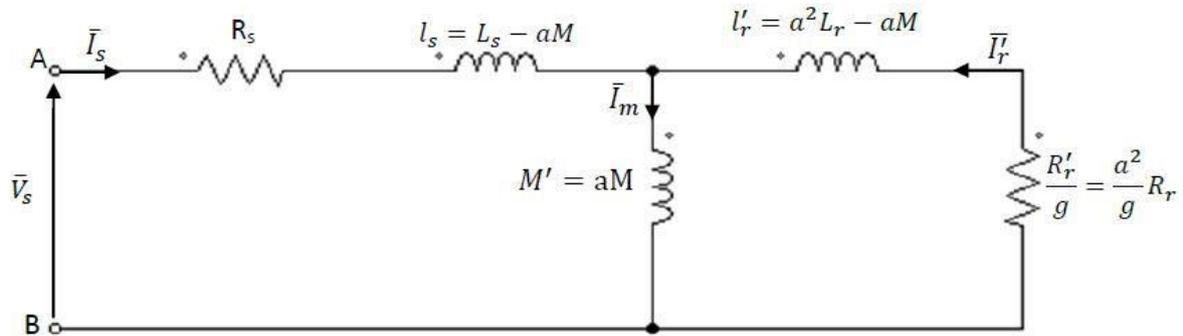


Figure 4.1 : Circuit équivalent approximatif en régime permanent ramené au stator

R'_r : Résistance rotorique ramenée au stator.

l'_r : Inductance rotorique ramenée au stator.

Dans le repère fixe du stator :

$$\bar{V}_s = (R_s + j\omega_s L_s)\bar{I}_s + j\omega_s M\bar{I}_r \quad (4.0)$$

$$\bar{V}_r = 0 = (R_r + j\omega_s L_r)\bar{I}_r + j\omega_r M\bar{I}_s \quad (4.1)$$

D'ou $\omega_r = g\omega_s$, donc équation (4.1) dévient :

$$\bar{V}_r = 0 = \left(\frac{R_r}{g} + j\omega_s L_r\right)\bar{I}_r + j\omega_r M\bar{I}_s \quad (4.2)$$

Le modèle de la figure (4.1) ainsi obtenu est considéré comme celui du transformateur statique en court-circuit avec une résistance secondaire ramenée au primaire qui vaut : $\frac{R'_r}{g}$. C'est le modèle le plus proche de la représentation physique (réelle) d'une machine asynchrone. En négligeant les pertes magnétiques dans le fer, ce schéma (du type transformateur) est caractérisé par cinq paramètres électriques (R_s, L_s, R_r, L_r, M) à identifier par l'une des diverses méthodes existantes.

4.2.2 Méthode de la plaque signalétique

Ce procédé [20], consent une approximation grossière (très approximative), directe et rapide des paramètres électriques de la MAS tout en utilisant les indications (nominales) de la plaque signalétique telle que : $V_s, I_s, f_s, \cos \phi_s$ et g_N . En supposant que $L'_r = M$ (fuites totalisées dans le stator) et que la machine est sans pertes, donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \frac{1 - \cos \phi}{1 + \cos \phi}; \\ T_r = \frac{1}{\omega_r} \sqrt{\frac{1}{\sigma}}; \\ l_s = \frac{V_s \sqrt{\sigma}}{I_s \omega_s}; \\ M = L_r = l_s \frac{1 - \sigma}{\sigma}; \\ L_s = M + l_s; \\ R'_r = \frac{L'_r}{T_r} \end{array} \right. \quad (4.4)$$

Avec $\omega_s = 2\pi f_s$;

$\omega_r = g_N \omega_s = \omega_s - \omega$

4.2.3 Méthode des essais classiques

Cette méthode [20], comporte en la mesure par phase, des puissances active (P) et réactive (Q) lors des essais effectués en régime permanent à puissance utile nulle : l'essai à vide ($g \approx 0$) et l'essai à rotor bloqué ($g = 1$).

Les puissances mesurées sont utilisées pour estimer les composantes R_e et X_e de l'impédance d'entrée Z_e , qui sont en fonction des grandeurs recherchés, comme suit :

$$R_e = \frac{P}{P^2 + Q^2} V_s^2 = \frac{P}{I_s^2} \quad (4.5)$$

$$X_e = \frac{Q}{p^2+Q^2} V_s^2 = \frac{Q}{I_s^2} \quad (4.6)$$

4.2.4 Identification de la machine asynchrone à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné (à bagues) a l'avantage d'avoir son circuit rotorique accessible à la mesure directe de ses paramètres par des essais classiques qui s'apparentent à ceux du transformateur.

4.2.4.1 Mesure des résistances

A l'assiste d'un essai en courant continu, on détermine par la méthode volt-ampèremétrique les résistances R_s et R_r relatives respectivement à une phase du stator et une phase du rotor.

4.2.4.2 Méthode statique du quadripôle

Le fonctionnement de la machine asynchrone en régime permanent est régi par un système simple de deux équations définies en notation complexe (modèle dit à un axe) comme suit :

$$\bar{V}_s = (R_s + j\omega_s L_s) \bar{I}_s + j\omega_s M \bar{I}_r \quad (4.7)$$

$$\bar{V}_r = \left(\frac{R_r}{g} + j\omega_s L_r \right) \bar{I}_r + j\omega_s M \bar{I}_s \quad (4.8)$$

L'accès électrique simultané du stator et du rotor permet de réaliser des essais classiques basés sur la méthode statique du quadripôle en triphasé (machine à l'arrêt). La figure 4.1 de la MADA assimilée à un quadripôle est définie par les équations aux tensions suivantes :

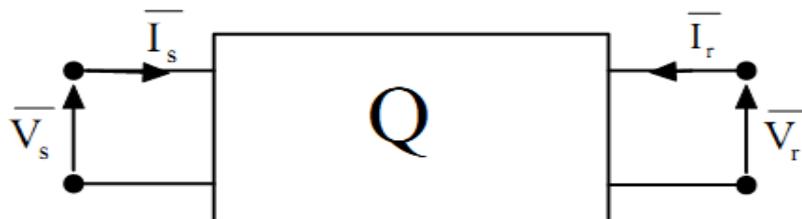


Figure 4.2 : Machine asynchrone assimilée à un quadripôle

$$\bar{V}_s = (R_s + j\omega_s L_s)\bar{I}_s + j\omega_s M\bar{I}_r \quad (4.9)$$

$$\bar{V}_r = (R_r + j\omega_s L_r)\bar{I}_s + j\omega_s M\bar{I}_s \quad (4.10)$$

4.2.4.3 Essai à rotor ouvert

Le stator est alimenté par un système de tensions triphasé équilibré, le rotor est ouvert ($I_r = 0$). A tensions (V_{s0}) variables et à fréquence nominale f_s , on relève le courant de ligne I_{s0} et la tension rotorique induite $V_r = U_r/\sqrt{3}$. D'après (4.5) on aura :

$$\bar{V}_{s0} = (R_s + j\omega_s L_s)\bar{I}_{s0} \quad (4.11)$$

D'où :

$$L_s = \frac{1}{2\pi f_s} \sqrt{\left(\frac{V_{s0}}{I_{s0}}\right)^2 - R_s^2} \quad (4.12)$$

Si l'on considère la non saturation du circuit magnétique de la machine, le rapport V_{s0}/\bar{I}_{s0} est déterminé par la pente de la partie linéaire de la caractéristique à vide $V_{s0} = f(I_{s0})$. L'équation (4.6) permet de calculer la mutuelle stator-rotor :

$$M_{s-r} = \frac{\bar{V}_{r0}}{\omega_s \bar{I}_{s0}} \quad (4.13)$$

et le rapport de transformation à rotor ouvert :

$$m_{s0} = \frac{\bar{V}_{s0}}{\bar{V}_{r0}} \quad (4.14)$$

4.2.4.4 Essai à stator ouvert

Le stator est ouvert ($I_s = 0$), le rotor est alimenté à tensions triphasées équilibrées variables et à fréquence nominale. L'équation (4.6) devient :

$$\bar{V}_{r0} = (R_r + j\omega_s L_r)\bar{I}_{r0} \quad (4.15)$$

D'où

$$L_r = \frac{1}{2\pi f_r} \sqrt{\left(\frac{V_{r0}}{I_{r0}}\right)^2 - R_r^2} \quad (4.16)$$

et l'inductance mutuelle rotor-stator :

$$M_{r-s} = \frac{\bar{V}_{s0}}{\omega_s \bar{I}_{r0}} \quad (4.17)$$

et le rapport de transformation à rotor ouvert :

$$m_{r0} = \frac{\bar{V}_{r0}}{\bar{V}_{s0}} \quad (4.18)$$

Si les deux essais à vide à l'arrêt, sont réalisés de façon à produire le même niveau de flux, donc le même état magnétique, on doit avoir $M_{sr} = M_{rs}$. On se ramène à un terme unique en posant :

$$M_0 = \sqrt{M_{sr} M_{rs}} \quad (4.19)$$

Les essais à vide à l'arrêt permettent d'étudier la variation des inductances en fonction de l'état magnétique de la machine donc en fonction de la tension et du courant appliqués, les phénomènes de dispersion peuvent être clairement constatés en traçant $V_{r0} = f V_{s0}$ pour les deux essais sur le même graphe.

4.2.4.5 Essai à rotor en court-circuit et rotor bloqué

Si le rotor est mis en court-circuit $\bar{V}_r = 0$ et rotor bloqué ($g = 1$), l'équation (4.4) vérifie l'équation suivant et les caractéristiques du court-circuit $I_{rcc} = f(I_{scc})$ est linéaire.

$$0 = (R_r + j\omega_s L_r) \bar{I}_{rcc} + j\omega_s M \bar{I}_{scc} \quad (4.20)$$

D'où

$$M = \frac{1}{2\pi f_s} \frac{I_{rcc}}{I_{scc}} \sqrt{R_r^2 + (\omega_s L_r)^2} \quad (4.21)$$

4.2.4.6 Essai à stator en court-circuit et rotor bloqué

Le stator court-circuité ($V_s = 0$), le rotor bloqué, est alimenté à fréquence nominale. L'équation (4.4) vérifie que :

$$0 = (R_r + j\omega_s L_r) \bar{I}_{rcc} + j\omega_s M \bar{I}_{scc} \quad (4.22)$$

D'où

$$M = \frac{1}{2\pi f_s} \frac{I_{rcc}}{I_{scc}} \sqrt{R_r^2 + (\omega_s L_r)^2} \quad (4.23)$$

L_s et L_r sont support et valides pas les équations (4.21) et (4.23)

4.2.5 Identification des paramètres mécaniques

4.2.5.1 Essai à ralentissement

a) Détermination de moment d'inertie

La détermination du moment d'inertie du rotor est basée sur la mesure de la vitesse en fonction du temps lors du ralentissement. En connaissant les pertes mécaniques et le courbe de ralentissement de la machine, nous allons calculer le moment d'inertie J . L'équation de mouvement est [18] [19] :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_e - f\Omega_m - C_r \quad (4.24)$$

Mais $C_e = 0$ et f est habituellement faible

Pour simplifier l'équation, on a :

$J \frac{d\Omega_m}{dt} = -C_r = -\frac{P_m}{\Omega_m}$, la valeur de J est calculée en utilisant l'expression suivant :

$$J = \frac{-P_m(\Omega_{r0})}{\Omega_{r0} \left[\frac{d\Omega_r}{dt} \right]_{\Omega_r = \Omega_{r0}}} \quad (4.25)$$

Ou bien $J \frac{d\Omega_m}{dt} = f\Omega_m - C_r \rightarrow J \frac{d\Omega_m}{dt} + f\Omega_m = -C_r$

En divisant par f , on obtient :

$$\frac{J}{f} \frac{d\Omega_m}{dt} + \Omega_m = -\frac{C_r}{f}$$

Nous posons $\tau_m = \frac{J}{f}$: constante de temps mécanique

L'équation différentielle après résolution devient :

$$\Omega_m(t) = K \cdot e^{-\frac{t}{\tau_m}} - \frac{C_r}{f}$$

La constante K est donnée à partir des conditions initiales. $t = 0, \Omega_m(0) = \Omega_0$.

Alors $\Omega_m(t) = \left(\Omega_0 + \frac{C_r}{f} \right) e^{-\frac{t}{\tau_m}} - \frac{C_r}{f}$

Le temps final t_f à l'arrêt totale est :

$$\Omega_m(t_f) = 0 \Leftrightarrow \left(\Omega_0 + \frac{C_r}{f}\right) e^{-\frac{t}{\tau_m}} - \frac{C_r}{f} = 0$$

Donc
$$t_f = \tau_m \ln\left(1 + f \frac{\Omega_0}{C_r}\right)$$

Car f est faible nous faisons l'approximation mathématique $\ln(x + 1) \approx x$ pour $x \ll 1$ pour

trouve :
$$t_f = \tau_m f \frac{\Omega_0}{C_r}$$

Maintenant nous déduisons le moment d'inertie J :

$$J = t_f \frac{C_r}{\Omega_0}$$

Le couple résistant à vide C_r est :

$$C_r = \frac{P_{mec}}{\Omega_0}$$

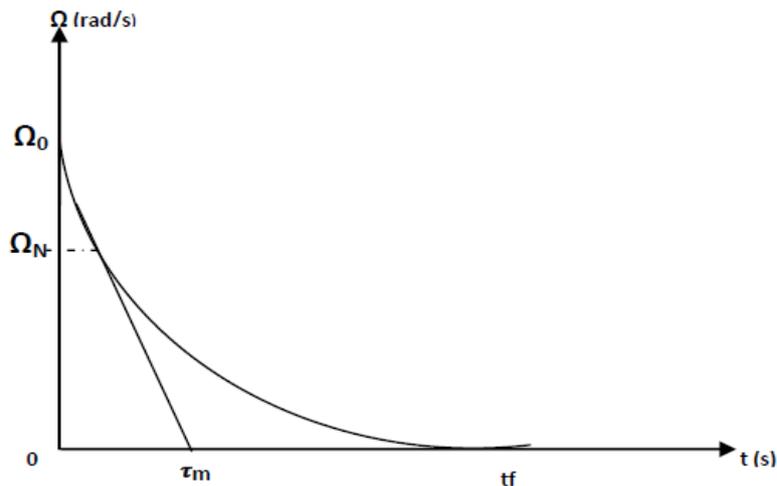


Figure 4.3 : graphe de ralentissement

b) Détermination du coefficient de frottements visqueux

En apprenant la constante de temps mécanique à partir de sa tangente graphique sur la courbe de décélération le coefficient de frottements visqueux f est aussitôt calculé par :

$$f = \frac{J}{\tau_m}$$

4.2.6 Résultats expérimentaux

4.2.6.1 Introduction

Ces expériences ont été réalisées pour identifier les paramètres de la machine. Toutes les précautions du laboratoire ont été strictement observées pour éviter les accidents et les blessures tant aux personnes qu'aux machines.

4.2.6.2 Procédure d'identification des paramètres

La machine en identifier est une machine asynchrone à rotor bobiné triphasée de 2KW du laboratoire ayant les indications nominales suivantes :

Volts rotor 220/380V ; Volts Stator 220/380V; Courant 8.3/4.8; Fréquence 50Hz, $\text{Cos } \phi = 0.8$; Vitesse 1440tr/min.

La machine à l'approfondissement est alimentée sous sa tension nominale et tourne à vide à une vitesse constante Ω_0 . En coupant alors la tension d'alimentation statorique, la machine freine sous l'effet de ses pertes mécaniques totales, et cette diminution de la vitesse jusqu'à arrêt total, est observée et enregistrée par l'oscilloscope. Lors de ces tests, les machines ont été conçues pour fonctionner en mode moteur. La méthode à deux wattmètres a été utilisée pour les mesures.

- Les deux wattmètres sont connectés aux sorties pour mesurer la puissance dans les phases.
- La machine est démarrée et sa vitesse d'état transitoire est enregistrée à l'aide de l'oscilloscope. Après avoir atteint l'état stable, l'alimentation est coupée et la courbe de décélération est enregistrée.
- Dans le deuxième test qui est le test du rotor bloqué, la machine est alimentée avec le courant nominal de 3,8 A et la tension du stator et la puissance du deux wattmètres sont notés.
- Dans le troisième test, qui est un essai à vide, la machine est alimentée en tension nominale et la puissance et le courant sont notés.
- Le montage réalisé est montré dans le figure 4.9 suivant.

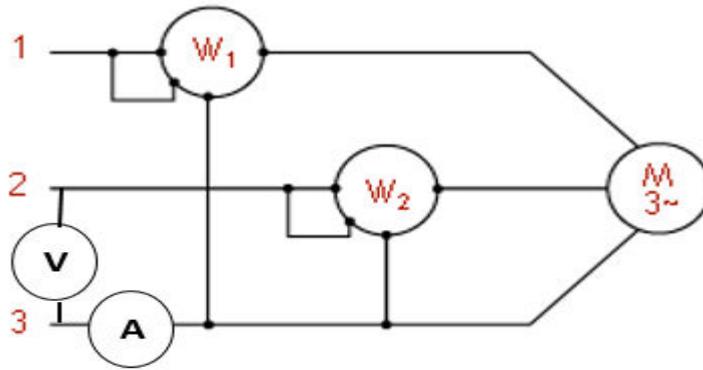


Figure 4.4 : montage de deux wattmètres

Puissance active : $P = P_1 + P_2$

Puissance réactive : $Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2)$

Pertes Joules : $P_{js} = \frac{3}{2}R_s I_{s0}^2$

A) Essai à vide

Dans l'essai à vide à vitesse proche du synchronisme, le schéma se réduit à 3 paramètres R_s , L_s et R_f .

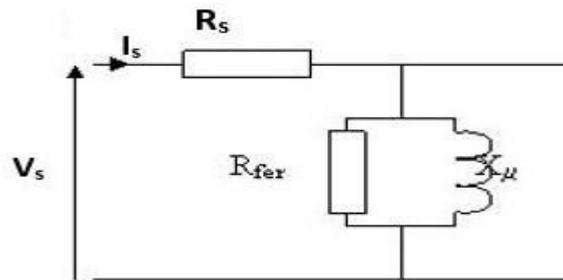


Figure 4.5 : Schéma équivalent dans l'essai à vide

B) Essai à rotor bloqué

Dans l'essai à rotor bloqué le schéma est réduit comme suit :

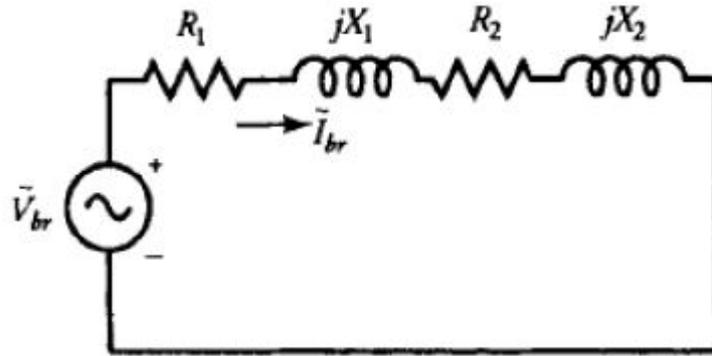


Figure 4.6 : Schéma équivalent dans l'essai à vide

4.2.7 Résultats d'identification

A) Mesures des résistances

La mesure en courant continu donne la valeur de la résistance d'une phase statorique :

$$R_s = 3\Omega$$

La mesure en courant continu donne la valeur de la résistance d'une phase rotorique :

$$R_r = 30\Omega$$

B) Méthode de la plaque signalétique

Les calculs dans cette méthode pour estimer les paramètres de la MADA en régime nominale sont basés sur les relations (4.4). Les résultats obtenus sont mis dans le tableau suivant :

$R_s(\Omega)$	$R_r'(\Omega)$	$L_s(H)$	$M'(H)$	$T_r(s)$	$M(H)$	σ
3	11.16	0.0611	0.55	0.0055	0.0614	0.1111

Tableau 4.1 : Résultats de la méthode de plaque signalétique

C) Méthode des essais classiques

Dans les tests effectués, nous avons mesuré V_s , I_s , P_1 et P_2 . Les autres paramètres ont été calculés en utilisant les circuits équivalents et les formules correspondantes.

- L'essai à rotor bloqué

$V_s(V)$	$I_{sc}(A)$	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$P_{sc}(W)$	$Q_{sc}(VAR)$	$R_r(\Omega)$	$N_r(H)$	$L_m(H)$
45	3.8	2300	-500	1800	4849.7	30• 38.55*	0.356	3.634

Tableau 4.2 : Résultats des mesures et calculs d'un rotor bloqué

- L'essai à vide :

$V_{so}(V)$	$I_{so}(A)$	$P_1(W)$	$P_2(W)$	$P_{so}(W)$	$Q_{so}(VAR)$	$R_{so}(\Omega)$	$P_{js}(W)$	$P_{fer}(W)$
220	2.90	720	-400	320	1939.9	3• 5.92*	74.68	85.48

Tableau 4.3 : Résultats des mesures et calculs à vide

• : représente une valeur mesure.

* : représente une valeur calculer.

4.2.7.1 Identification des paramètres mécaniques

La détermination du moment d'inertie du rotor est basée sur la mesure de la vitesse pendant la décélération en fonction du temps. La machine est alimentée en tension nominale sans charge jusqu'à ce qu'elle atteigne une vitesse constante Ω_0 . L'alimentation est ensuite coupée et la machine décélère en raison du couple de frottement et sa courbe est enregistrée à l'aide de l'oscilloscope, figure 4.7. Le moment d'inertie est ensuite calculé en utilisant l'équation (4.25).

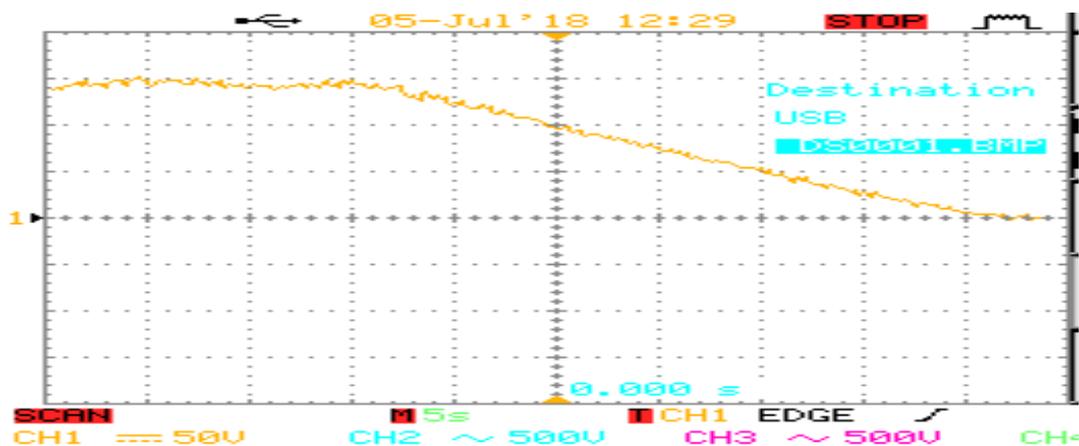


Figure 4.7 : Ralentissement de la machine

La puissance mécanique, P_m est calculer comme :

$$P_m = P_{s0} - P_{fer} - P_{js}$$

D'après la tableau 4.2, $P_m = 159.84W$

Alors le moment d'inertie :

$$J = \frac{-P_m(\Omega_{r0})}{\Omega_{r0} \left[\frac{d\Omega_r}{dt} \right]_{\Omega_r = \Omega_{r0}}} = \frac{15.984}{1500 \times 0.54} = 0.0197 \text{kgms}^{-1}$$

La gradient, $\frac{d\Omega_r}{dt}$, de la pente est calculer à l'aide de MATLAB.

Nous avons le moment d'inertie, alors nous déterminons le coefficient de frottement visqueux :

$$f = \frac{J}{\tau_m} = \frac{0.0197}{20} = 0.000985 \text{kgm}^2/\text{s}$$

4.2.8 Test des paramètres d'identification

Cette simulation était prise en compte pour vérifier la validité des résultats obtenus dans les essais expérimentaux d'identification. Nous avons appliqué ces résultats pour simulation avec MATLAB.

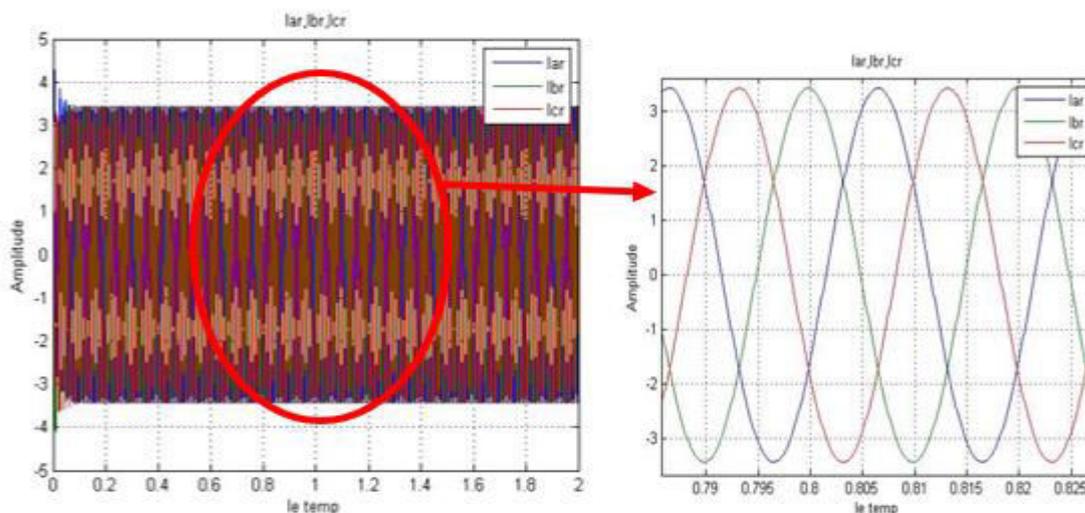


Figure 4.8 : évolution des courants rotoriques avec un zoom

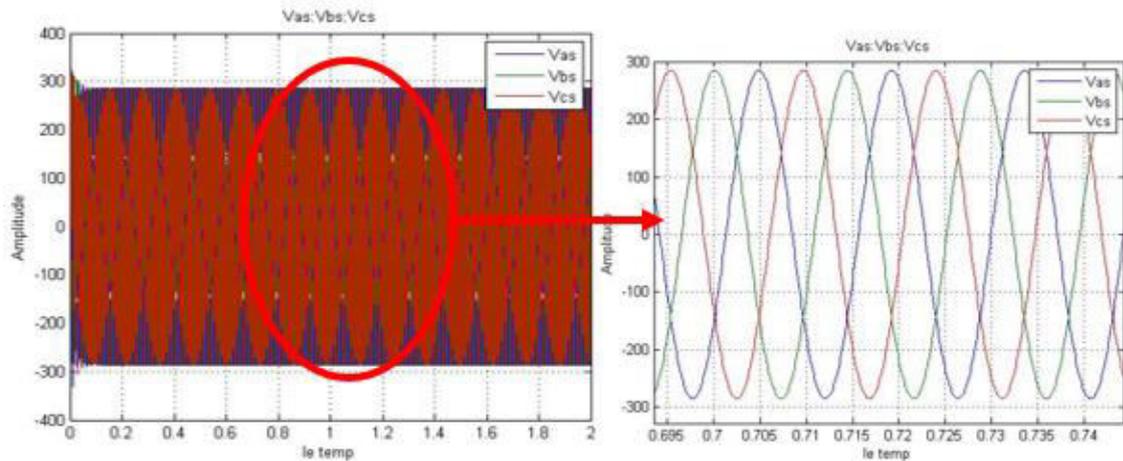


Figure 4.9 : évolution des tensions statoriques avec zoom

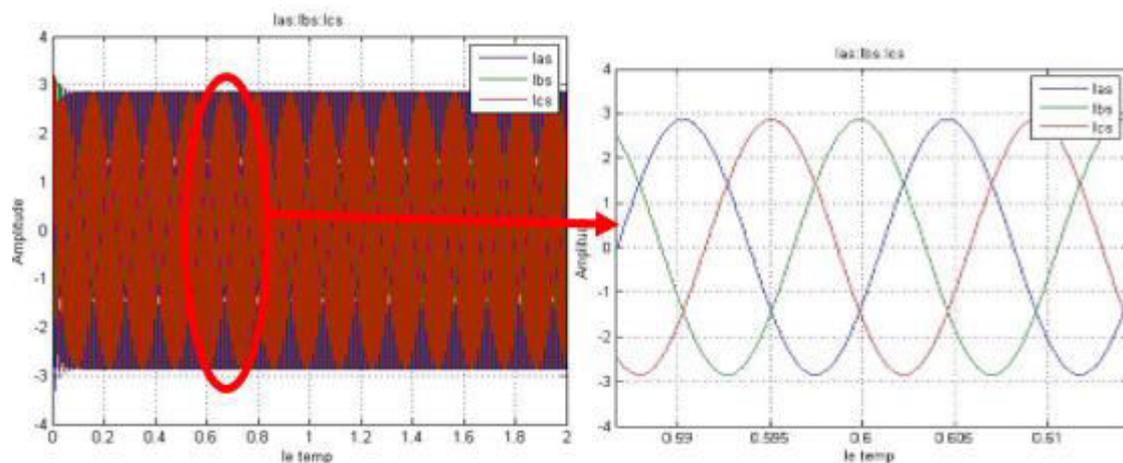


Figure 4.10 : évolution des courants statoriques avec zoom

4.3 Etude expérimentale des caractéristiques de la GADA

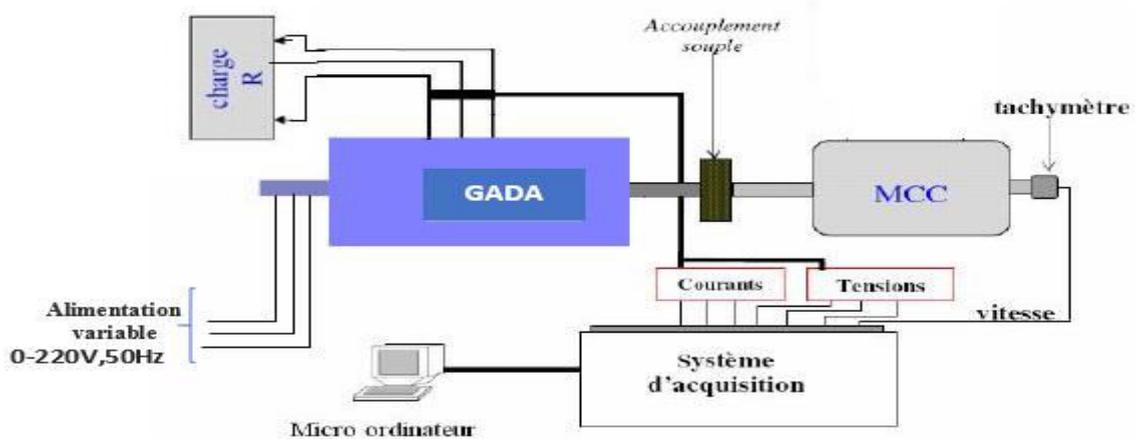
4.3.1 Introduction

Ces expériences ont été réalisées pour confirmer les caractéristiques observées lors des simulations par flux 2D et MATLAB. Dans ces expériences, un moteur à courant continu a été utilisé pour piloter le GADA. Différents tests sont effectués comme dans les programmes de simulation. Toutes les précautions du laboratoire ont été strictement observées pour éviter les accidents et les blessures tant aux personnes qu'aux machines.

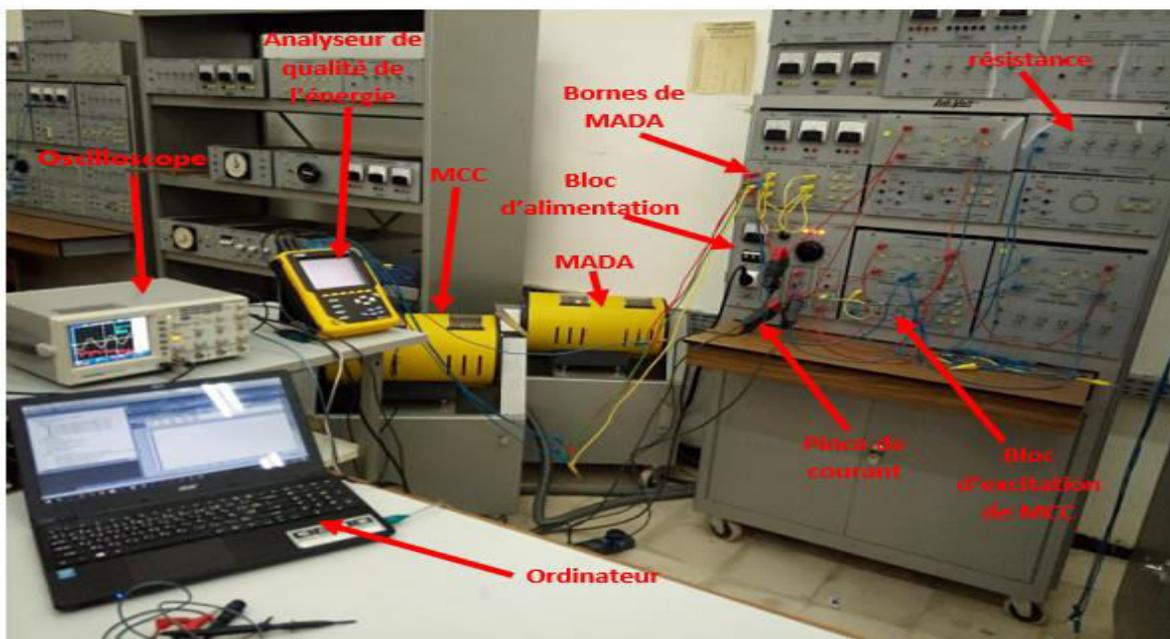
4.3.2 Procédure des essais de GADA

- Le moteur à courant continu était excité en shunt et conduisait le générateur.

- L'alimentation du rotor du générateur a été contrôlée à l'aide du contrôleur de tension variable.
- On a noté que la vitesse mécanique du générateur était maintenue à 500 tr / min.
- Le générateur a été chargé à l'aide de résistances variables.
- L'analyseur de la qualité de l'énergie et l'oscilloscope ont été utilisés pour visualiser et capturer la forme d'onde produits par le GADA.



(a)



(b)

Figure 4.11 : (a) Schéma de montage ; (b) Poste de travail avec les matériels d'expérience

4.3.3 Résultats des essais pratiques

a) A vide

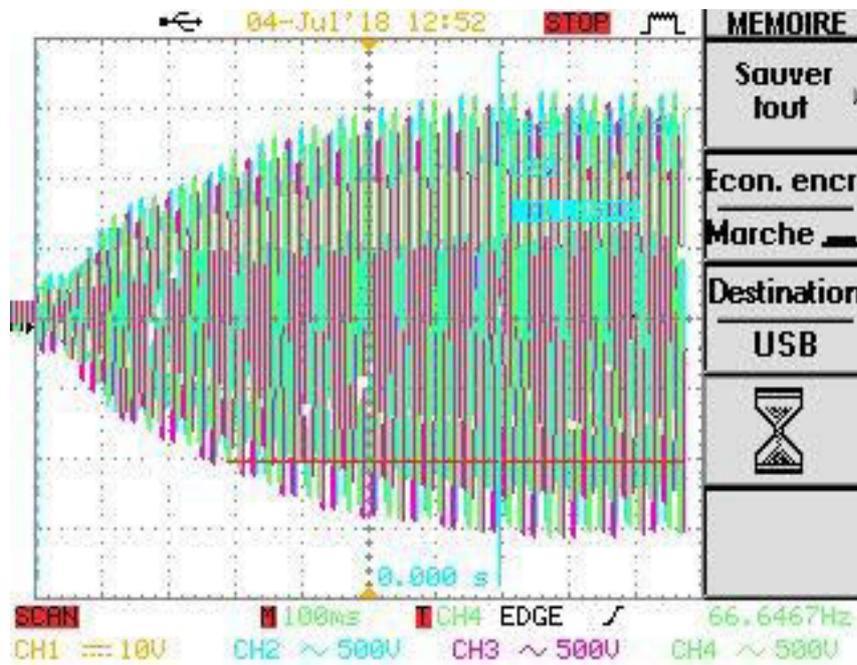


Figure 4.12 : évolution des tensions statoriques par l'oscilloscope

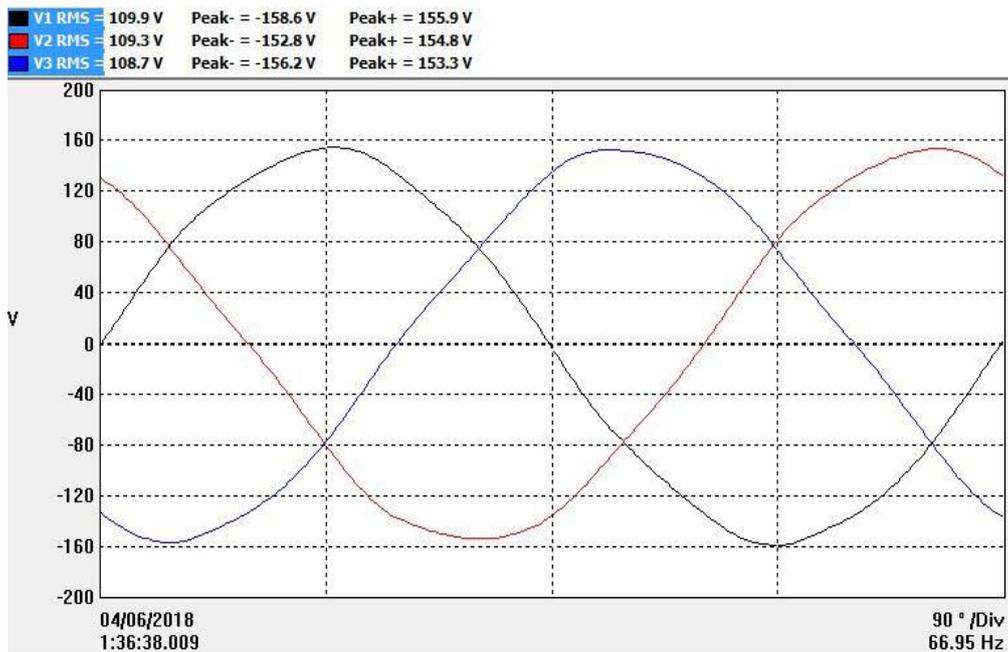


Figure 4.13 : Evolution des tensions statoriques

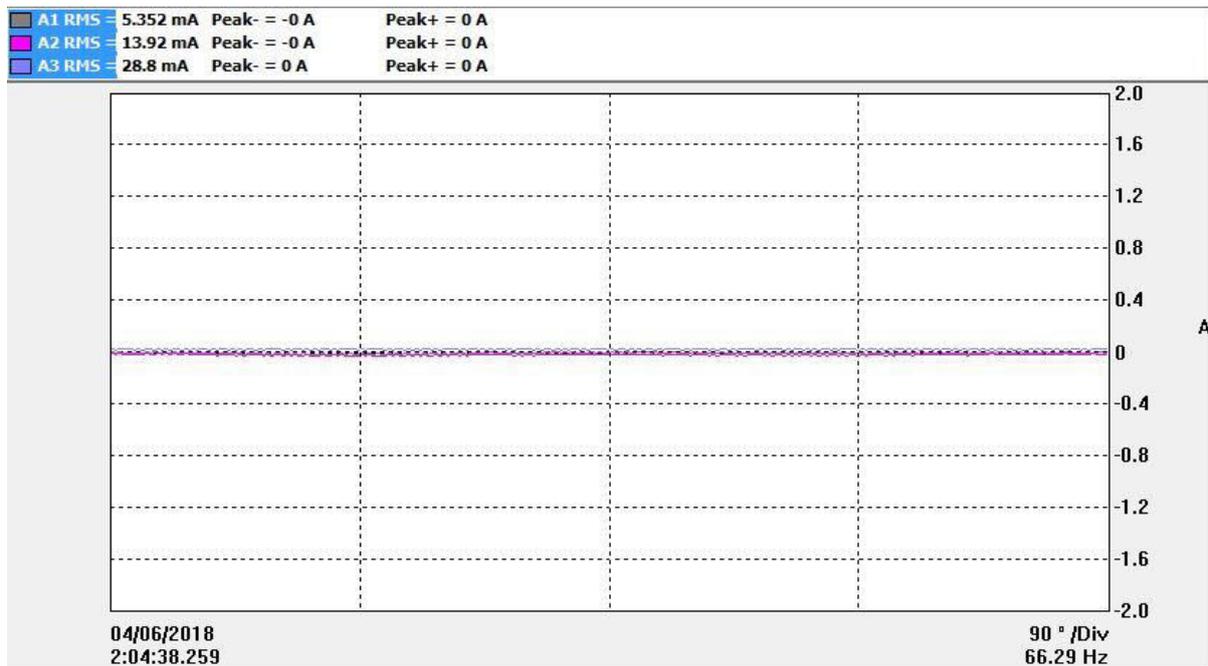


Figure 4.14 : évolution des courants statoriques

b) En Charge équilibré

Le rotor était alimenté par 90V de tension et tourné avec une vitesse de 500tr/min.

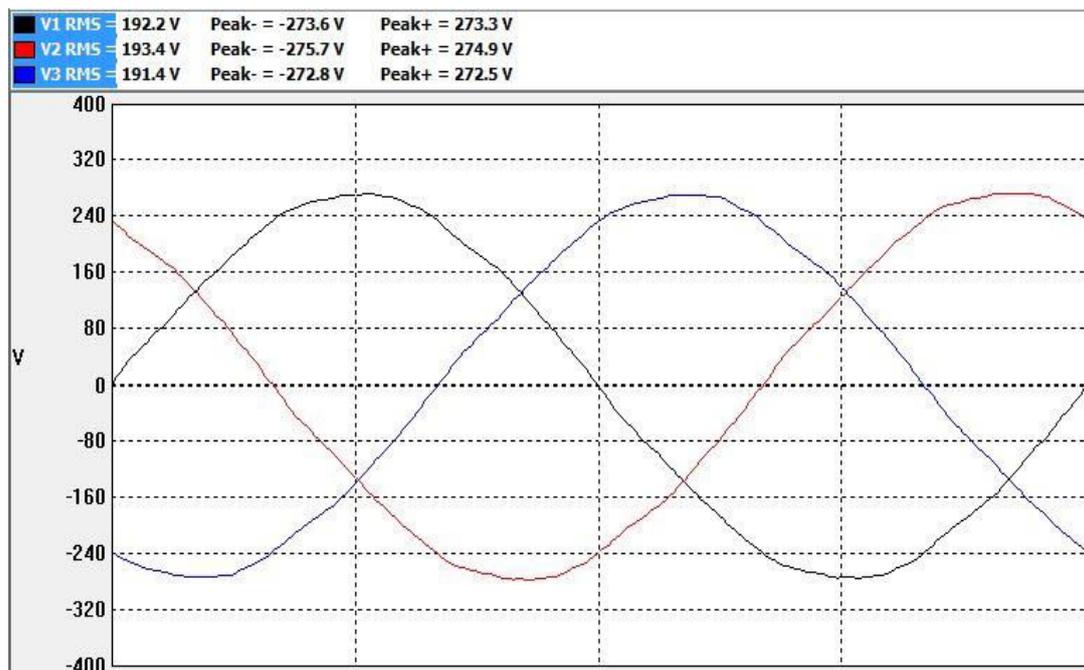


Figure 4.15 : évolution des tensions statoriques

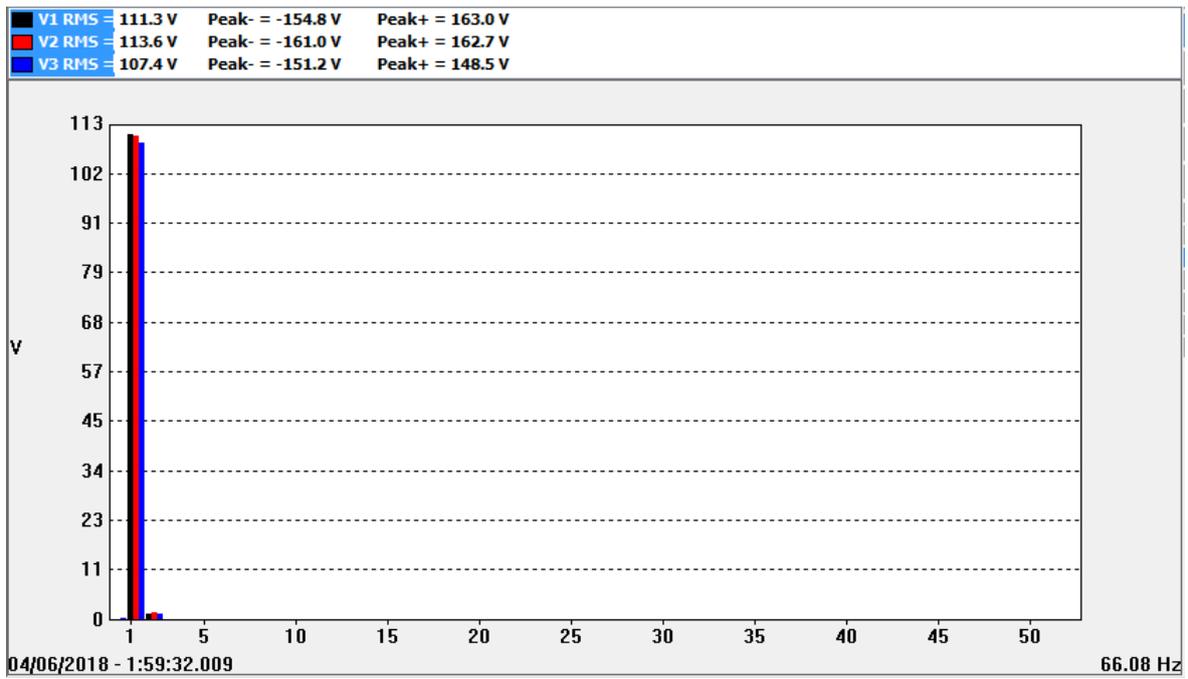


Figure 4.16 : Les spectres des tension statoriques avec charge équilibré

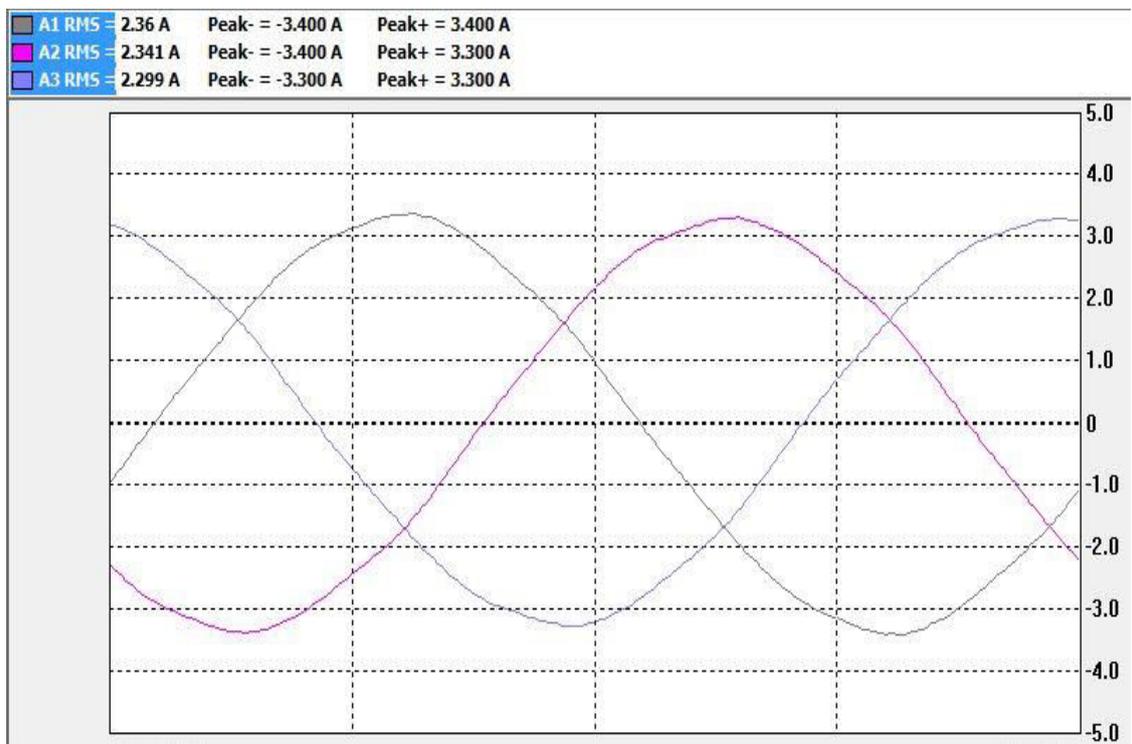


Figure 4.17 : évolution des courants statoriques

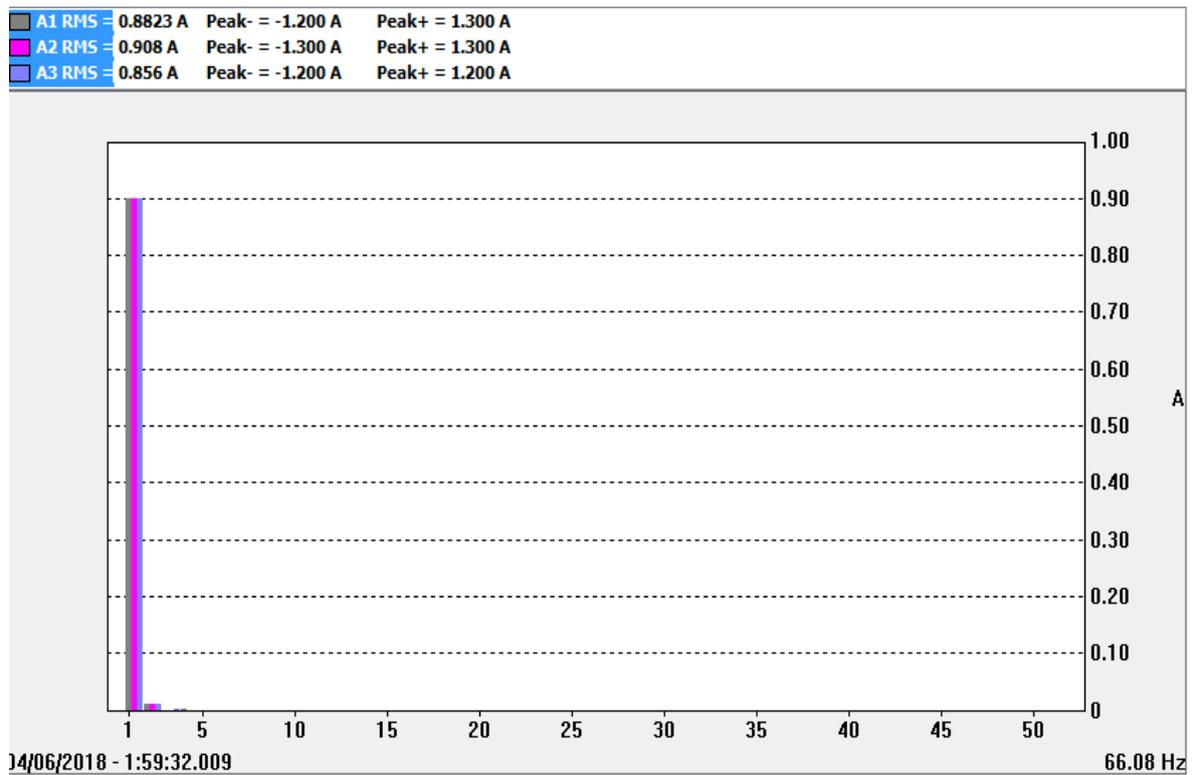


Figure 4.18: Les spectres des harmoniques de courants statoriques

c) Charge déséquilibrée

Le rotor était alimenté par 90V de tension et tourné avec une vitesse de 500tr/min

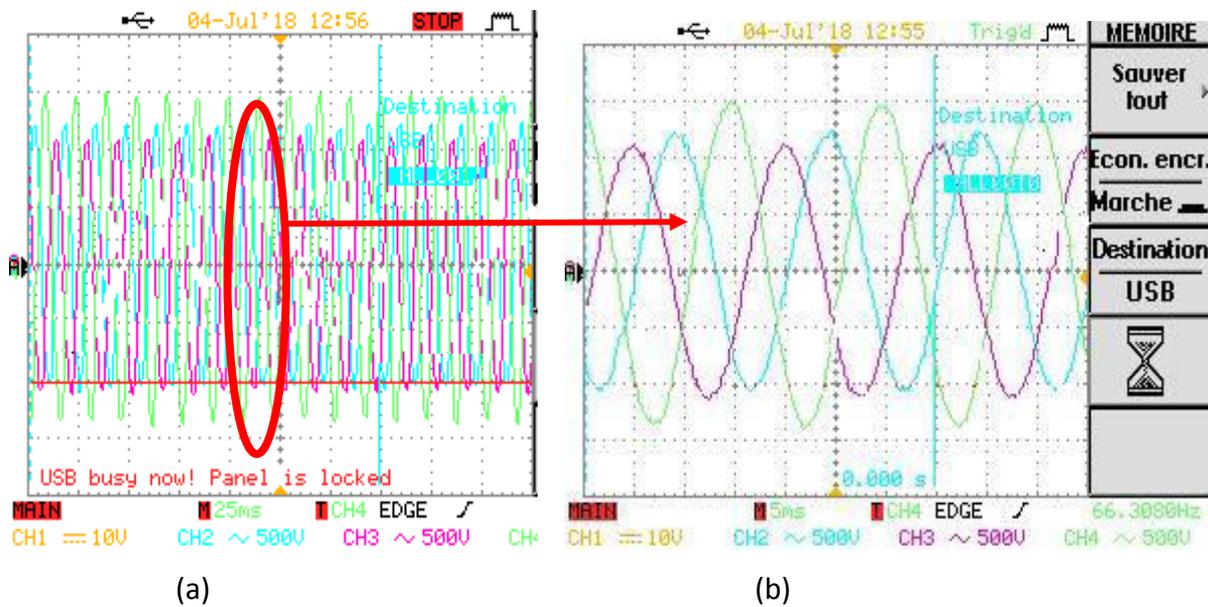


Figure 4.19 : (a) Evolution des tensions statoriques (b) évolution en zoom

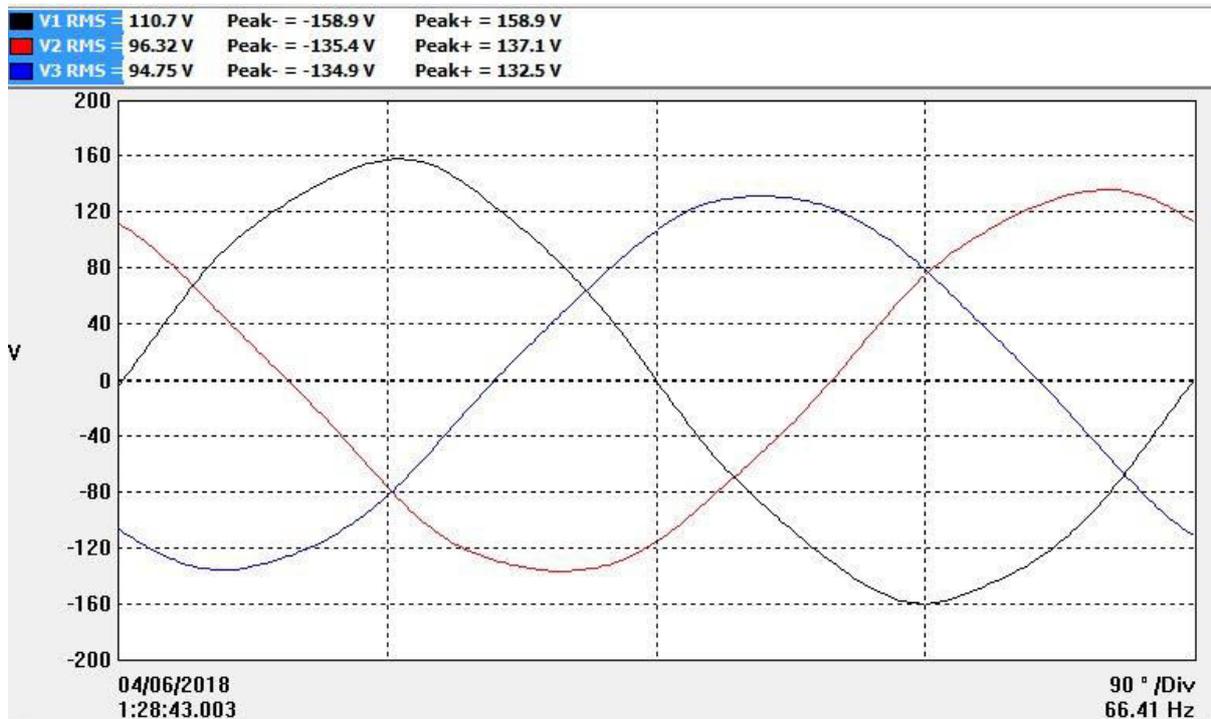


Figure 4.20 : Evolution des tensions statoriques

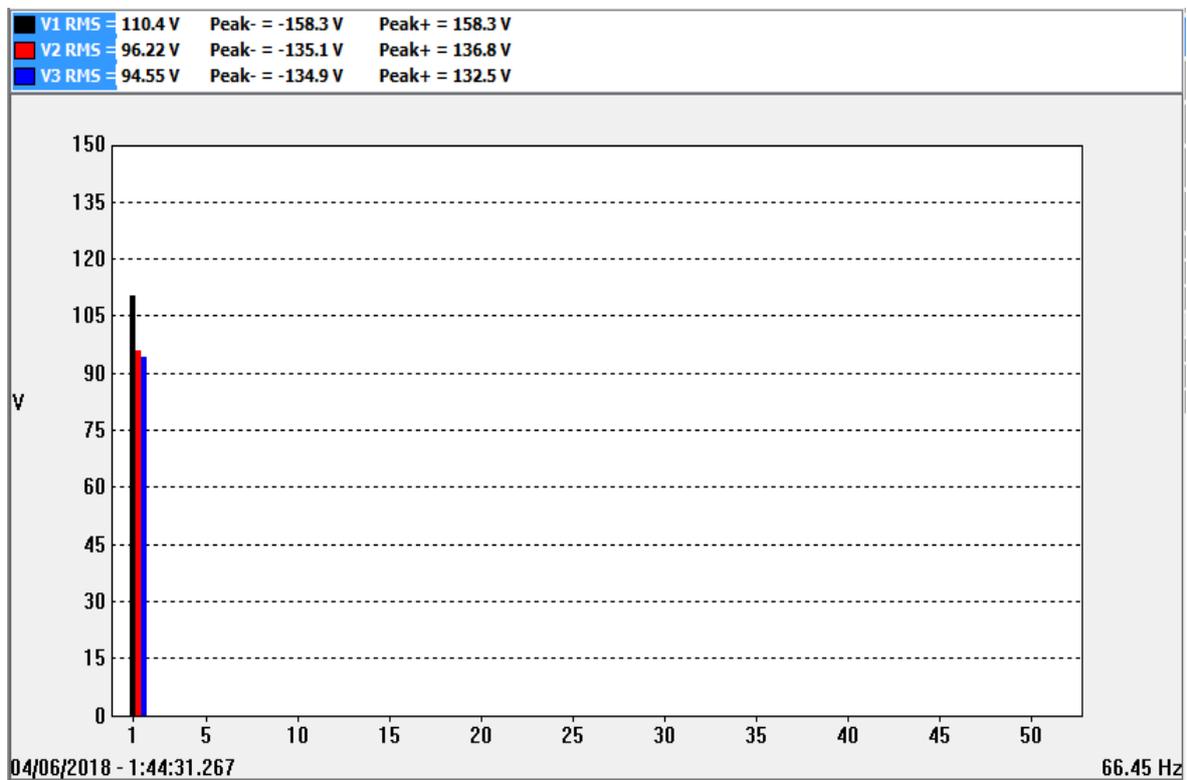


Figure 4.21 : Les spectres des harmoniques des tension statoriques

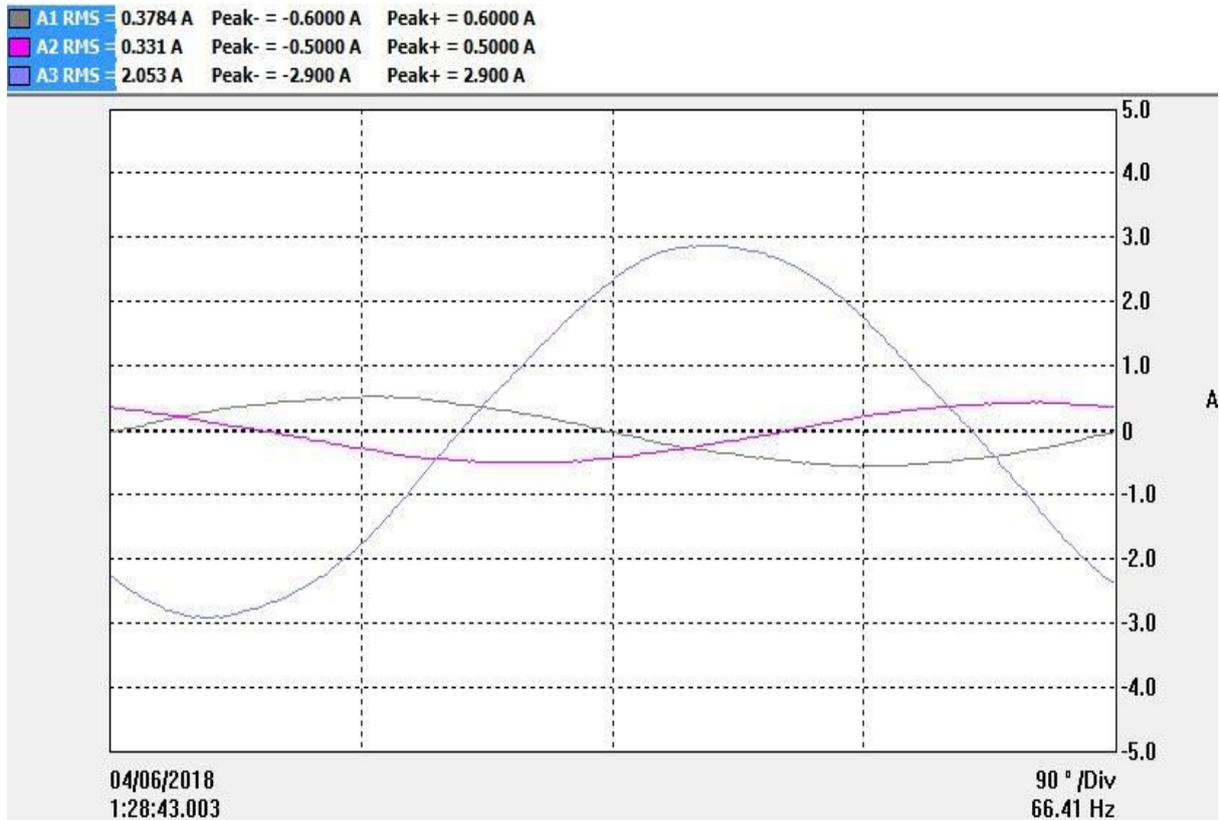


Figure 4.22 : Evolution des courants statoriques

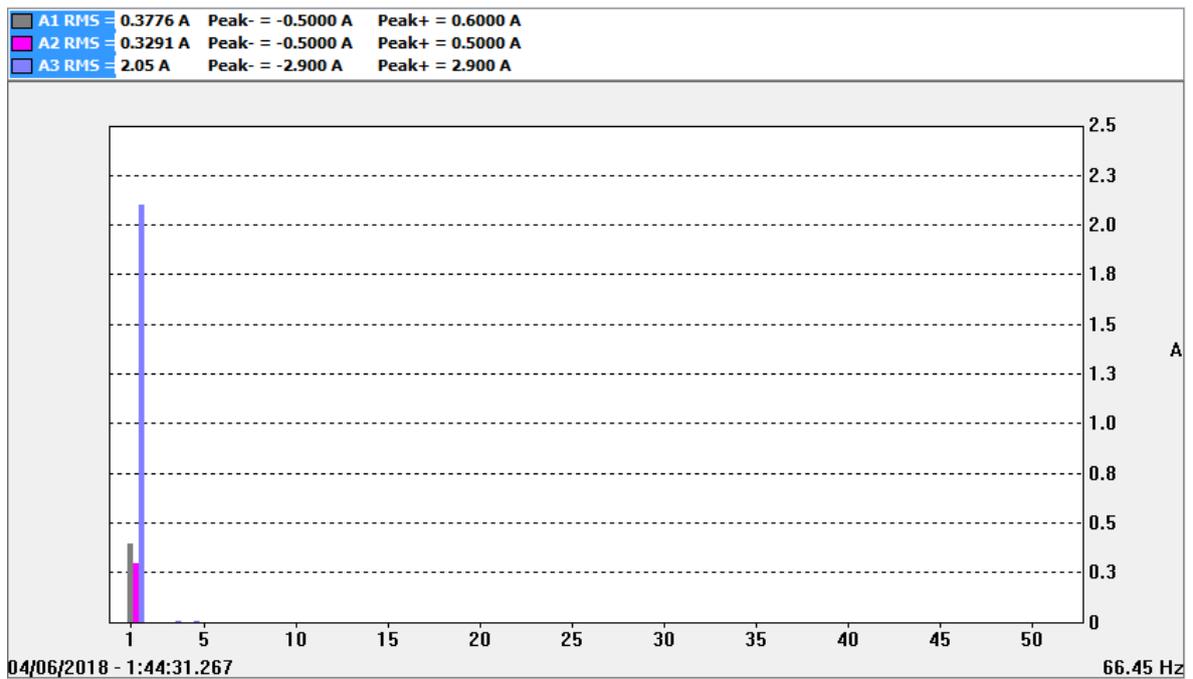


Figure 4.23 : Les spectres des harmoniques des courants statoriques

d. Essai avec tensions rotoriques déséquilibrés

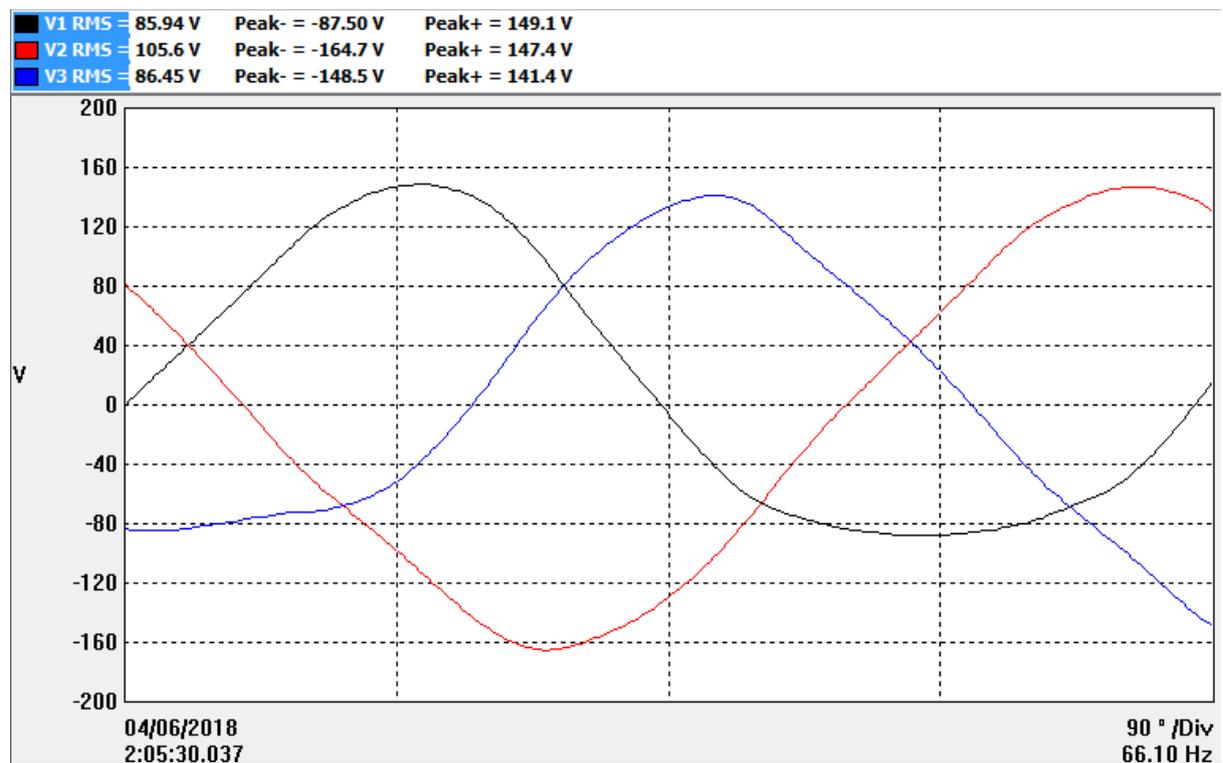


Figure 4.24 : Evolution de tensions statoriques

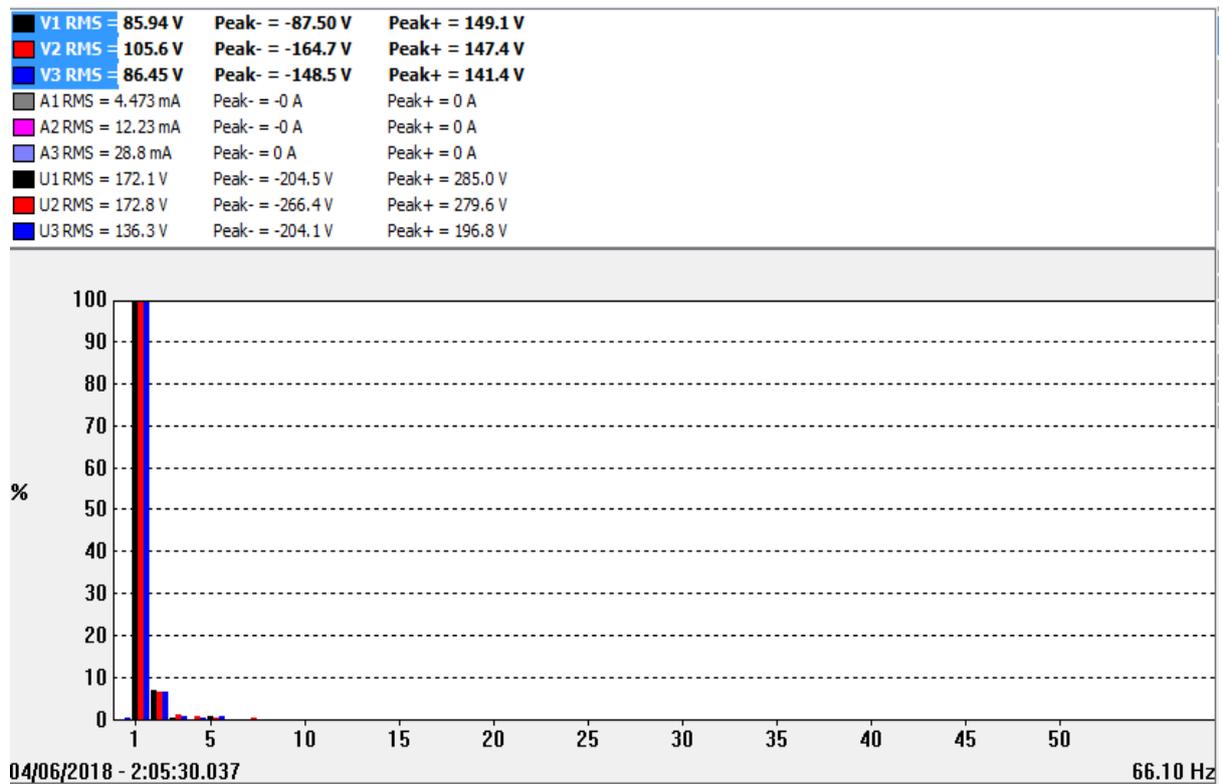


Figure 4.25 : Les spectres des harmoniques des tensions statoriques

4.3.4 Interprétation des résultats des essais

Dans l'essai à vide, les tensions augmentent pendant le régime transitoire jusqu'à ce qu'elles atteignent régime permanent, comme le montre la figure 4.12, où elles conservent leur amplitude de 156V comme le montre la figure 4.13. Dans la figure 4.14 les courants sont à 0A car il n'y a pas de courant consommé car il n'y a pas de charge.

Dans l'essai de charge à l'équilibre figure 4.15, les tensions ont presque les mêmes amplitudes et les courants de 4,5A ont les mêmes amplitudes car les charges sont égales et consomment la même quantité de courant de 3.4A comme dans figure 4.17. Les spectres des harmoniques de tensions statorique (figure 4.16) et courants statoriques (figure 4.18) montre que la machine est saine. Dans l'essai de charge déséquilibré de la figure 4.19 et de la figure 4.20, l'une des amplitudes des tensions est supérieure aux deux autres tensions en raison du fait qu'elle entraîne un courant plus important qui fournit une charge de 58.67Ω. L'évolution du courant qui traverse la plus grande charge peut être bien vue sur la figure 4.22.

4.4 Conclusion

Ce chapitre nous avons vu les applications expérimentales des différentes méthodes d'identification des paramètres et nous avons identifié les paramètres de la machine du labo. Les résultats obtenus sont peu précis à cause des vibrations de la machine à causer le tachymètre pour faire une mauvaise capture que en résultant donné un graphe de vitesse que n'est pas lisse. Les paramètres obtenus ont été appliqué au programme MATLAB pour les simulé et ils évident qu'ils sont donne une bonne évolution des tensions et courants statoriques qui sont semblable à des résultats de la modèle en chapitre 2. Nous avons observé les résultats obtenus dans les expérimentaux pratiques des essais de la GADA. Dans ces essais nous sommes confidant avec les modélisations analytique et les méthodes des éléments finis car les évolutions des tensions et courants obtenus ont les mêmes formes d'ondes avec les essais par simulation.

Conclusion générale

Cette étude avait pour objectif l'étude de la modélisation de la GADA basé sur la méthode analytique et par la méthode des éléments finis. Les essais à vide, en charge équilibré, charge déséquilibré et tensions rotoriques déséquilibres ont été bien simulé. Les résultats des expériences pratiques sont cohérents avec les simulations. Les évolutions de tensions statoriques dans les simulations (modélisation avec méthode des éléments finis et méthode analytiques) ont les mêmes formes que celles observées dans les expériences pratiques. Les spectres des harmoniques observés dans les travaux pratiques par l'analyseur de qualité d'énergie montre que la machine était saine.

L'identification des paramètres de la machine était faite en fonctionner la machine en mode moteur. Les résultats identifiés ont été utilisés dans la simulation de modèle analytique pour les vérifier s'ils ne divergent pas avec ceux observés précédemment. La méthode de ralentissement est souhaitable pour l'identification des paramètres mécaniques graphiquement.

En vue de se rapprocher du modèle réel, nous proposons comme à la suite de ce travail d'exploiter et améliorer cette étude en tenant compte des essais pratiques avec des tensions rotoriques déséquilibres à basse fréquence et en introduisant diverses techniques pour faire varier la fréquence rotorique. Nous avons fait ce travail en boucle ouverte, mais nous encourageons le travail en boucle fermée avec des convertisseurs bidirectionnels pour bien étudier le système complet de GADA.

Annexe A

1. Le circuit électrique équivalent de bobinage, couplage entre rotor-stator et charge.

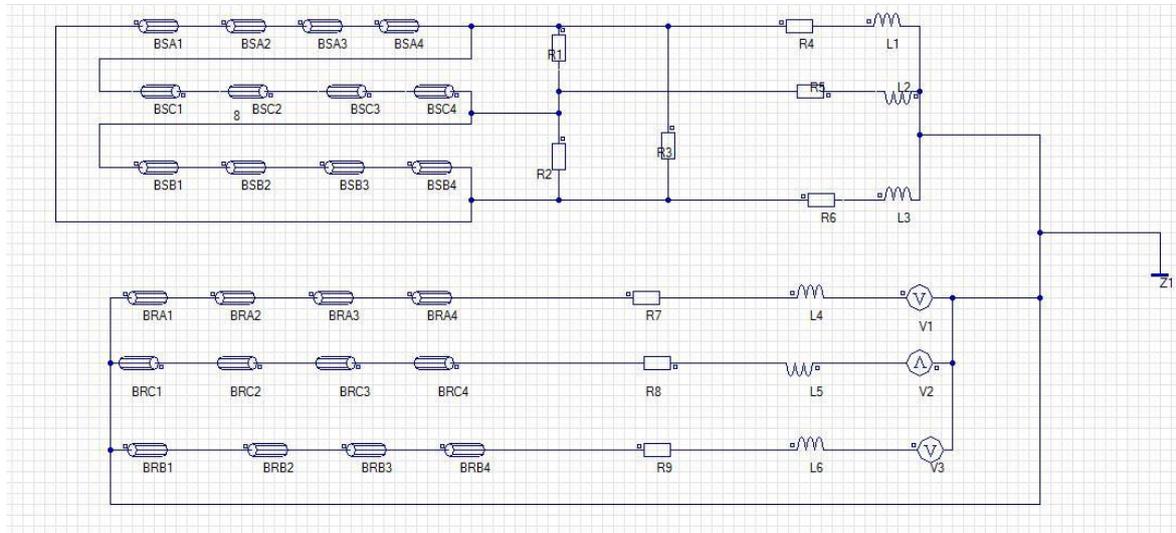
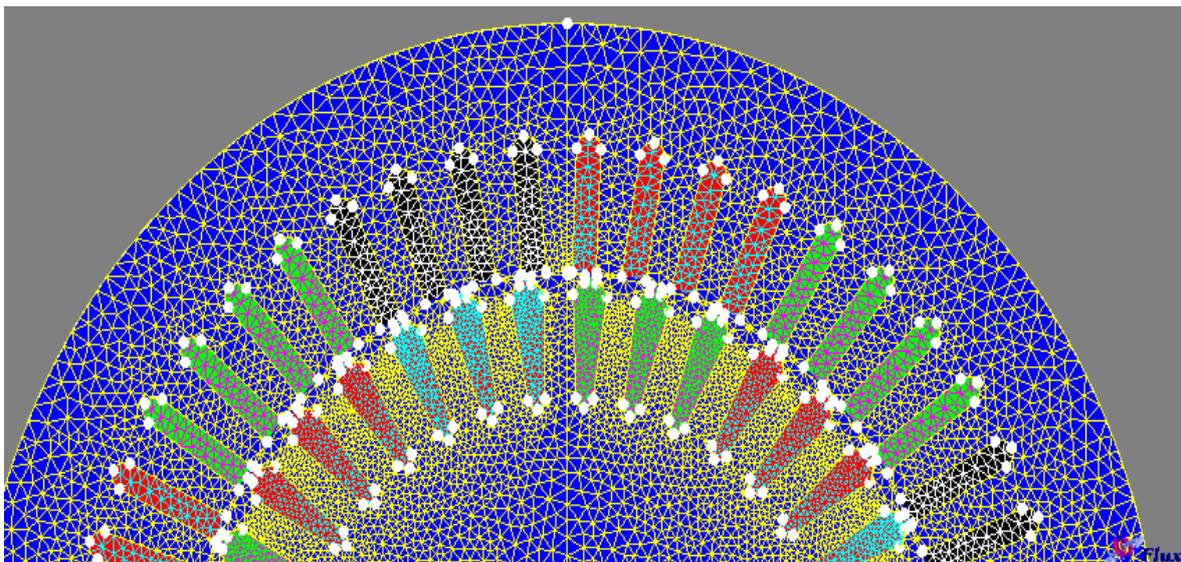
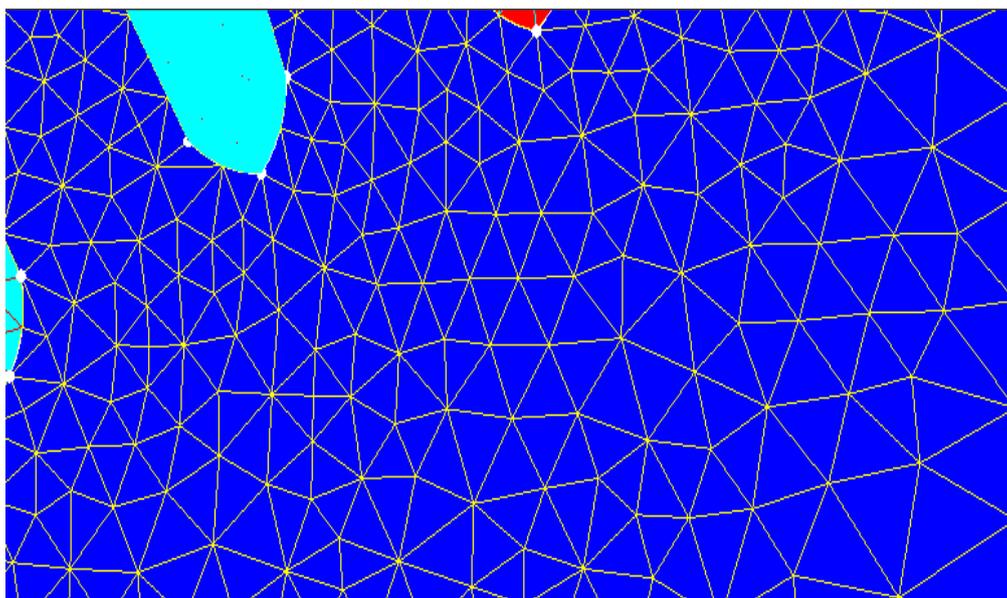


Figure A.1 : Circuit équivalent électrique de la GADA en charge

2. Le maillage triangulaire pour les simulations en deux dimensions utilisé dans le modèle de Flux 2D



(a)



(b)

Figure A.2 : (a) Maillage triangulaire du modèle simulé (b) Zoom de maillage

3. Les paramètres de la GADA en simulation en Flux 2D

Bobinage	Valeur	En mm
Nombre de phases	3	
Nombre de pôles	2	
Nombre de spires par bobine	54	
Nombre de spires par phase	272	
Dimensions Géométriques		
Longueur Axiale	5.7086 (pouces)	145
Diamètre d'alésage	6.25 (pouces)	158.75
Diamètre externe	9.75 (pouces)	247.65
Diamètre au fond d'encoche	0.9842 (pouces)	2.5
Ouverture d'encoche	0.1 (pouces)	2.54
Hauteur d'encoche	0.9717 (pouces)	24.68

Tableau A.1 : Description du stator de la machine

Bobinage	Valeur	En mm
Nombre de phases	3	
Nombre de pôles	2	
Nombre d'encoches	36	
Nombre de couches du bobinage imbrique	2	
Nombre de spires par bobine	18	
Nombre de spire par phase	216	
Dimensions géométriques		
Longueur axiale	2.362 (pouces)	60
Epaisseur d'entrefer	0.0173 (pouces)	0.44
Diamètre interne	2 (pouces)	50.8
Diamètre au fond d'encoche	4.3417 (pouces)	110.28
Ouverture d'encoche	0.1 (pouce)	2.54

Tableau A.2 : Description du rotor de la machine

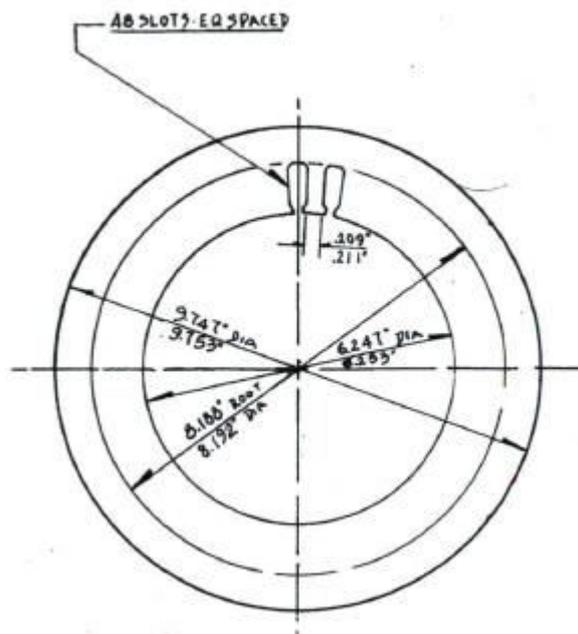


Figure A.3 : Plan original de stator

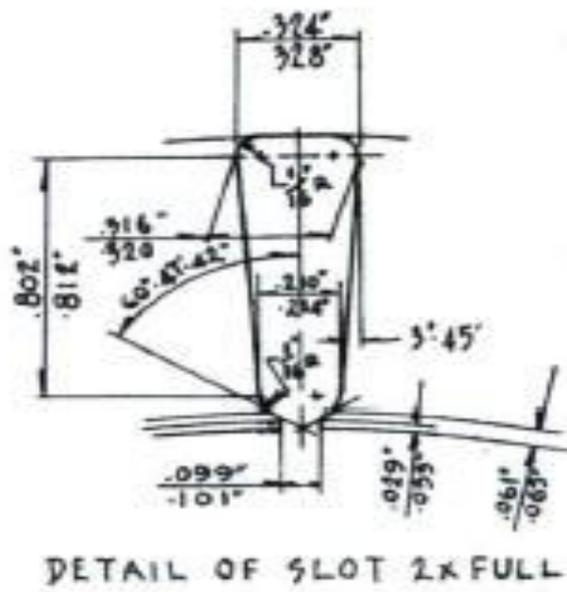


Figure A.4 : Plan original d'encoche statorique



Figure A.5 : Plan original d'encoche rotorique

Annexe B

1. Machine à courant continu

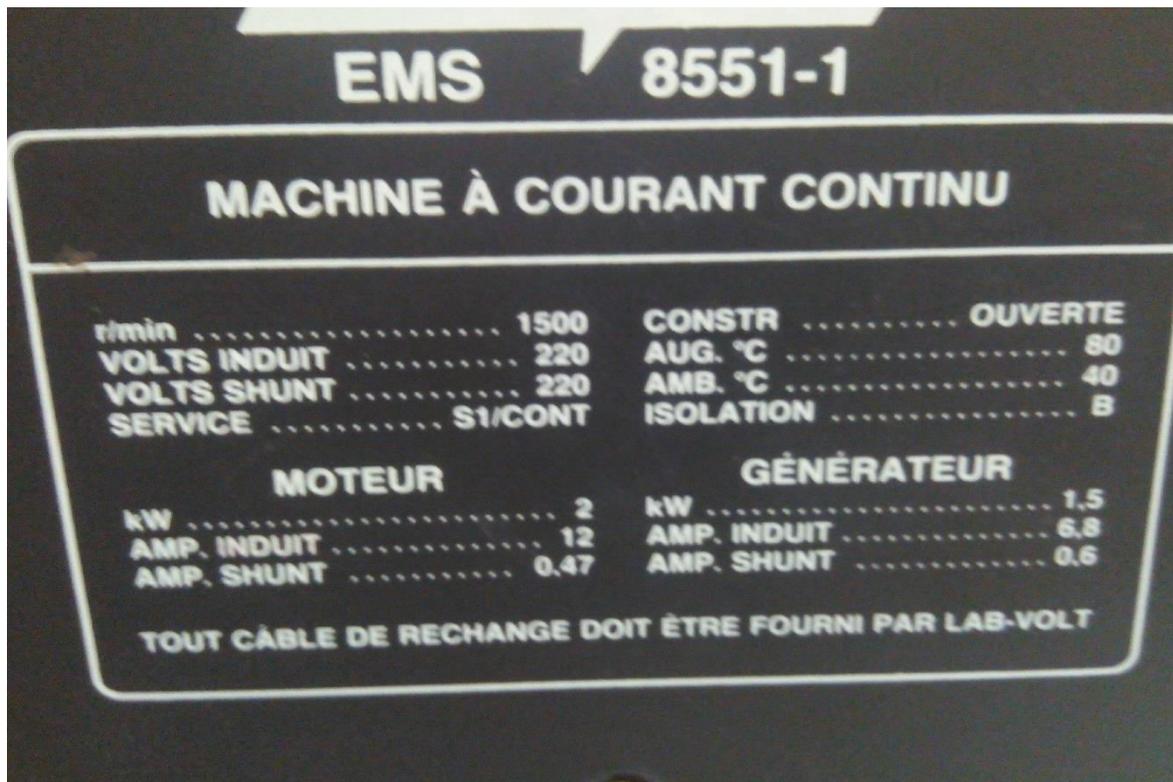


Figure B.1 : Plaque signalétique de MCC de laboratoire

2. Machine à Double Alimentation

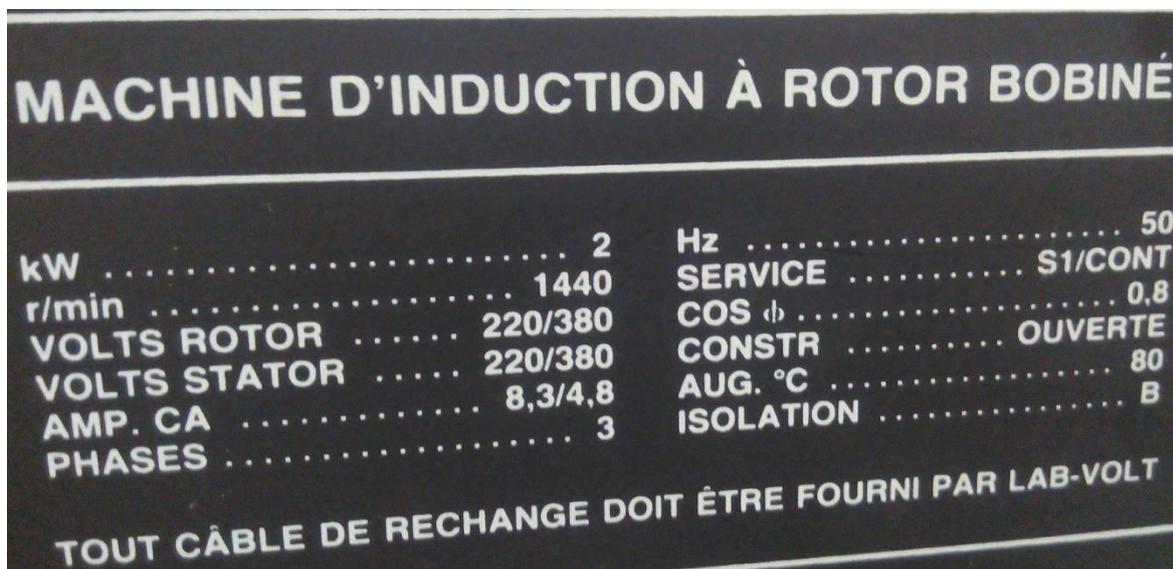


Figure B.2 : Plaque signalétique de la MADA de laboratoire

Bibliographie

- [1] <http://www.powertoday.in/News.aspx?nid=1Ht+JZoFeuUhm2QiBNo+tw>, date de consultation 09/04/2018
- [2] R. Abdessemed : Modélisation et Simulation de Machines Electriques, Collection Technosup, 2011
- [3] T. Wildi : Electrical Machines, Drives and Power Systems, 6^{ème} Edition, 2006
- [4] S.J. Chapman: Electric Machinery Fundamentals, 5^{ème} Edition, 2012
- [5] Labvolt: Principles of Doubly Fed Induction Generators (DFIG)
- [6] J. Fletcher, J Yang: Introduction to Doubly fed induction generator for wind applications, pages 259-260, Glasgow, United Kingdom
- [7] S. Dan: Clarke's and Park's Transformations, 2008
- [8] S. A Nasar: Electric Machines and Electro-mechanics, 2^{ème} Edition, 1997
- [9] K Hameyer, R Belmans: Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices, Volume 1, 1999
- [10] B. Szabo, I. Babuska: Introduction to Finite Element analysis; 1^{ère} Edition, 2011
- [11] I. Boldea, S. Nasar: The induction machine handbook, 2002
- [12] S. Khansaryan, V. Mortezapour et al.: Design and Simulation of a 2MW DFIG for Wind Turbine Applications, Iran Wind Conference, 9&10 October 2012, Iran
- [13] H. Dehnavifard: Development of a scaled Doubly Fed Induction Generator for Assessment of Wind Power Integration Issues, Thèse de doctorat, Univ. Cape Town, 2016
- [14] D. Aguglia : Conception globale des Generateurs Asynchrone à Double Alimentation pour éliennes, Thèse de doctorat, Québec, Canada, 2010
- [15] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcovà: Design of Rotating Electrical Machines, 1^{ère} Edition, 2008

- [16] X. Wang, T. D. Strous, D. Lahaye, H. Polinder, J. A. Ferreira: Finite Element Modelling of Brushless Doubly-Fed Induction Machine Based on Magneto-Static Simulation, Croatia
- [17] M.Hasnia, Z. Mancer, S. Mekhtoub, S Bachac: Parametric identification of the doubly fed induction machine, Algeria
- [18] M. P. Singh: PhD Synopsis on Parameter Estimation of Three Phase Induction Motor
- [19] M. Despalatovic, M. Jadric, B. Terzic: Identification of Induction Motor Parameters from Free Acceleration and Deceleration Tests, Hungary
- [20] R. Chergui : Identification des paramètres d'une machine asynchrone ; Thèse de magistre, Univ. Batna, Algeria, 2014