

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire



وزارة التعليم العالي والبحث 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

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machine électrique

Présenté par

M^{lle} Bentaiba Selma

Modélisation et diagnostic d'une GADA fonctionnant en régime déséquilibré

Proposé par : R. HACHELAF

Année universitaire 2019-2020

Remerciements

Le plus grand merci s'adresse au bon dieu

*Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus distingués
A notre promoteur **M R. HACHLAF** de nous avoir fait l'honneur
d'assurer l'encadrement de notre travail et pour la confiance qu'elle a
témoigné, pour sa disponibilité, ses efforts et ses encouragements.*

*En tient à remercier vivement les membres du jury d'avoir consacré de
leur temps à la lecture de ce manuscrit, d'accepter de juger et d'évaluer
ce travail.*

*Nous n'oublions pas dans nos remerciements tous les jeunes étudiants et
nos collègues qui durant ces années, ont entretenu une très bonne
ambiance et ont fait preuve de solidarité .Nous souhaitons aux eux du
succès dans leur recherches ainsi que dans leur vies professionnelles
Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce
travail, trouvent ici notre sincère reconnaissance.*

Selma

DEDICACES

*C'est avec une grande émotion,
Je dédie ce modeste travail
de fin d'étude ...*

À Mes CHERS PARENTS

*Aucune dédicace ne peut exprimer mon respect, mon amour éternel et ma
considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon
instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et
l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre
bénédiction m'accompagne toujours.*

*Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et
faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.*

A mes chers frères ABDENNOUR, IMADEDLINE et

MOHAMED

*Pour leur patience et leur soutien tout au long de cette période et mon
cher oncle ZAKARIA qui m'a aidé pour réaliser ce travail et tous les
membres de la famille Bentaiba et Aissa*

A mes très chères Amies, IHSSANE, MANEL ET CHAFIKA

A mes Camarades

Sans oublier tous mes professeurs.

Merci à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.



B. Selma



ملخص:

الغرض من هذه المذكرة هو تشخيص الأخطاء في المولد غير المتزامن للتغذية مزدوجة . الهدف الرئيسي هو حماية المولد وإطالة عمر المولد و كذا تحسين أدائه و كفاءته .في هذا السياق اقترحنا نهجا المحاكاة بطريقة العناصر المحدودة باستعمال تقنية التحليل الطيفي للتيار الثابت وهي الأكثر فعالية للكشف عن خطأ عدم التوازن

الكلمات المفتاحية : مولدات كهربائية غير متزامنة ذات تغذية مزدوجة ، التحليل الطيفي للتيار الثابت، عدم توازن ، التشخيص.

Résumé :

L'objectif de ce mémoire est le diagnostic des défauts de la génératrice asynchrones à double alimentation(GADA), Le but principal sera la protection de la génératrice , la prolongation de la durée de vie et l'amélioration de ses performances et son rendement. . Dans ce contexte, nous avons proposé une approche : la simulation par la méthode des éléments finis en utilisant la technique d'analyse spectrale des courant statorique (F F T). c'est une solution la plus efficace pour détecter le défaut de déséquilibre.

Mots clés : Analyse spectrale du courant statorique FFT ; Défaut de déséquilibre ; Diagnostic ; Génératrice asynchrones à double alimentation ;

Abstract :

The object of this work focuses on the diagnosis of the faults of the Dual Feed Asynchronous Generator (DFIG), the main object is to protect the generator, to extend the reliability life and improve its performance and efficiency. . In this context, we have proposed an approach: simulation by the finite element method which we use on the application of signal processing technique (spectral analysis of the stator current FFT) , it is a most efficient solution for detect the unbalance fault.

Keywords: Dual power asynchronous generator; Diagnostic ; lack of imbalance ; spectral analysis of the FFT stator current;

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

V	Vitesse
f_v	Frottement visqueux
$\Omega_m N_m$	Vitesse mécanique
$\Omega_s N_s$	Vitesse de rotation de synchronisme
m_r	Pulsation des courants rotorique
ω_s, ω_r	Pulsation statorique, pulsation rotorique
f_s, f_r	Fréquence statorique, fréquence rotorique
g	Glissement
P	Nombre de paire de pole

Tables des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I :	
I.1 Introduction	1
I.2 Machine asynchrone	4
I.2.1 Définition	4
I.2.2 Modes de fonctionnement	4
I.2.3 Constitution de la machine asynchrone	5
I.2.4 Principe de fonctionnement.....	7
I.2.5 Technologies pour les machines asynchrone	9
I.2.5.1 Machines avec un couple standard à rotor bloqué (NEMA design B)	9
I.2.5.2 Machines à couple de démarrage élevé (NEMA Design C).....	9
I.2.5.3 Machines à glissement élevé (NEMA Design D).....	9
I.2.6 Les avantages et les inconvénients de la MAS	9
I.3 Machine asynchrone à double alimentation	10
I.3.1 Structure de la machine	10
I.3.2 Modes de fonctionnement de la MADA	10
I.3.2.1 Hyper – synchrone ($g < 0$).....	11
I.3.2.2 synchrone ($g = 0$)	11
I.3.2.3 Hypo – synchrone ($0 < g < 1$).....	11
I.3.2.4 Stationnaire ($g = 1$).....	11
I.3.3 Types des machines à double alimentation.....	12
I.3.3.1 Machine à double alimentation en cascade.....	12
I.3.3.2 Machine à double alimentation sans balais.....	12
I.3.4 Domaines d’application de la MADA.....	13
I.4 Générateur Asynchrone	14
I.4.1 Définition.....	14
I.4.2 Types du générateur asynchrone.....	14
I.4.3 Principe defonctionnement de la GADA.....	15

1.4.4 Les avantages de GADA.....	16
1.4.5 composition de système GADA.....	16
1.4.6 Demarage de la GADA	17
1.5 Convertiseur bidirectionnel.....	18
1.6 Interconnexions au réseau	18
1.7Reduction des pertes magnétisantes	19
I.8Conclusion.....	20
Chapitre II :	
II.1 Introduction	22
II.2 Conception assisté par ordinateur CAO	22
II.2.1 Définition de CAO	22
II.2.2 Les approches de C.A.O	22
II.3 Les équations de Maxwell	23
II.3.1 Définition.....	23
II.3.2 Les équations	23
II.3.3 Les Conditions de continuité aux interfaces de séparation.....	24
II.3.4 Les lois de comportement des milieux.....	25
II.3.5 Modèle magnétostatique scalaire	27
II.3.6 Modèle magnétostatique vectoriel	27
II.3.7 Condition aux limites	29
II.3.7.1 Condition de Dirichlet	29
II.3.7.2 Condition de Neumann.....	30
II.3.8 Application des équations de Maxwell à la GADA	30
II.3.9 Les problématiques.....	31
II.3.9.1 Problème statique	31
II.3.9.2 Problème dynamique	32
II.4 Méthodes de résolution.....	33
II.4.1 Méthodes des éléments finis.....	34
II.5 Logiciel FLUX-2D.....	36
II.5.1 Introduction.....	36

II.5.2 Définition.....	37
II.5.3 La résolution d'un problème	37
II.5.3.1 Module préprocesseur	37
II.5.3.2 Module processeur	37
II.5.3.3 Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D).....	38
II.5.4 Avantages et les inconvénients de la MEF	38
II.6 Conclusion :.....	39
Chapitre III :	
III.1 Introduction	41
III.2 Structure du circuit magnétique de la machine	41
III.3 Phase de préparation	42
III.4 Structures des bobinages d'une GADA	43
III.5 Création des matériaux	44
III.6 Circuit électrique	45
III.7 Le maillage	45
III.8 Simulation du modèle par la méthode des éléments finis	47
III.9 Résultats de simulation de fonctionnement à vide	47
III.10 Interprétation des résultats	57
III.11 Transformée de Fourier rapide (FFT	57
III.11.1 Résultat de l'analyse spectrale par FFT	58
III.11.2 Interprétation de l'analyse spectrale	59
III.12 Conclusion	59
Conclusion generale	61
Annexes.....	63
Références bibliographiques.....	67

Liste des figures

Chapitre I :

Fig. I.1 : Aperçu d'une machine asynchrone.....	5
Fig. I.2 : Stator d'une machine asynchrone.....	6
Fig. I.3 : Rotor d'une machine asynchrone	6
Fig. I.4 : Principe du rotor bobiné.	10
Fig. I.5 : Modes et régimes de fonctionnement de MADA.....	11
Fig. I.6 : Machine à double alimentation dans une chaîne des systèmes éolienne.....	12
Fig. I.7 : Connexion de GADA au réseau en utilisant transformateur à 2 enroulements (A) Ou transformateurs à 3 enroulements (B).	13
Fig. I.8 : Configuration court-circuit.	17
Fig. I.9 : Configuration triangle - étoile.	18
Fig. I.10 : Principe de MADA en cascade.....	19
Fig. I.11 : Principe de machine à double alimentation sans balais.....	19

Chapitre II :

Fig. II.1 : Interface entre deux milieux.....	25
Fig. II.2 : Eléments classiques en une et deux dimensions	36
Fig. II.3 : Organisation du logiciel.	38
Fig. II.4 : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D	40

Chapitre III :

Fig. III.1 : structure du circuit magnétique et caractérisation de la géométrie de la GADA....	43
Fig. III.2 : (A) Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique, (B) Zoom région	44
Fig. III.3 : Bobinage triphasé représenté deux pas polaires.	45
Fig. III.4 : Répartition du bobinage statorique.	46
Fig. III.5 : Représentation du circuit électrique.	47
Fig. III.6 : Répartition de maillage dans l'entrefer	48
Fig. III.7 : Le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.....	48
Fig. III.8 : Répartition des lignes Equiflux/ L'induction magnétique	49

Fig. III.9 : Evolution de composant normale d'induction de la machine.....	50
Fig. III.10 : Evolution de composant normale tangentielle d'induction.	50
Fig. III.11 : Evolution de tension statorique.....	51
Fig. III.12 : Evolution de tension statorique.....	51
Fig. III.13 : Zoom d'évolution des tensions statoriques.....	52
Fig. III.14 : Vitesse de rotation de la machine à 1500tr/min.....	52
Fig. III.15 : Evolution de tension statorique.....	53
Fig. III.16 : Vitesse mécanique de rotor 500tr/min.	53
Fig. III.17 : a) Evolution des tensions statoriques ; b) Zoom d'évolution des tensions statoriques.....	54
Fig. III.18 : a) Evolution de courants ; b) Evolution de courants juxtaposé	55
Fig. III.19 : Evolution des tensions statoriques.....	55
Fig. III.20 : a) Evolution de courants statoriques ; b) Zoom d'évolution des courants statoriques.....	56
Fig. III.21 : Evolution de courants et de tension statoriques.....	57
Fig. III.22 : Evolution de courants et de tension statoriques	58
Fig. III.23 : Principe de la Transformée de Fourier	60
Figure III.24. Les spectres du courant statorique à vide avec tension équilibré.....	60
Figure III.25. Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré.....	61

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 : Avantages et les inconvénients de la MAS..... 9

Chapitre II :

Tableau II.1 : Les avantages et les inconvénients de la Méthode des différences finis. 34

Tableau II.2 : Les avantages et les inconvénients de la MEF. 40

Chapitre III :

Tableau III.1 : Caractéristiques B(H) du matériau magnétique.....46

Introduction générale :


Les machines électriques sont l'élément le plus important dans l'industrie à savoir la production et les entraînements électriques. La machine asynchrone est la plus simple à fabriquer, la moins coûteuse et la moins exigeante en termes d'entretien, elle est fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances,

Actuellement la machine asynchrone est de plus en plus utilisée pour effectuer la variation de vitesse ou du positionnement. La plupart des équipements industriels sont à base sur cette machines comme l'aéronautique, le nucléaire, les industries pétroliers, chimiques, dans le transport (métro, trains, propulsion de véhicule et des navires, les ascenseurs), dans l'industrie (machines outils, treuils) et dans l'électroménager. Dans les machines électriques peuvent être trouvées deux modes de fonctionnement sont le moteur qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique et le générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Malgré toutes ces avantages, les machines asynchrones restent sensibles à des multiples perturbations de l'environnement aux quelles elles sont soumises.

Les défauts dans les générateurs asynchrone peuvent être d'origine mécanique (excentricités du rotor, défaut sur les accouplements, corrosion des roulements,...), électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barres rotoriques ou d'anneau,...). C'est pour cette raison que la surveillance des machines est importante dans le monde industriel, cette dernière englobe la détection et le diagnostic des défaillances. Le diagnostic de défauts à pour rôle la localisation (déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification de ce défaut (quantification du défaut).

Dans ce contexte, on a abordé le sujet de 'modélisation et diagnostic d'une GADA fonctionnement en régime déséquilibre'. Notre travail s'intéresse à la détection de défauts de déséquilibre. Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré aux démarches classiques d'analyse les principaux éléments constitution la machine asynchrone, son principe de fonctionnement et une étude statique qui présente les défauts qui peuvent se produire.

Ainsi nous avons présenté la GADA, son principe de fonctionnement, classification, comparaison entre la différente variante, régime de fonctionnement et transfert de puissance. Dans le deuxième chapitre, on a présenté la modélisation analytique de la GADA pour la résolution des équations des champs électromagnétique. On à passe par conception assisté par ordinateur CAO, En suite, on a cité les modèles mathématiques des équations de Maxwell, même la méthode des éléments finis est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell, et on a terminé par le logiciel Flux 2D. Dans le troisième et le dernier chapitre, nous avons étudiés la GADA dans les deux cas de fonctionnement : à vide et en charge et dans le mode normale (sans défaut) et en mode déséquilibré. A la fin une conclusion générale ou on à présenté une synthèse des résultats obtenus.



Chapitre I :

Généralités sur

les machines

asynchrones

I.1 Introduction :

La machine asynchrone est la plus commune de toutes les machines électriques. 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 [3].

I.2 Machine asynchrone :

I.2.1 Définition :

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. Il existe en effet théoriquement d'autres types de machines asynchrones. La machine asynchrone est une machine à induction dont le circuit magnétique est associé à deux, ou plus de deux, circuits électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique. Cependant, la seule machine asynchrone qui ait une importance pratique est la machine à induction [1]. Production d'énergie électrique à la concurrence et met fin à son monopole. En 2003, elle produisait 29 milliards de kilowattheures par an, vendait 4,6 milliards de mètres cubes de gaz par an. En 2006, elle employait environ 28 000 personnes. En 2010, on parle de Groupe Sonelgaz [10].

I.2.2 Modes de fonctionnement :

Dans les machines électriques peuvent être trouvées en deux modes de fonctionnement :

- a) **Générateurs** : qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.
- b) **Moteurs** : qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique [29].

I.2.3 Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone souvent appelée machine à induction, on peut la découper à seize (16) blocs différents, les seize blocs sont montrés dans la figure suivante :

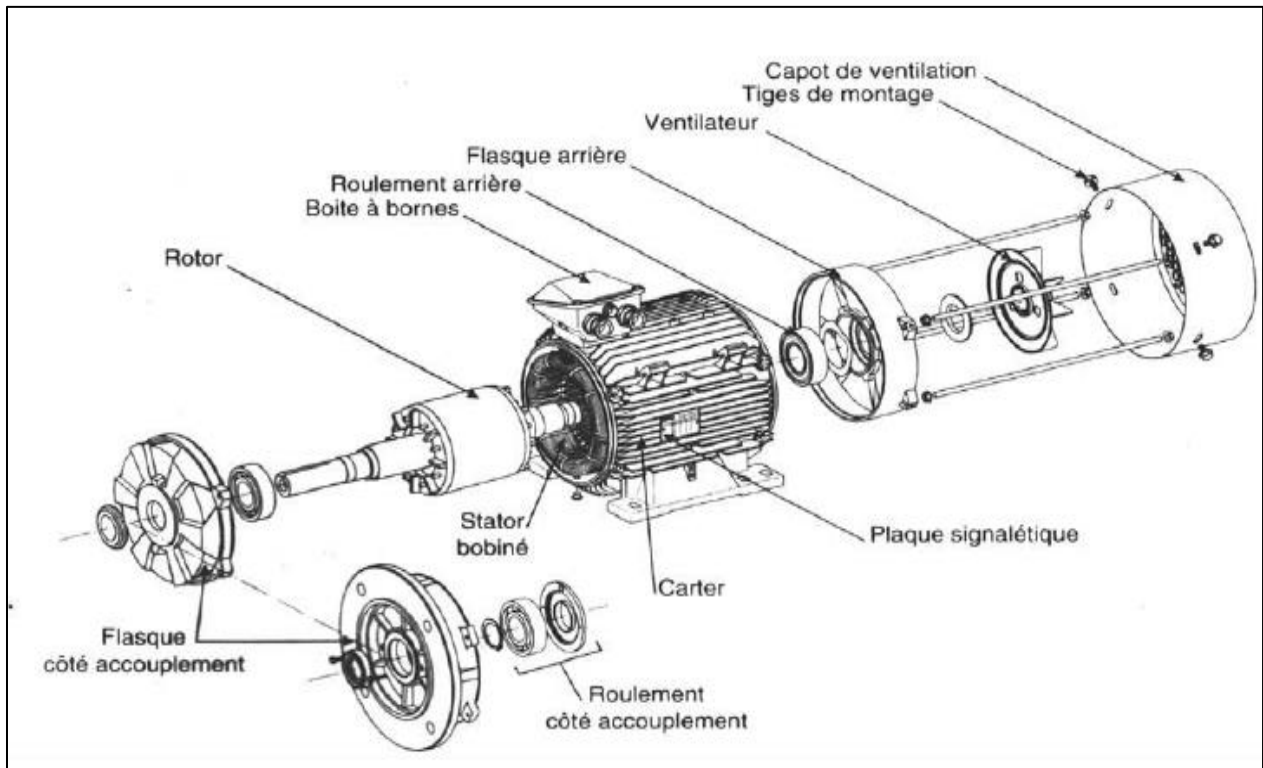


Figure I.1 : Aperçu d'une machine asynchrone [2].

Et elle comporte deux (02) parties essentielles, l'une fixe appelée stator portant un bobinage triphasé logé dans les encoches et relié à la source d'alimentation et l'autre mobile (ou rotor), qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil. Ces deux parties soit coaxiales et séparées par un entrefer, on considère le cas d'une machine asynchrone à rotor bobiné (Figure I.3).

❖ Le stator :

La partie immobile appelée le stator comporte en fait un circuit magnétique totalement feuilleté en forme de couronne dont les périphériques interne est entaille régulièrement d'un certains nombres d'encoches similaires .dans ces encoches arrivent s'arranger les conducteurs des enroulements statoriques identiques correctement disposés la long d'un entrefer de telle que leurs axes forment des angles de 120'entre eux [2].



Figure I.2 : Stator d'une machine asynchrone [31].

❖ Le rotor :

C'est l'élément mobile du moteur. Se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,25 à 2 mm, Il existe : le rotor à cage d'écureuil [1].

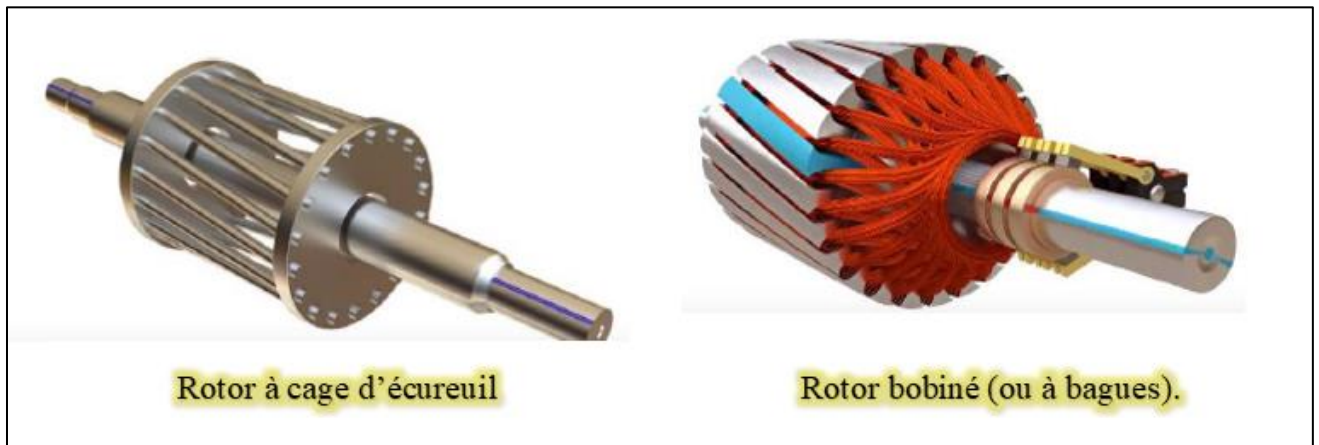


Figure I.3: Rotor d'une machine asynchrone [32].

I.2.4 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 changée en couple comme sortie [3] [4].

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 , $N_r < N_{cync}$. 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 induite dans ce dernier (loi de Faraday). La fréquence de cette 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 [5].

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 rotoriques. 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 constant [6].

❖ **Le concept et le glissement :**

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_c 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 [3][6].

$$g = (N_s - N) / N = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s \quad (1.1)$$

Avec

$$\Omega_s = 2\pi N_s \quad (1.2)$$

La vitesse mécanique peut être exprimée comme :

$$N = (1 - g) N_s \quad (1.3)$$

La vitesse du champ tournant par rapport au rotor est $\Omega_c - \Omega_N$ et la pulsation m_r des courants rotoriques est alors :

$$m_r = e(\Omega_c - \Omega_N) \quad (1.4)$$

Soit $m_r = g * m_c$, Le courant rotorique de pulsation m_r crée une tension magnétique tournante d'entrefer dont la vitesse par rapport au rotor est : $\Omega = \omega_p$

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 la vitesse synchrone et la vitesse du rotor. En effet, les courants du stator, ω_r , voient le champ magnétique tournant généré par le stator pulsé à $m_c - m_r$. Cela signifie la fréquence des courants de rotor, f_r est :

$$f_r = g * f_c \quad (1.6)$$

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.

I.2.5 Technologies pour les machines asynchrone :

I.2.5.1 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].

I.2.5.2 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 [5].

I.2.5.3 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 [5].

I.2.6 Les avantages et les inconvénients de la MAS :

Avantages :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none">• Structure simple.• Robuste et facile à construire• Utilisé dans la puissance moyenne et élevés• Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence	<ul style="list-style-type: none">• 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

Tableau I.1 : Avantages et Inconvénients de la MAS [29].

I.3 Machine asynchrone à double alimentation :

I.3.1 Structure de la machine :

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques [29].

On peut voir sur la figure I.4 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais, bagues, collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor.

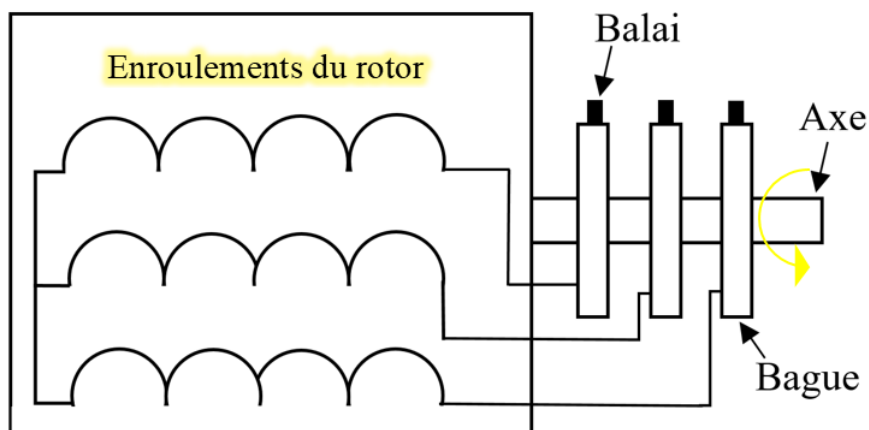


Figure I.4 : Principe du rotor bobiné.

I.3.2 Modes de fonctionnement de la MADA :

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude. Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [29].

I.3.2.1 Hyper – synchrone ($g < 0$) :

Par d'avantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations (1.9) et (1.10). Cette valeur négative signifie que l'ordre de succession de phase du rotor «*ar, br, cr*» s'inverse.

L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mené à une augmentation de la tension induite du rotor [4].

I.3.2.2 synchrone ($g = 0$) :

Lorsque la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas, le rotor tourne 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 rotoriques [4].

I.3.2.3 Hypo – synchrone ($0 < g < 1$) :

En tournant le rotor dans la direction du flux statorique, la fréquence f_r du rotor va commencer à décroître. Plus la vitesse du rotor s'approche de celle de synchronisme, plus f_r tend vers 0, de même la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible pour une vitesse du synchronisme [4].

I.3.2.4 Stationnaire ($g = 1$) :

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s . Le circuit rotorique est siège d'une force électromotrice induite avec une fréquence f_r identique à f_s . Dans ce cas, la MADA se comporte simplement comme un transformateur [4].

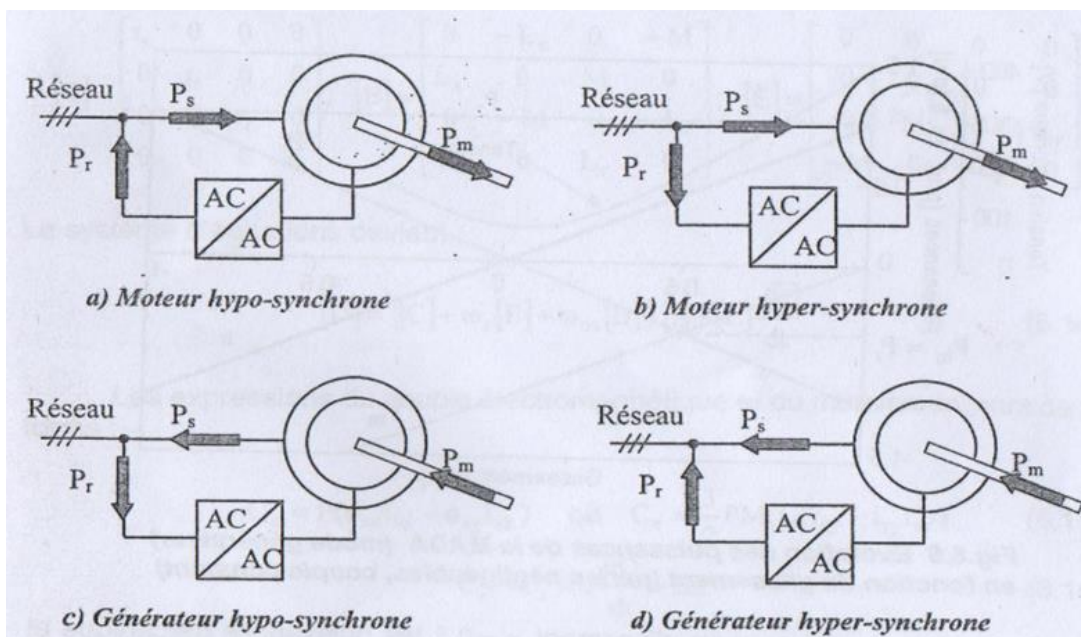


Figure I.5 : Modes et régimes de fonctionnement de MADA [4].

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

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

$$P_N = -(1 - g)P \quad (1.15)$$

Quand la machine fonctionne en mode génératrice, en supposant qu'elle est 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 [10].

I.3.3 Types des machines à double alimentation :

I.3.3.1 Machine 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 [2].

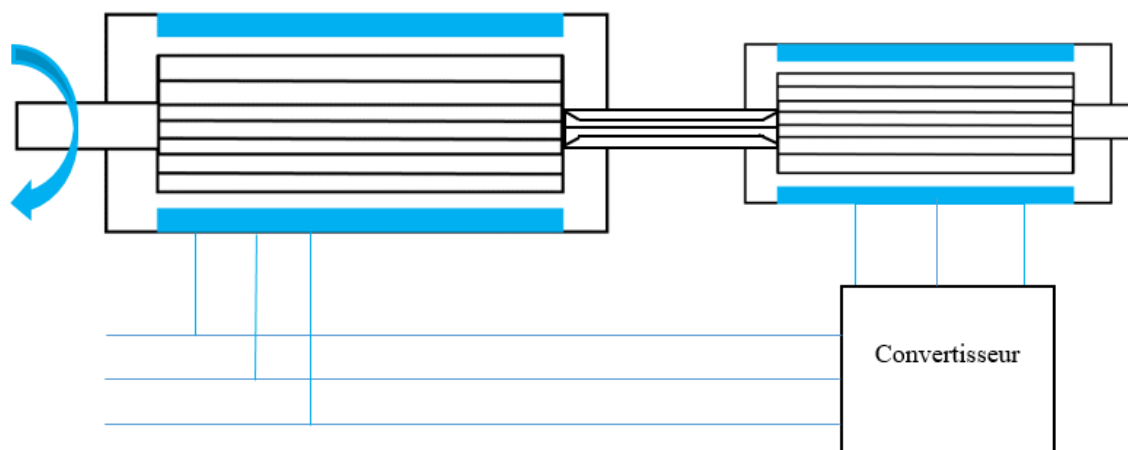


Figure I.6 : Principe de MADA en cascade [10].

I.3.3.2 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 [10].

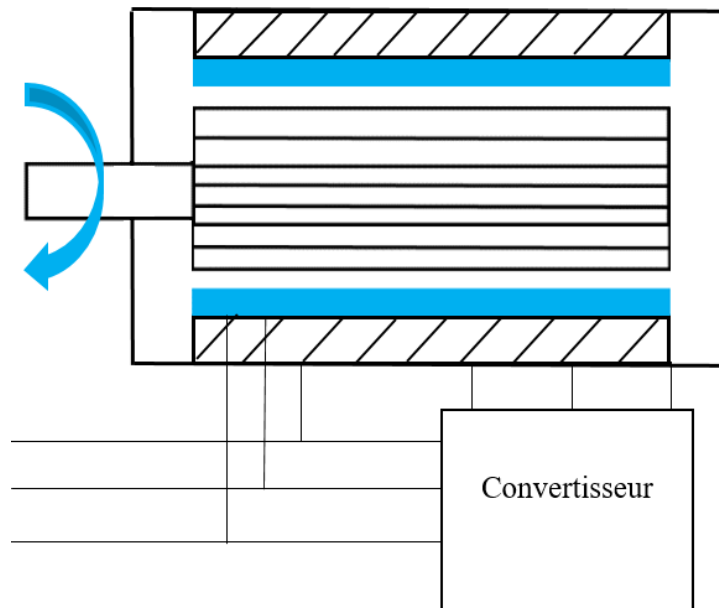


Figure I.7 : Principe de machine à double alimentation sans balais [10].

I.3.4 Domaines d'application de la MADA :

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [11].

De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tel que :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables ;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant [5].

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, tel que:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.[6]
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage [5].

I.4 Générateur Asynchrone :

I.4.1 Définition :

La génératrice asynchrone est une machine à induction asynchrone qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Pour réaliser cette transformation elle doit pour cela être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (variable suivant la charge). Son rotor est généralement à cage d'écureuil ; elle bénéficie donc de la robuste simplicité du moteur à cage et des mêmes moyens de fabrication.

La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée [31].

I.4.2 Types du générateur asynchrone :

I.4.2.1 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 [7].

I.4.2.2 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 [7].

I.4.3 Principe de fonctionnement de la GADA:

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 .

$$m_c = 2\pi f_s$$

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, m_r , peuvent défini comme :

$$m_r = e^* m_N$$

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

$$g = \frac{W_c - W_r}{W_c}$$

Normalement, le glissement est négatif pour le marché en génératrice. Les courants induits dans les enroulements de rotor pulsent à une vitesse angulaire déterminée par la différence entre le synchrone

la vitesse et la vitesse du rotor. En effet, les courants du stator, ω_r , voient le champ magnétique tournant créé par le stator pulsé à $m_c - m_r$. Cela signifie la fréquence des courants de rotor, f_r est

$$f_r = g * f_c \quad (1.6)$$

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 (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 [2].

1.4.4 Les avantages de la 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 [9].

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 [9].

1.4.5 Composition de système 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 I.6 [2].

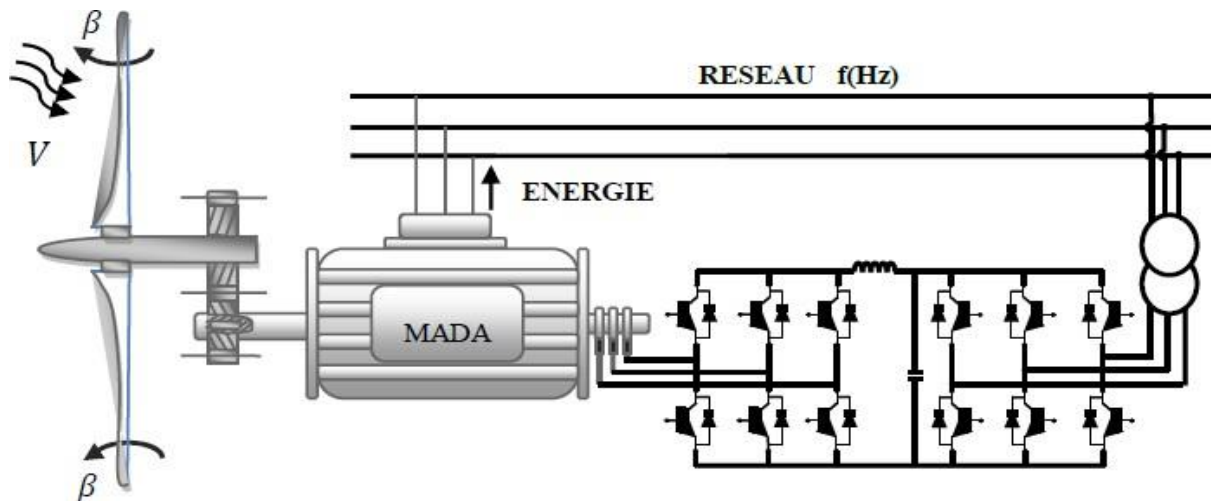


Figure I.8 : Machine à double alimentation dans une chaîne des systèmes éolienne [2].

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 [2].

I.4.6 Démarrage de la GADA :

Celui-ci est habituellement assuré par la machine d'entraînement : aussi dans leur grande généralité, les génératrices asynchrones sont des machines à cage.

Il est toutefois possible, dans certains cas particuliers, de les utiliser momentanément en moteurs pour assurer ou faciliter le lancement du groupe générateur ; dans ce cas l'insertion temporaire de résistances en série avec la machine permet de limiter l'appel de courant tout en assurant un couple réduit mais suffisant pour un démarrage à vide. Ces mêmes résistances seront d'ailleurs normalement utilisées, même lorsque le démarrage est effectué par la seule machine d'entraînement, pour faciliter le couplage sur le réseau en réduisant la pointe due à la magnétisation [11].

I.5 Convertisseur bidirectionnel :

Les convertisseurs qui sont connectés entre le rotor et le stator de la machine sont généralement convertisseurs de source de tension bidirectionnelle, cependant un convertisseur matriciel pourrait être utilisé alternativement. Les avantages par rapport à la machine connectée sont que l'évaluation du convertisseur est réduite 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 :

$$|v_r| = g|v_c| \quad (1.12)$$

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 [2].

I.6 Interconnexions au réseau:

Le GADA est connecté au réseau de niveau moyen tension (MT) par un transformateur élévateur. Puisque le convertisseur côté réseau a besoin d'ajouter un transformateur additionnelle 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 I.7) [2].

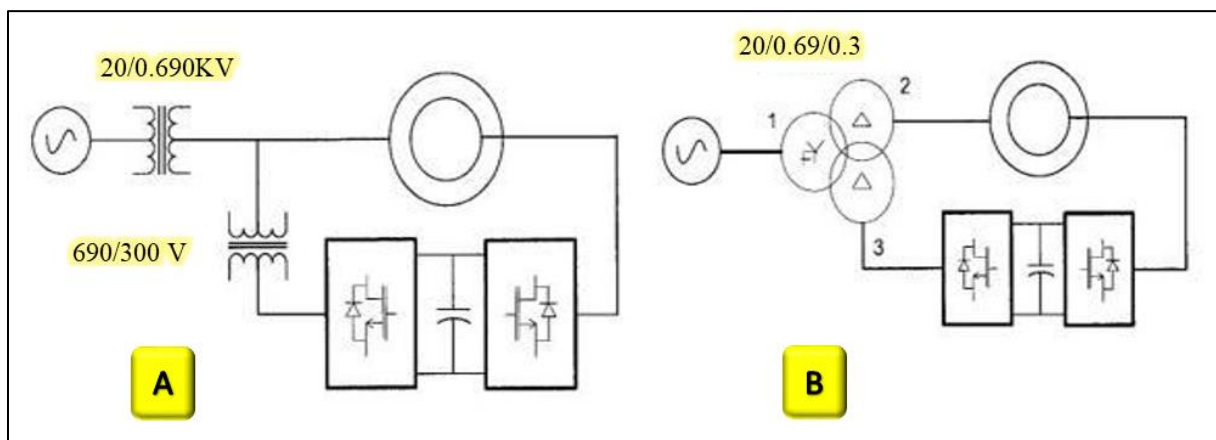


Figure I.9 : Connexion de GADA au réseau en utilisant transformateur à 2 enroulements (A)

ou transformateurs à 3 enroulements (B) [2].

I.7 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 [10].

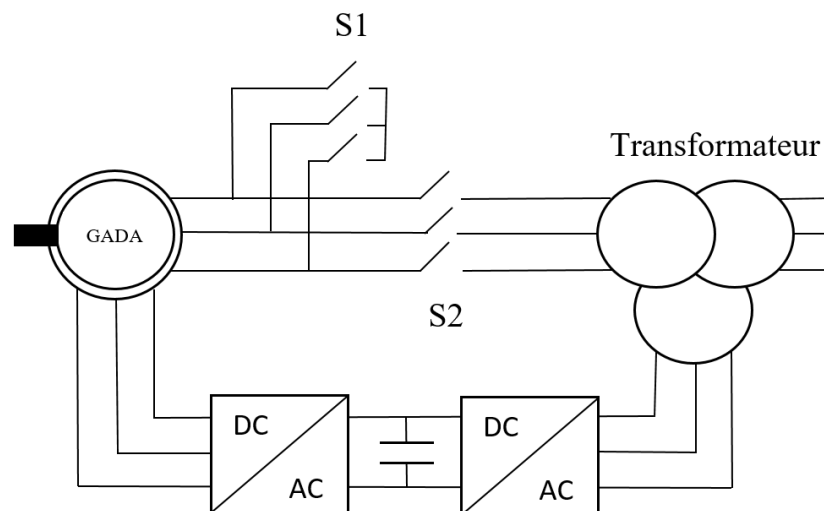


Figure I.10 : Configuration Court-circuit [10].

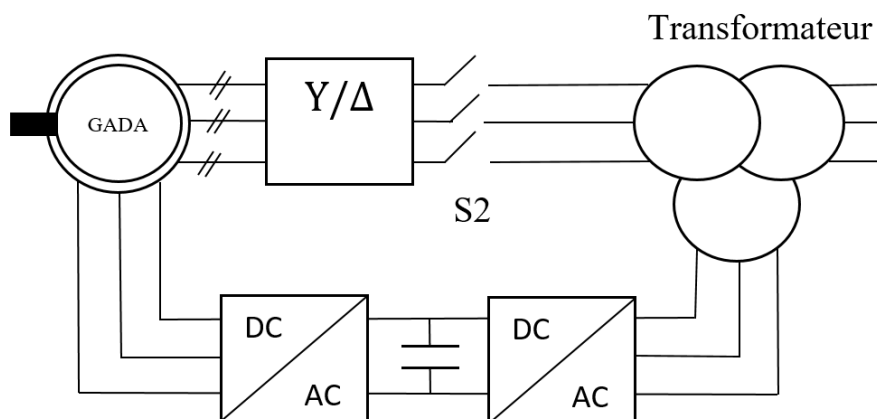


Figure I.11 : Configuration triangle-étoile [10].

I.8 Conclusion :

Nous avons vu une introduction sur les machines asynchrones qui présentent les différentes technologies, constitution simple de la machine asynchrone et le principe de fonctionnement. Tant que La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur.



Chapitre II :

Modélisation de

la GADA

II.1 Introduction :

La modélisation de la machine asynchrone 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 ce chapitre, nous nous intéressons, alors, à l'élaboration d'un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition de la GADA, basée sur la méthode des éléments finis.

II.2 Conception assisté par ordinateur CAO :

II.2.1 Définition de CAO :

Le terme de « Conception Assistée par Ordinateur » ou bien la CAO est aujourd'hui utilisée à tort et à travers, ce qui lui vaut de perdre de sa signification. Pour des personnes, cette appellation couvre l'ensemble des tâches qu'un ordinateur est capable d'assumer lors du développement de produits techniques, les spécialistes utilisent plutôt le vocabulaire de « X » assistée par ordinateur (XAO), où « X » peut être remplacé par « dessin », « fabrication », « conception ». D'autre part, il est naïf de croire que l'emploi des moyens de CAO n'est justifié que lors du calcul des circuits électroniques intégrés, avant de dissenter sur les différentes possibilités de CAO dans le domaine des machines électriques. [14]

II.2.2 Les approche de C.A.O :

- Réduction des temps et délais de conception des nouveaux produits donc réduction des couts de conception.
- Redéfinir les méthodes conventionnelles de conception.
- Possibilité de simuler et de tester facilement les nouveaux systèmes avant leur construction.
- Possibilités d'études et de tester un plus grand nombre de prototypes avec des géométries déférentes et complexes [29].

Alors comme effets positifs. Ces outils permettront aux concepteurs des systèmes de faire preuve de plus innovation et de créativité par la proposition de topologies nouvelles plus

performantes que seuls des calculs tridimensionnels peuvent dimensionner entrainement et correctement.

II.3 Les équations de Maxwell :

II.3.1 Définition :

Les équations de Maxwell sont la formulation mathématique Complete qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs .ces équations sont généralement interdépendantes de faite que les phénomènes magnétiques et électriques sont couplés [2].

II.3.2 Les équations :

II.3.2.1 Equation de Maxwell-Faraday :

Le champ électrique induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques. Un aimant permanent en rotation qui crée un champ magnétique en mouvement, génère un champ électrique dans un fil à proximité [15].

$$\mathit{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

II.3.2.2 Equation de Maxwell-Ampère :

Les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières : par la variation d'un champ électrique ou par les courants électriques [15].

$$\mathit{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

II.3.2.3 Equation de conservation de flux magnétique :

$$\mathit{div} \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

II.3.2.4 Equation de Maxwell-Gauss :

Un champ électrique est généré par des charges électriques. Le champ électrique est orienté à partir des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi relie le flux électrique à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée [13].

$$\mathit{div} \vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

Avec :

• \vec{E} (V. m⁻¹) : Champ électrique.

- B (T) : Induction magnétique.
- \vec{H} (A. m⁻¹) : Champ magnétique.
- \vec{J} (A. m⁻²) : Densité de courant.
- \vec{D} (C. m⁻²) : Induction électrique.
- ρ (C. m⁻³) : Charge volumique.
- $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ (A. m⁻²) : Densité de courant de déplacement.

Ces équations s'appliquent quel que soit le milieu.

- ❖ Ce sont des équations locales : elles établissent des relations entre des valeurs locales (ponctuelles) des grandeurs et de leurs dérivées.
- ❖ Les distributions de ρ et J sont des distributions réelles et sont supposées connues.
- ❖ Les grandeurs **E et D , H et B , J et E** ne sont pas (respectivement) indépendantes entre elles car elles sont liées par les lois de comportement des milieux, appelées aussi relations constitutives [16].

Ces lois, caractéristiques du milieu considéré, traduisent la réponse de la matière aux champs électromagnétiques. Elles sont données par l'expérience et ne sont que des approximations. Des relations supplémentaires doivent venir compléter les équations de Maxwell en fonction des propriétés spécifiques des milieux auxquels on les appliquera. De telles relations sont appelées équations **constitutives**, qui dans le cas général s'écrivent sous la forme suivante :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (2.5)$$

Avec :

- $\mu = \mu_0 \mu_r$
- \vec{M} (A/m) : L'aimantation des aimants.
- μ_0 (H. m⁻¹) : Perméabilité magnétique du vide.
- μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu.
- μ (H. m⁻¹) : Perméabilité magnétique absolue [18].

II.3.3 Les Conditions de continuité aux interfaces de séparation :

Sur une limite de séparation de deux milieux différents notés 1 et 2, on peut trouver des conditions de continuité du type :

- Conservation de la composante normale de l'induction magnétique.

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.6)$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique H , si les courants surfaciques j_s existent.

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \wedge \vec{n} = \vec{j}_s \quad (2.7)$$

- Conservation de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E}

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = \vec{0} \quad (2.8)$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique \vec{D} , si les charges surfaciques ρ_s existent.

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (2.9)$$

Ici \vec{n} est le vecteur normal à l'interface dirigé du milieu 1 vers le milieu 2, \vec{j}_s est la densité surfacique de courant libre à l'interface et ρ_s est la densité surfacique de charge libre à l'interface.

- Ces relations fournissent les lois de réfraction des champs lors du passage d'un milieu à un autre.

- On peut les établir par le calcul en combinant les théorèmes d'analyse vectorielle et les équations de Maxwell aux interfaces.

Il est important de bien garder à l'esprit ces relations, ainsi que les lois globales (théorèmes généraux) énoncées plus haut. On les utilisera pour prédéterminer l'allure des lignes de champ, imposé éventuellement des conditions aux limites, ainsi que pour vérifier les résultats des calculs [16].

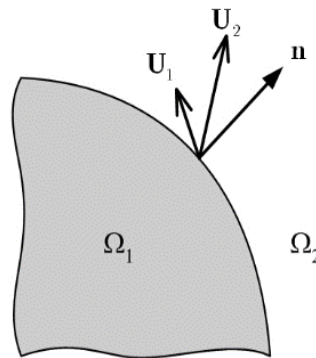


Figure II.1 : Interface entre deux milieux [29].

II.3.4 Les lois de comportement des milieux :

II.3.4.1 Le cas du vide :

$$\vec{B} = \mu_0 * \vec{H} \quad (2.10)$$

II.3.4.2 Les milieux conducteurs : la loi d'ohm :

On appelle conducteur tout milieu possédant des charges électriques capables de se déplacer à l'échelle macroscopique sous l'effet d'un champ électrique [16]. Quand un tel milieu est soumis à un champ électrique, les charges électriques (électrons libres dans les métaux) se mettent en mouvement, créant un courant électrique. Dans les milieux homogènes et isotropes, on admet

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.11)$$

Un conducteur parfait est un milieu fictif tel que $\sigma \rightarrow \infty$. Dans un tel conducteur, \vec{E} est nul. A l'inverse, un isolant parfait est un milieu dans lequel la conductivité électrique est nulle :

$$\sigma = 0. \quad (2.12)$$

L'expression locale de la loi d'ohm est donnée comme suit :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{eddy} \quad (2.13)$$

$$\vec{J}_{eddy} = \sigma \vec{E} \quad (2.14)$$

- σ (S. m⁻¹) : Conductivité électrique.
- \vec{J}_s (A. m⁻¹) : Densité de courant provenant des enroulements d'alimentation.
- \vec{J}_{eddy} (A. m⁻¹) : Densité de courant de Foucault.

II.3.4.3 Comportement magnétique des matériaux.

Sous l'effet d'un champ magnétique, la matière s'aimante. Quel que soit le milieu, on écrit par définition (dans le système M.S.K.A) :

$$\vec{B} = \mu^* \vec{H} + \mu_0^* \vec{M} \quad (2.5)$$

\vec{M} : est la vectrice intensité d'aimantation (A/m).

II.3.4.4 Comportement diélectrique des matériaux :

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (2.15)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r$$

- ϵ_0 (F. m⁻¹) : Permittivité électrique du vide.
- ϵ_r : Permittivité électrique relative du milieu.
- ϵ (F. m⁻¹) : Permittivité électrique absolue.

$$\bullet \mu_0 = 4\pi * 10^{-7} (H/m)$$

$$\text{Et} \quad \epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot c^2 = 1 \quad (2.16)$$

C : est la vitesse de la lumière dans le vide, soit $C = 3 * 10^8 (m/s)$

$$\text{Donc :} \quad \epsilon_0 \approx \frac{1}{36 * \pi * 10^{-9}} (Fm) \quad (2.17)$$

II.3.5 Modèle magnétostatique scalaire :

Dans ce modèle, on suppose que les courants électriques sont nuls dans la pièce à étudier et que les champs ne dépendent pas du temps. On s'intéresse aux grandeurs \vec{H} et on obtient alors les équations de Maxwell qui se réduisent à :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (2.18)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

C'est le cas des dispositifs pour lesquels les champs sont créés par des forces magnétomotrices extérieures et indépendantes du dispositif étudié ou bien par des aimants permanents. Dans ce dernier cas, on dispose de la loi :

$$\vec{B} = \mu^* \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (2.5)$$

Dans le cas où la densité de courant surfacique est nulle, la relation (Eq 2.18) implique qu'il existe une fonction potentiel scalaire magnétique φ telle que :

$$\vec{H} = -\text{grad} \varphi \quad (2.19)$$

On obtient donc l'équation :

$$(\mu \text{grad} \varphi) = \text{div} \vec{B} \quad (2.20)$$

II.3.6 Modèle magnétostatique vectoriel :

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps.

Le terme $\partial \vec{B} / \partial t$ est alors nul et les champs électriques \vec{E} et magnétique \vec{B} sont découplés. Par contre, on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls. On obtient alors les équations suivantes :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (2.18)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\vec{B} = \mu^* \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (2.5)$$

La condition (Eq 2.24) permet de définir une fonction potentiel vecteur magnétique \vec{A} telle que :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (2.19)$$

Pour que A soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (2.20)$$

Qui est la plus simple à mettre en œuvre. Mais cette condition, appelée jauge de Coulomb, n'est pas toujours la meilleure et peut être adaptée afin d'éviter quelques difficultés numériques auxquelles elle peut conduire. On obtient donc l'équation vectorielle de Poisson :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ext} \quad (2.21)$$

Pour simplifier, nous allons nous restreindre pour cette étude au cas bidimensionnel. Ainsi, les systèmes considérés, possèdent une symétrie par translation suivant la troisième dimension ou une symétrie d'axe de révolution.

Dans les deux cas, la direction de la vectrice densité de courant J doit être perpendiculaire au plan d'étude. Le problème reste donc invariant suivant l'axe oz dans les coordonnées (x, y, z) , ou suivant la révolution d'axe oz dans les coordonnées cylindriques (r, θ, z) .

Dans le calcul suivant, nous ne considérons que le cas d'un système à symétrie par translation, le champ magnétique, présente alors deux composantes suivant les axes x et y , dans un plan perpendiculaire à J , impliquant ainsi qu'une seule composante pour le potentiel vecteur magnétique A suivant la direction (z) , qu'on désigne par (x, y) .

a. Coordonnées cartésiennes.

Pour un modèle 2D plan décrit dans le système de coordonnées cartésiennes :

$B_z = 0$. Ainsi, le potentiel vecteur est défini par :

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x, y) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

La densité de courant statorique est définie par :

$$\vec{J} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_z(x, y) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Sachant que :

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ -\frac{\partial A_z}{\partial x} \\ 0 \end{bmatrix}_f \quad (2.24)$$

L'induction magnétique B contient une composante dans la direction x et une composante dans la direction y :

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} \quad (2.25)$$

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.26)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (2.27)$$

$$\vec{\text{div}}\vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

Pour toutes les régions, les équations sont :

$$\vec{H}_x(x, y) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial y} A_z(x, y) \quad (2.28)$$

$$\vec{H}_y(x, y) = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} A_z(x, y) \quad (2.29)$$

Nous obtenons l'équation générale de Helmholtz à résoudre dans les différentes régions conductrices de la machine asynchrone :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \vec{J}_{ext} \quad (2.30)$$

Avec : $\mu = \mu_0 \mu_r$

L'équation (Eq 2.30) peut s'écrire sous la forme d'une équation différentielle partielle :

$$-\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} A_z(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_z(x, y) \right] + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \vec{J}_{ext} \quad (2.31)$$

II.3.7 Condition aux limites :

Généralement, on rencontre deux types de conditions aux limites :

II.3.7.1 Condition de Dirichlet :

L'inconnue prend des valeurs données sur les bords du domaine on distingue deux types :

A. Dirichlet homogène :

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite est considéré égal à zéro : $A = 0$.

B. Dirichlet non homogène :

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite et sa valeur est non nul : $A \neq 0$.

II.3.7.2 Condition de Neumann :

La valeur du gradient sur les bords du domaine de résolution est connue. On distingue deux types:

A. Neumann homogène :

Le dérivé par rapport à la normal de l'inconnu est nulle :

$$\frac{\delta A}{\delta n} = 0 \quad (2.32)$$

\vec{n} : Vecteur normale à la limite.

Ce qui signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnu sont perpendiculaires à la limite.

B. Neumann non homogène.

$$\frac{\delta A}{\delta n} = cte \neq 0 \quad (2.33)$$

Dans ce cas, ce qui signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnue forment un angle α avec la limite.

II.3.8 Application des équations de Maxwell à la GADA :

En tout rigueur, tout système électromagnétique est tridimensionnel (3D). Mais les dispositifs électrotechniques classiques privilégient généralement une direction particulière des champs ou des courants : une connaissance précise de la grandeur étudiée dans le plan privilégié associé à une approximation dans la direction orthogonal conduit à l'étude d'un system bidimensionnel (2D) dans le cadre de cette formulation magnétostatique en cartésien (2D) et en supposons le system étudié excité à partir d'une densité de courant J_z dirigé selon l'axe (oz) « il en sera de même pour le potentiel magnétique A_z qui sera un scalaire », les équations de Maxwell conduisent finalement [2] :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \vec{J}_{ext} \quad (2.34)$$

• Les équations à résoudre dans les MADA sont :

1. Au niveau de rotor :

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_{r_{rotor}}} \vec{\nabla} \times \vec{A}_r \right] = \mathbf{0} \quad (2.35)$$

2. Au niveau d'entrefer :

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A}_e \right] = \mathbf{0} \quad (2.36)$$

3. Au niveau des encoches statoriques :

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A}_{es} \right] = \vec{J}_{ext} \quad (2.37)$$

4. Au niveau du stator :

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_{stator}} \vec{\nabla} \times \vec{A}_s \right] = \mathbf{0} \quad (2.38)$$

II.3.9 Les problématiques :

II.3.9.1 Problème statique :

Le problème est statique, cela signifie que les grandeurs sont indépendantes du temps si bien que les équations de Maxwell qui sont aux nombres de quatre décrivant les champs électriques et magnétique sont découplées deux ont deux. Dans notre cas nous allons nous intéresser aux deux équations concernant la magnétisation : [15]

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (2.18)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

- ($A \setminus m$) : Représente le champ magnétique.
- (*Tesla*) : Représente l'induction magnétique.
- ($A \setminus m2$) : Représente la densité locale du courant électrique.

La relation qui relie le champ et l'induction magnétique dépend de la propriété magnétique du milieu représenté par la perméabilité magnétique μ ($H \setminus m$).

L'induction magnétique est dérivée d'un potentiel vecteur magnétique ($T. m$) sous la forme suivante :

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (2.19)$$

L'induction de ce potentiel permet de combiner les deux équations de la magnétostatique en une seule équation de la forme :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (2.39)$$

La majeure partie des machines électriques sont symétrique cylindrique, même que le champ est contenu dans plan (x, y) et les courant sont dans la direction orthogonale (z) à ce plan.

Alors les problèmes sont en deux dimensions et le vecteur est dans la direction axiale.

On trouve alors pour un milieu homogène :

$$\left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z \right) \quad (2.40)$$

Lorsque :

$$\vec{\text{div}} \mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (2.20)$$

Une connaissance de la représentation du potentiel vecteur permet de déterminer l'induction de champ magnétique.

II.3.9.2 Problème dynamique :

Pour des cas où on trouve que les grandeurs magnétiques sont lentement variables en fonction de temps, le couplage électromagnétique existe au sens des états quasi stationnaire ; il est modélisé par l'équation suivant de Maxwell [29] :

$$\text{rot } \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

Où :

$(\nabla \times \mathbf{m})$: Représente le champ électrique.

Dans ces conditions, le potentiel vecteur vérifie l'équation suivante :

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) = \sigma [\partial_t \mathbf{A} + \overrightarrow{\text{grad}} V] \quad (2.41)$$

Où :

$\Omega^{-1} (\text{m}^{-1})$: Représente la conductivité électrique reliant la densité de courant au champ électrique.

V : Représente le potentiel électrique imposé par une source extérieure.

Pour les cas de variation des grandeurs sinusoïdales dans le temps à la pulsation ω on introduit alors la représentation complexe de toutes les grandeurs électromagnétiques.

Comme exemple, le potentiel vecteur peut s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{a}(t) = \sqrt{2} A \cos(\omega t + \alpha) = \sqrt{2} \text{Re} [A \cdot e^{-i\omega t}] \quad (2.42)$$

Où :

(\mathbf{t}) : Représente la valeur instantanée du potentiel vecteur et A représentation complexe.

En ce qui concerne un milieu homogène non soumis à une source extérieure, ce qui est généralement le cas pour des machines synchrones

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J} \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \bar{\mu} \cdot \mathbf{J}_s \quad (2.43)$$

Cette équation représente l'équation de diffusion du champ électromagnétique en milieu homogène en régime sinusoïdal établi. C'est la modélisation en régime harmonique.

Pour le type de machine étudiée et selon le phénomène modélisé, on utilisera une formulation statique ou harmonique dans notre modélisation. Quand il s'agira d'identifier les paramètres d'un modèle circuit tel que les inductances propre ou mutuelles, nous allons utiliser une formulation statique.

En ce qui concerne les régimes transitoire ou déséquilibres, l'utilisation d'une modélisation dynamique avec une résolution en pas à pas dans le temps est inévitable.

II.4 Méthodes de résolution :

Il existe plusieurs méthodes pour la résolution des équations aux dérivées partielles, ces méthodes sont analytiques, numériques ou mixtes (semi analytiques).

II.4.1 Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis (**FEM**) dite méthode "universelle" est un outil le plus utilisée et la plus puissante des méthodes numériques. Elle est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. La modélisation des machines électriques a connu un développement remarquable ces dernières décennies grâce l'utilisation de la méthode des éléments finis. En effet, beaucoup de laboratoires et chercheurs se sont penchés sur différents aspects pour aboutir actuellement à des outils de calculs permettant de tenir compte de plusieurs phénomènes physiques jusque-là négligés ou approchés par des modèles externes. Elle permet de décrire fidèlement des géométries complexes et de tenir compte des non linéarités des propriétés physiques telles que la loi $\mathbf{i}(\mathbf{h})$ dans les matériaux magnétiques. La méthode d'éléments finis est capable d'examiner l'effet de saturation et les effets d'harmoniques de l'espace et donne beaucoup d'informations précises sur le comportement des machines électriques mais elle requiert un temps de calcul important. Aujourd'hui, on peut effectuer les analyses en régimes transitoires pas à pas dans le temps de la machine électrique grâce à la disponibilité des ordinateurs puissants.

Cette méthode a permis un apport significatif en termes d'identification des paramètres des modèles circuit alliant ainsi la rapidité des modèles circuits et la précision des modèles champ.[19]

L'utilisation de cette méthode pour la modélisation des défauts dans les machines électriques est une étape importante qu'ont franchie un certain nombre de chercheurs. Lorsqu'un défaut se produit dans la machine électrique, la répartition des courants dans les encoches et la distribution du champ sont plus ou moins modifiées en fonction de la gravité du défaut.

La méthode d'éléments finis peut être utilisée pour le calcul de champs et l'identification précise des paramètres de la machine en présence de défaut. [19]

L'avantage qu'apporte une méthode basée sur le calcul de champ réside dans le fait qu'elle décrit les phénomènes localement, en particulier un défaut, elle en donne ensuite une représentation globale vu du circuit électrique équivalent. Actuellement, On peut disposer d'un outil complet permettant la simulation d'une machine électrique en présence d'un défaut de court-circuit et connectée à son alimentation [19].

De plus, un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques, et magnétiques peut être réalisé. Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques [21].

❖ Principe de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis peut être définie comme une méthode d'approximation des équations aux dérivées partielles qui régissent les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites.

Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments puis de résoudre localement, dans chacun de ceux-ci, les équations associées à la formulation retenue. Les inconnues élémentaires sont alors définies par une combinaison linéaire, pondérée par des polynômes d'interpolation. La précision du calcul est liée à la finesse du maillage et au degré de ces polynômes. Leurs coefficients ne dépendent que de la géométrie et de sa discrétisation.

Finalement, on obtient après assemblage un système matriciel d'équations, pouvant tenir compte de certains non linéarités, comme celle intervenant dans les matériaux ferromagnétiques [22].

❖ Types d'éléments finis :

Selon que le domaine d'étude, soit à une, deux ou trois dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

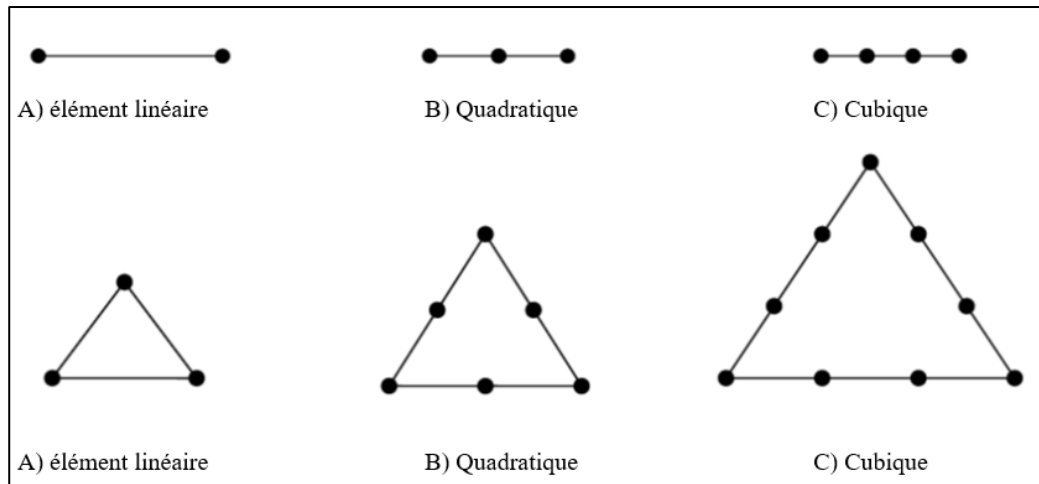


Figure II.2 : Eléments classiques en une et deux dimensions [29].

Dans la majorité des cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleure exactitude de la solution, on procède à raffiner le maillage [26].

❖ **Discrétisation et approximation :**

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées élément finis constituant le maillage. Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par une simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul [23].

La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème (2D ou 3D). Pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatères ; pour une géométrie en (3D), on utilise les tétraèdres, les prismes ou les hexaèdres [24].

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse par éléments finis car la précision des résultats dépend de la méthode de discrétisation et de la finesse de cette subdivision en sous-domaines [25].

La fonction inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométriques de ces nœuds. Dans le cas du calcul du champ dans les structures électromagnétiques, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés. Cette subdivision exclusivement triangulaire du premier ordre a l'avantage de s'adapter à toute configuration géométrique et permet de traiter des expressions simples.

❖ **Implémentation de la méthode des éléments finis :**

La mise en œuvre de la méthode des éléments finis débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé. Si, lors des premières tentatives de calcul par la méthode des éléments

finis, on écrivait, pour chaque nouveau problème, un programme différent tenant compte de sa géométrie particulière, de ses particularités physiques et de ses conditions aux limites, on s'oriente aujourd'hui vers la réalisation de logiciels généraux dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problèmes d'un même type.

Ces logiciels ont pratiquement tous la structure représentée sur la figure II.3, qui consiste en un programme séparé en quatre grands blocs : le pré processeur, le maillage, le solveur et le post processeur [29].

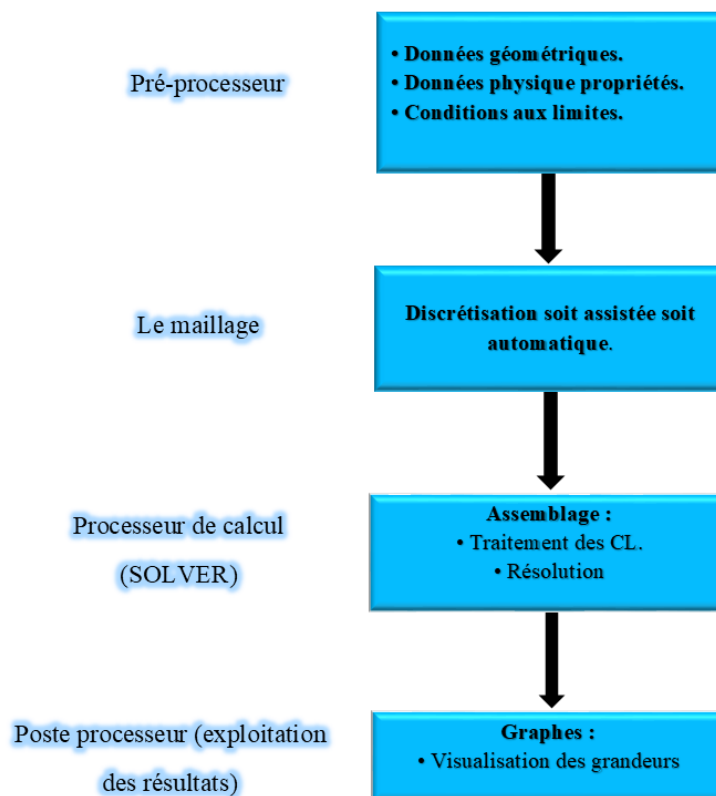


Figure II.3 : Organisation du logiciel.

II.5 Logiciel FLUX-2D :

II.5.1 Introduction :

Ce logiciel a été conçu et réalisé en 1981 par le laboratoire d'électrotechnique de Grenoble. Il est depuis cette date commercialisé par la société CEDRAT et est aujourd'hui utilisé par les principaux constructeurs de matériel électrique. Développé au départ pour les applications électrostatiques et magnétostatiques, il comprend aujourd'hui 20 modules qui permettent

d'aborder l'ensemble des problèmes qui se posent lors de la conception d'un appareil électromagnétique [2].

II.5.2 Définition :

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 [30].

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 [28].

II.5.3 La résolution d'un problème :

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

II.5.3.1 Module préprocesseur :

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU). Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques [27].

II.5.3.2 Module processeur :

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques [27].

II.5.3.3 Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D) :

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc. De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux-2D, doté d'une interface de Windows est schématisé par la figure II.4 [32].

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D.

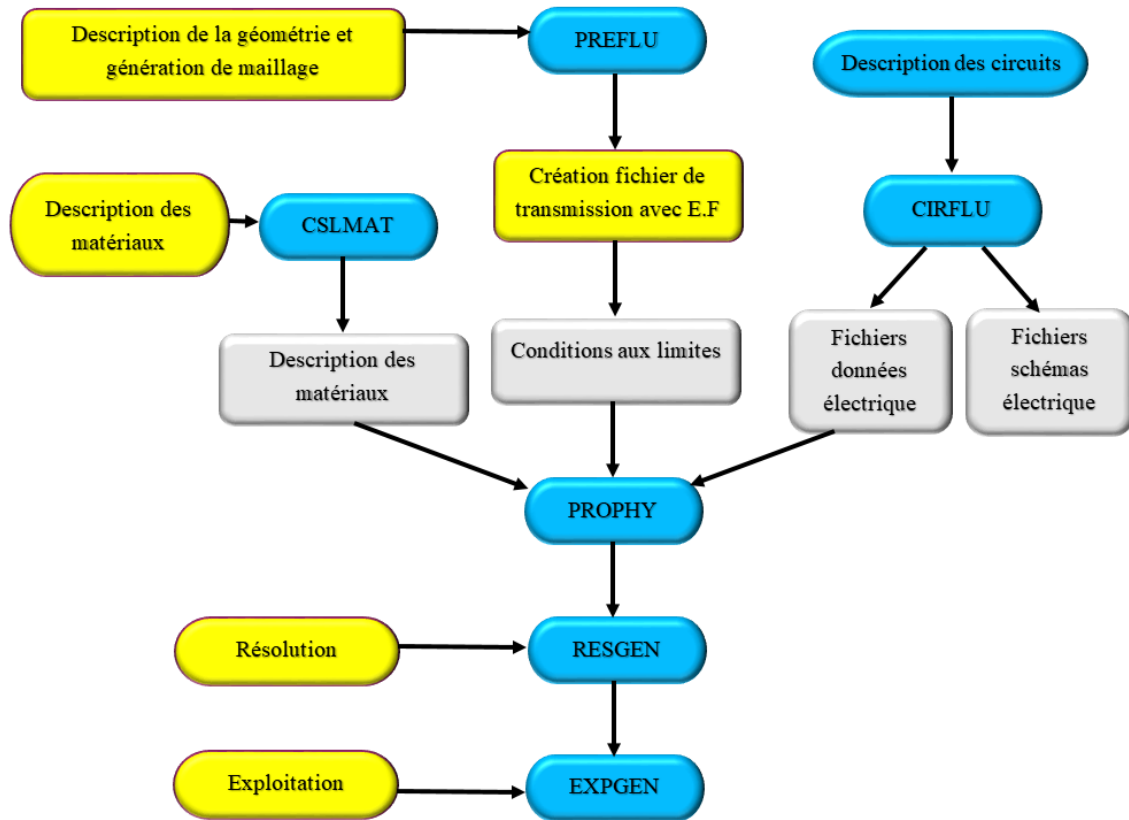


Figure II.4 : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D [27].

Les raisons de ce choix sont simples :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas le but principal de notre étude.
- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique. Cette méthode semble relativement précise si l'on la compare à des simulations sous Flux3D [28].

II.5.4 Avantages et les inconvénients de la MEF :

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


Les avantages :	Les inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> • Adaptation à géométries compliquées. • Prise en compte des non linéarités. • Temps de calcul proportionnellement 	<ul style="list-style-type: none"> • Inapproprié sur les domaines illimités. • Existence des singularités dans le domaine d'étude.

favorable.	<ul style="list-style-type: none">• Mise en œuvre partiellement difficile.
------------	--

Tableau II.2 : Avantages et les inconvénients de la MEF [29].

II.6 Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, nous avons basé sur les méthodes et les techniques de la modélisation et des outils de la simulation de la MADA. Pour la résolution des équations des champs électromagnétiques on a passe par Conception assisté par ordinateur CAO est un moyen de simulation permettant la définition de la structure du dispositif à concevoir, son dimensionnement et la détermination de ces performances à partir de ces spécifications géométriques. Ensuite, nous allons présenter la modélisation d'une GADA en mode déséquilibré en utilisant le logiciel FLUX 2D.



Chapitre III :

Simulation de la GADA

en mode normale et en

mode déséquilibré

III.1 Introduction :

La résolution du système d'équation issu de la discrétisation par les éléments finis, permet de calculer le potentiel vecteur en chaque nœud du maillage. Dans cette partie, nous allons étudier la machine dans les deux cas de fonctionnement : à vide et en charge et dans le cas d'une machine saine (sans défaut) et avec déséquilibre de réseau.

III.2 Structure du circuit magnétique de la machine :

La génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) est décrite à l'aide des points, des segments droits et d'arcs. La topologie de la machine utilisée est présentée à la Figure III.1 Les bobinages sont de type distribué et logés dans des encoches, dont le nombre sera analysé ultérieurement. On considère de manière générale 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. Les becs peuvent être utilisés pour fermer plus ou moins la fenêtre des encoches au voisinage de l'entrefer.

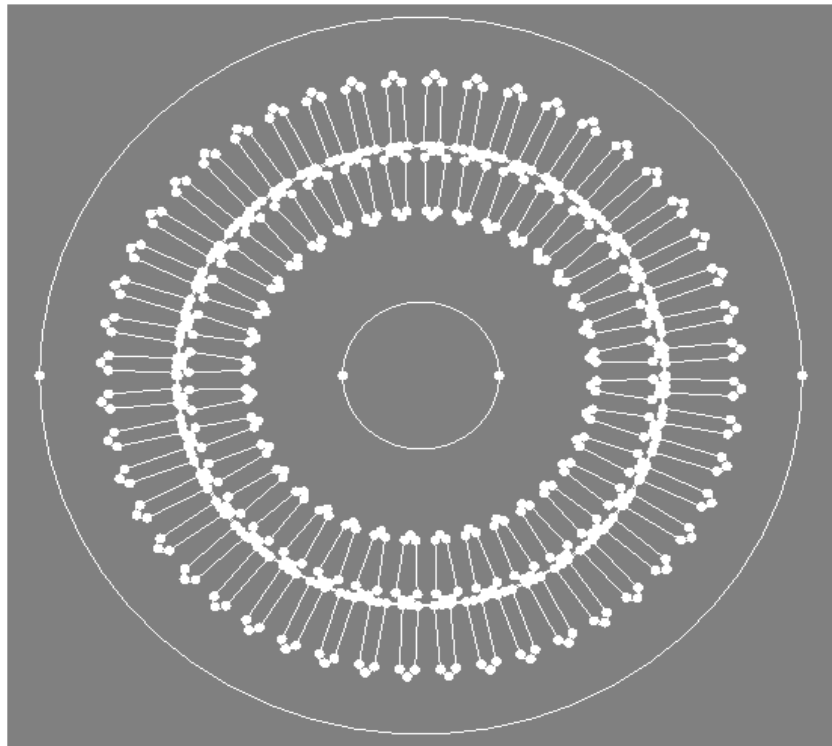


Figure III.1 : Structure du circuit magnétique et caractérisation de la géométrie de la GADA.

III.3 Phase de préparation :

Cette phase préparatoire est consacrée à la définition des domaines, Le modèle éléments finis correspond à notre machine à double alimentation de 380 V, 50 Hz et 4 pôles représentée par la figure III.2, (une description complète de la machine est donnée en annexe). Le domaine de calcul 2D, contient:

Stator contient une culasse qui est définie par un matériau magnétique caractérisé par une courbe d'aimantation $B(H)$, avec un diamètre interne 158.80mm et externe 247.65mm et 48 encoches statoriques qui sont définies par un matériau non magnétique

- **Entrefer** d'épaisseur égale à 0.44 mm

- **Rotor** contient des bobines court-circuit avec un diamètre interne 157.87 mm et externe 247.65mm et 36 encoches rotorique qui sont définies par un matériau non magnétique [2]

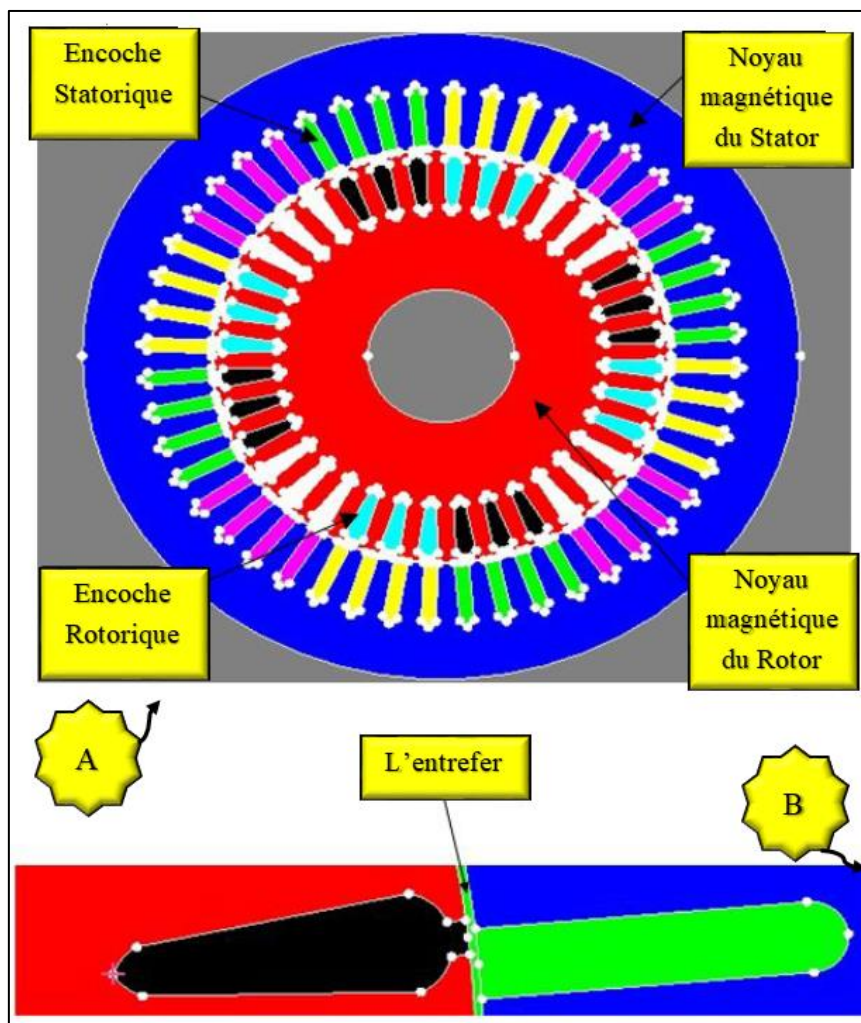


Figure III.2 : (A) Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique, (B) Zoom de région.

III.4 Structures des bobinages d'une GADA :

Pour identifier la méthode de bobinage dans le logiciel Flux généraliste consiste à rassembler les régions géométriques correspondant à une phase et à leur affecter un composant du circuit externe. On indique alors le sens des conducteurs et le nombre de spires traversant la région. Les bobinages répartis dans les encoches d'une GADA 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. Le pas des bobines (ou pas du bobinage) est dit fractionnaire, ou raccourci par rapport au pas polaire, pour réduire le contenu harmoniques de la FMM produite comme nous le verrons plus loin. Le raccourcissement du pas réduit également la longueur des têtes de bobine et en conséquence la résistance de phase sauf pour le bobinage de type ondulé [34]. Il est possible de concevoir un bobinage à simple couche à pas raccourci, mais cela nécessite des longueurs différentes entre les têtes des bobines de la même phase. Des bobinages à simple couche semblent être utilisés au rotor des GADA par l'industrie. [29]

La Figure III.3 représente deux pas polaires uniquement, on y voit aussi la manière dont il est logé dans les encoches. Les bobines de la même phase qui se trouvent côte à côte forment un groupe de bobines qui constitue un pôle magnétique de la phase concernée. Les bobines appartenant à un même groupe sont généralement connectées en série comme dans le cas de la Figure suivante :

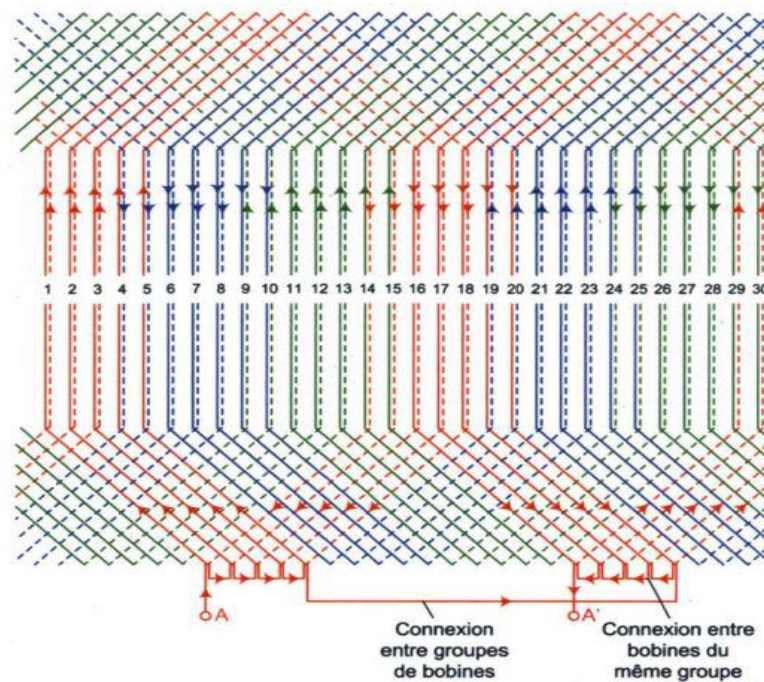


Figure III.3 : Bobinage triphasé représente deux pas polaires.

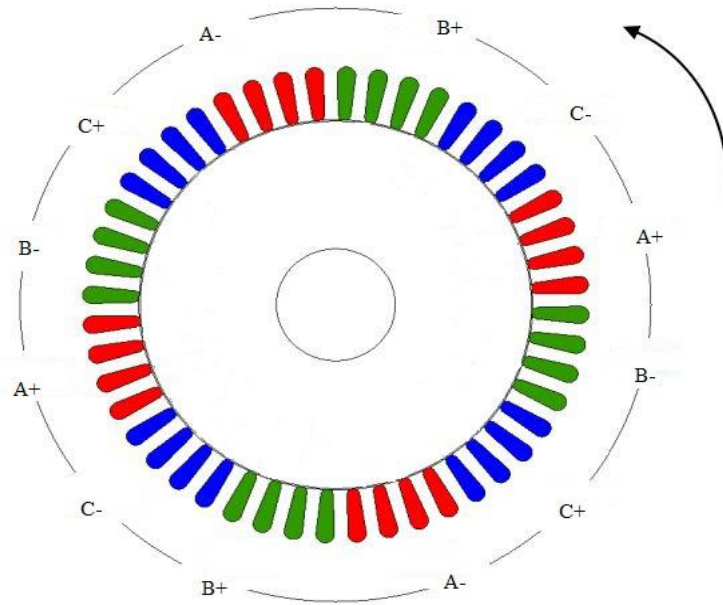


Figure III.4 : Répartition du bobinage statorique.

III.5 Création des matériaux :

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

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 III.1 : Caractéristiques $B(H)$ du matériau magnétique.

La définition métier des matériaux est proche de celle utilisée dans Flux. En effet de nombreux modèles de courbes B(H) existent déjà dans Flux. Cependant, on pourra différencier, dans le cadre d'une définition métier, les matériaux magnétiques durs des matériaux magnétiques doux. De plus, alors que le calcul des pertes est réalisé en post-processing dans Flux.

III.6 Circuit électrique :

Pour représenter fidèlement la génératrice, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine). Le circuit représente :

- Les sources de tension d'alimentation (V1 V2 V3)
- Les bobinages statoriques (B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B9 B10 B11 B12)
- Les bobinages rotoriques (B13 B14 B15 B16 B17 B18 B19 B20 B21 B22 B23 B24)
- Les Inductances de fuite (L1 L2 L3 L4 L5 L6)
- Résistances de chute de tension (R1 R2 R3 R4 R5 R6).

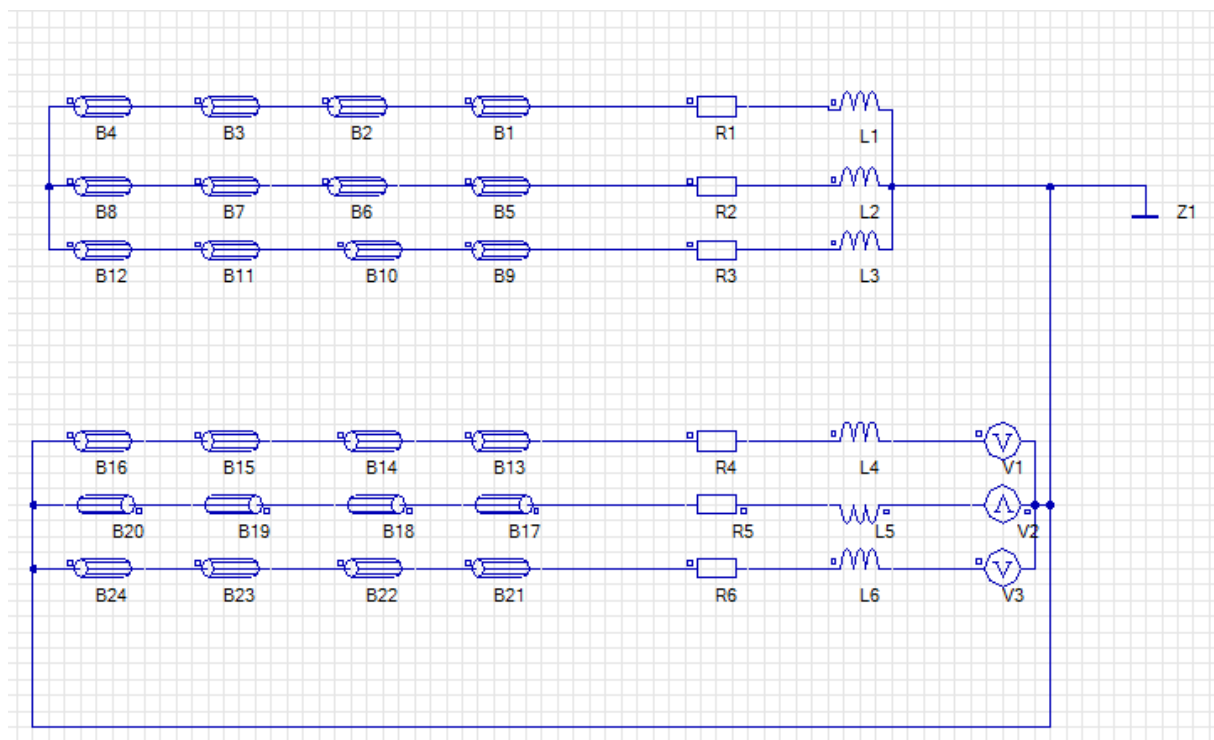


Figure III.5: Représentation de circuit électrique.

III.7 Le maillage :

Le maillage du circuit magnétique, est présenté dans la figure III.7 Le maillage comporte 35918 éléments surfaciques et 72156 nœuds. L'exploitation principale du modèle éléments finis a pour objectif de dresser un diagnostic, ce qui exige un maillage du domaine de calcul

assez fin dans l'entrefer, dans les régions de type conducteur massif et au niveau des régions des encoches statoriques (Voir Figure III.6). Ces paramètres sont nécessaires pour assurer un compromis raisonnable entre la précision et la rapidité de calcul numérique.

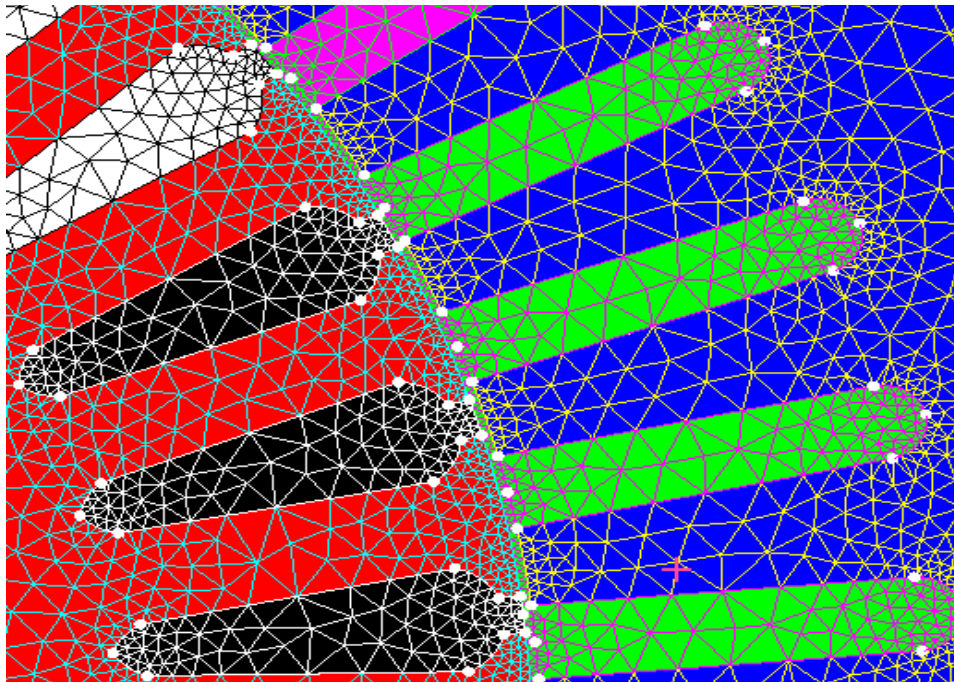


Figure III.6 : Répartition du maillage dans l'entrefer.

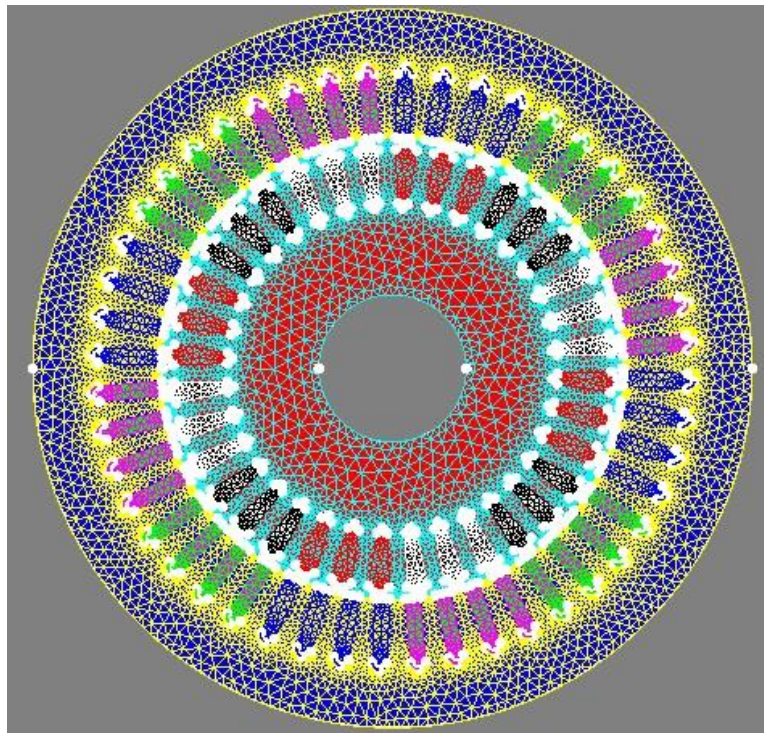


Figure III.7 : Le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

Le système est discrétiser par des segments et des arcs spécifier la forme des éléments, Le maillage à des différentes faces qui sont limité est découpé en élément finis. On impose la méthode utilisée pour constituer le maillage par logiciel pour le découpage Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre.

III.8 Simulation du modèle par la méthode des éléments finis :

Les éléments des circuits électriques sont affectés vers le circuit magnétique. La magnétisation de la machine à l'état initial est faite par une résolution en magnétodynamique. Ainsi à partir d'un modèle magnétodynamique pas à pas dans le temps, on peut obtenir des représentations de la répartition de lignes équiflux.

La Figure III.8 (A) montre la répartition des lignes équiflux dans le circuit magnétique, avec la présence de symétries par rapport aux axes inter polaires. Les lignes de flux entre le stator et le rotor sont légèrement déviées dans le sens de rotation du rotor La répartition de l'induction dans la Figure III.8 (B) est, elle aussi, quasi-symétrique.

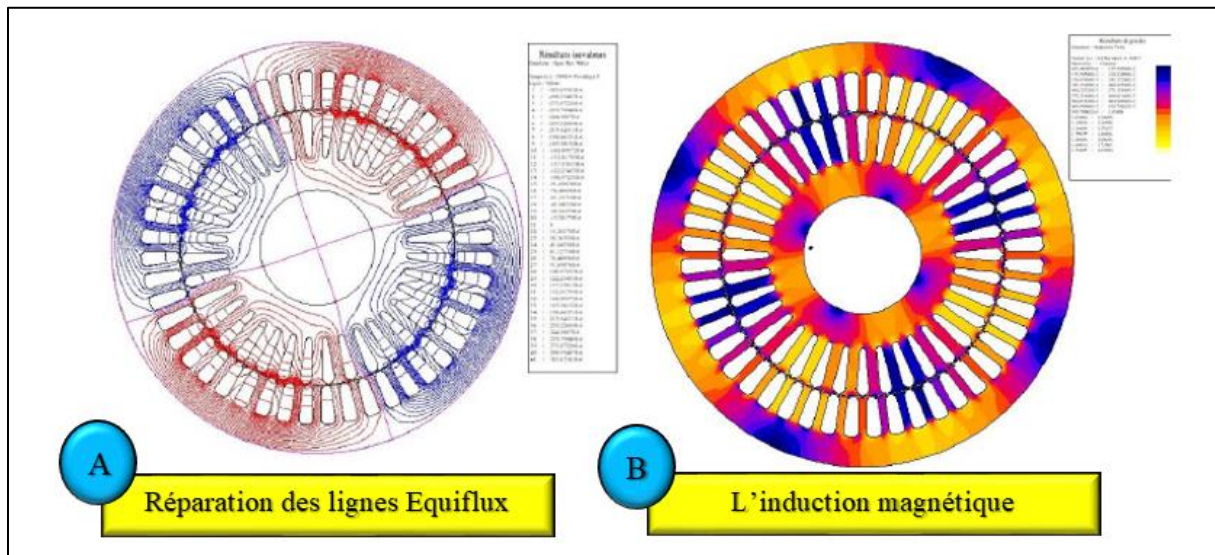


Figure III.8 : (A) Répartition des lignes Equiflux / (B) L'induction magnétique.

III.9 Résultats de simulation de fonctionnement à vide :

Nous avons simulé le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation en régime sain et en défaut de déséquilibre "tension" par le modèle magnétostatique disponible dans logiciel avec une tension de 380 v

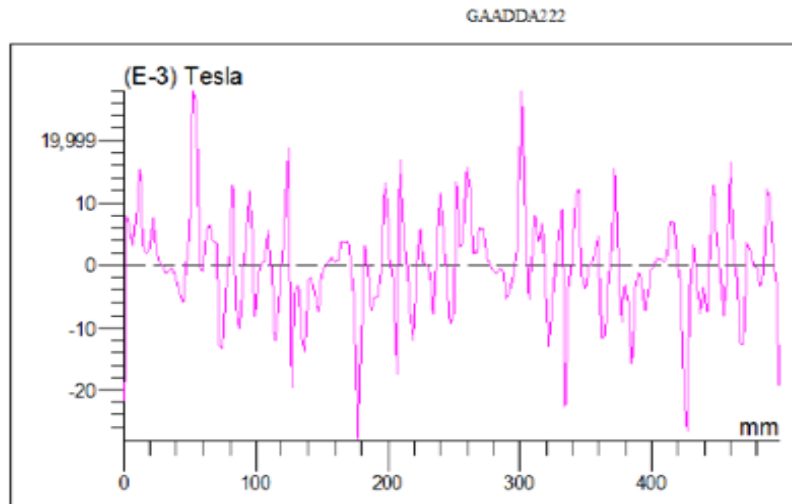


Figure III.9 : Evolution de composant normale d'induction de la machine.

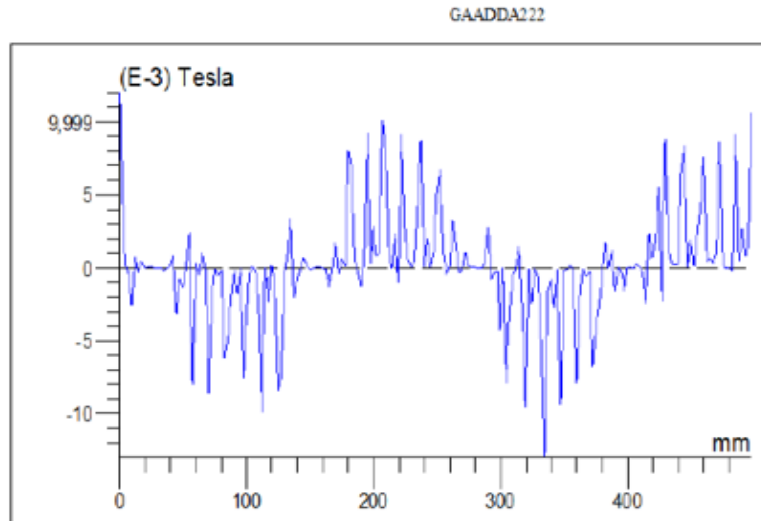


Figure III.10 : Evolution du composant tangentiel d'induction.

A.Essai à vide :

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

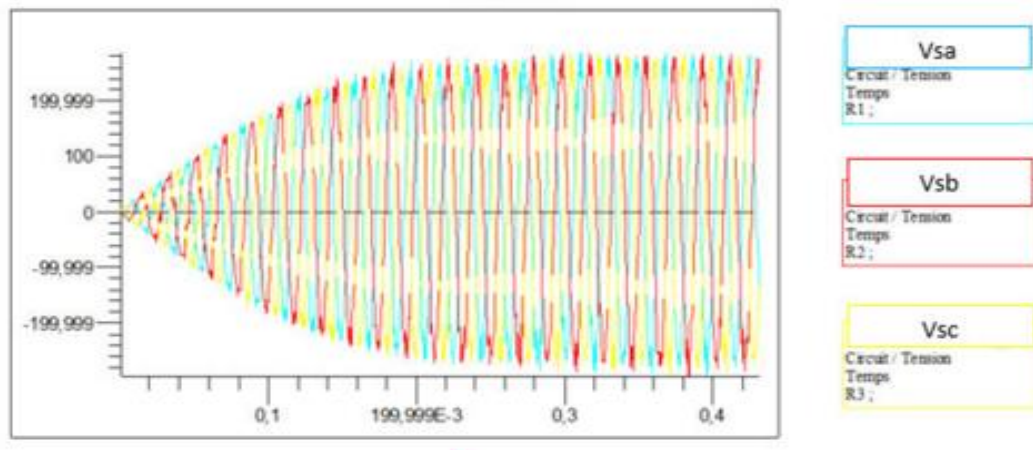
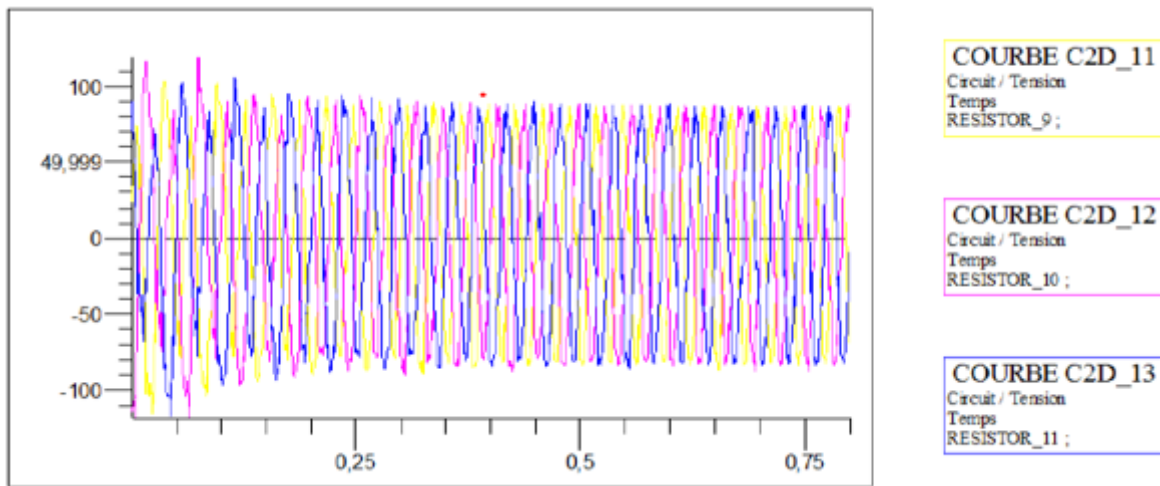
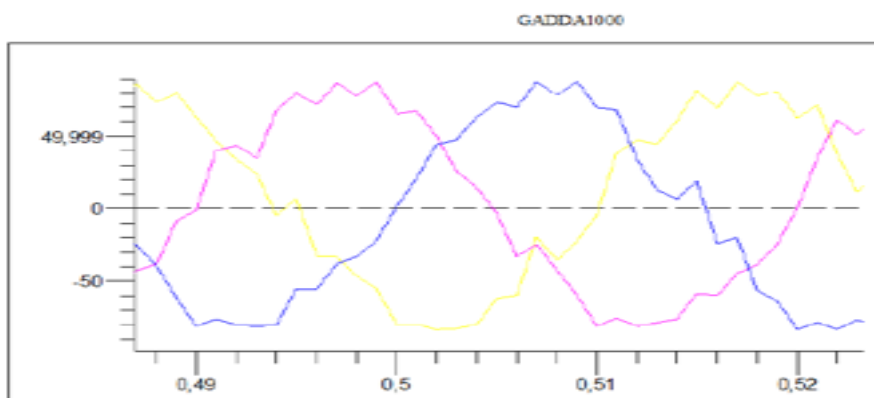


Figure III.11 : Evolution de tension statorique.

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



(a)



(b)

Figure III.12: (a) Evolution de tension statorique (b) Evaluation de zoom de tension statorique

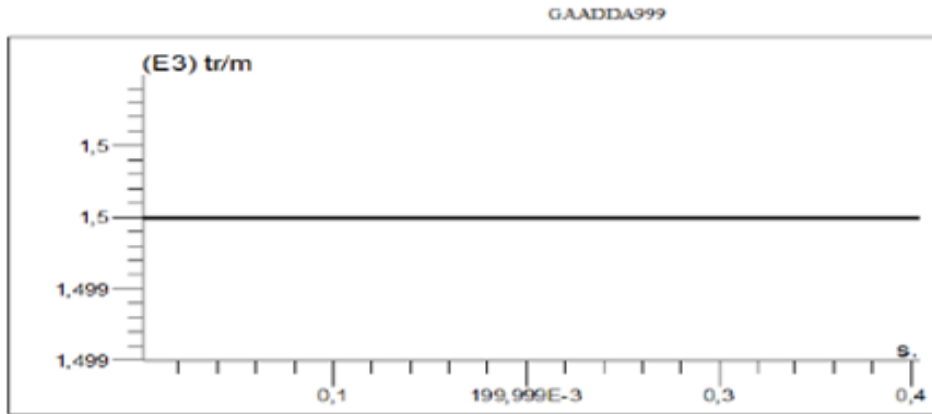


Figure III.14: Vitesse de rotation de la machine à 1500tr/min.

iii. Tension de rotor 200V, fréquence 50Hz, vitesse 150

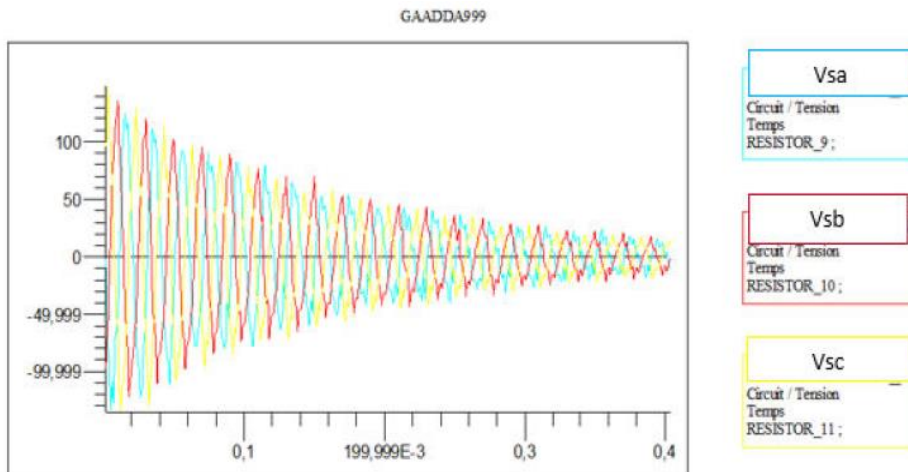


Figure III.15 : Evolution de tension statorique.

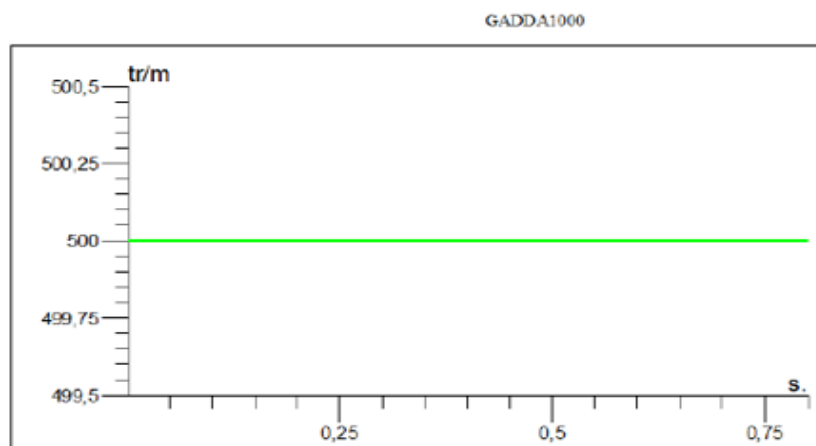
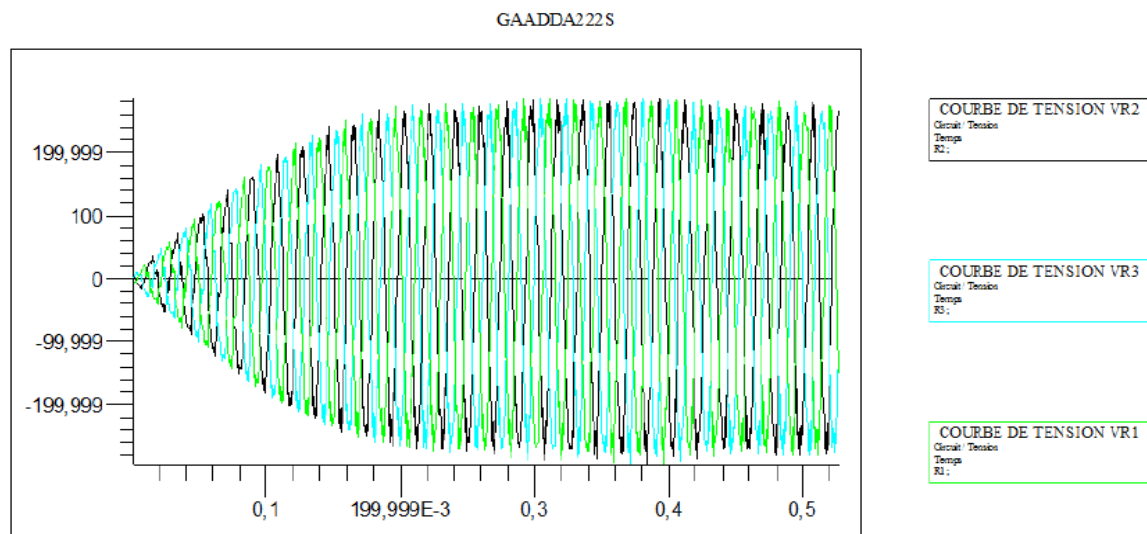


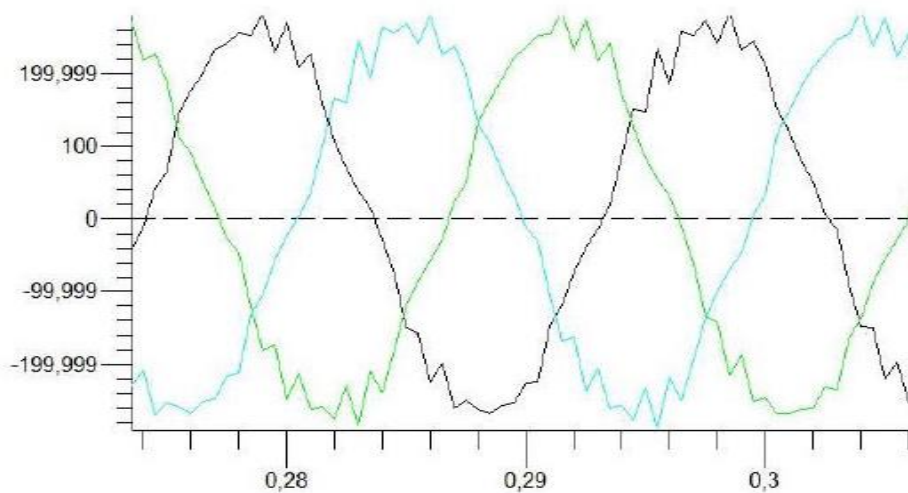
Figure III.16 : Vitesse mécanique de rotor 500tr/min

A .En charge déséquilibré ($R1=R2=100$, $R3=200$) :

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



(a)



(b)

Figure III.17 : a) évolution des tensions statoriques ; (b) : Zoom d'évolution des tensions Statoriques

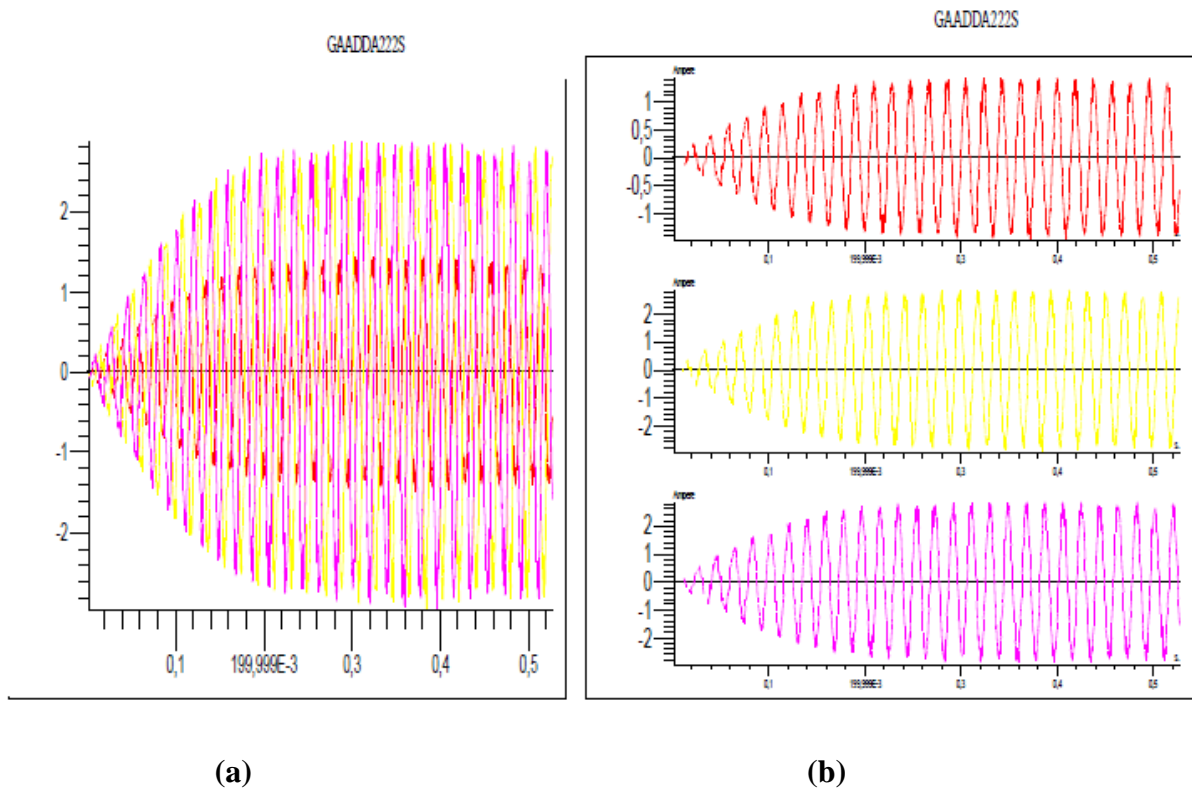


Figure III.18: (a) évolution des courants statoriques (b) évolution de courants juxtaposé.

A. Charge Equilibré :

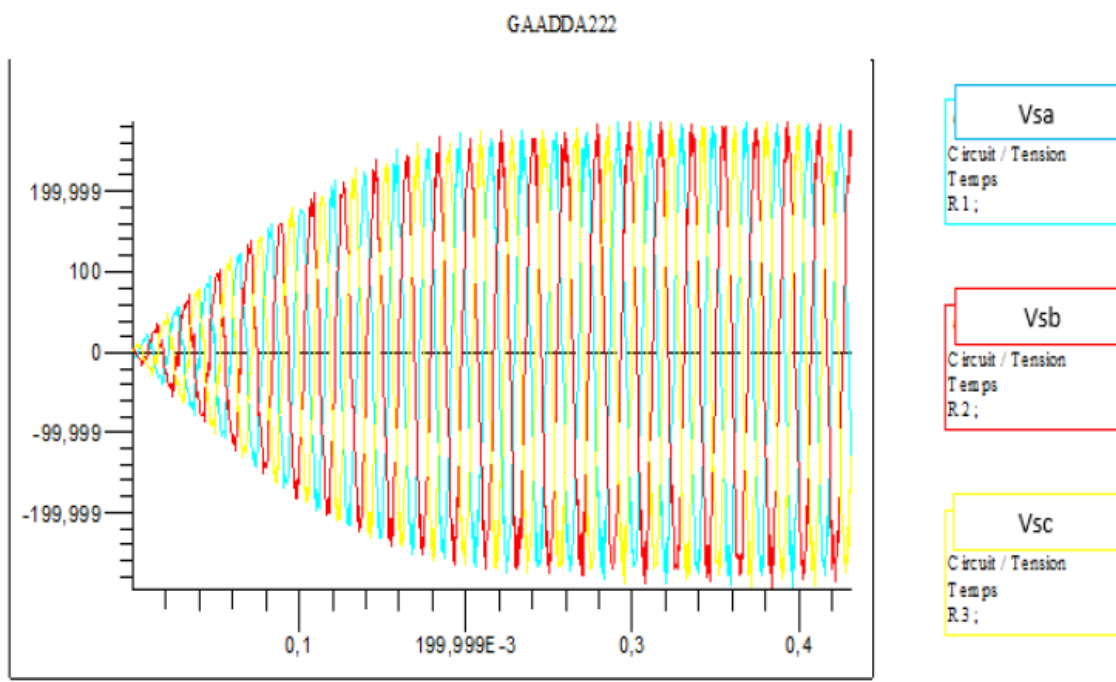


Figure III.19 : Evolution des tensions statoriques.

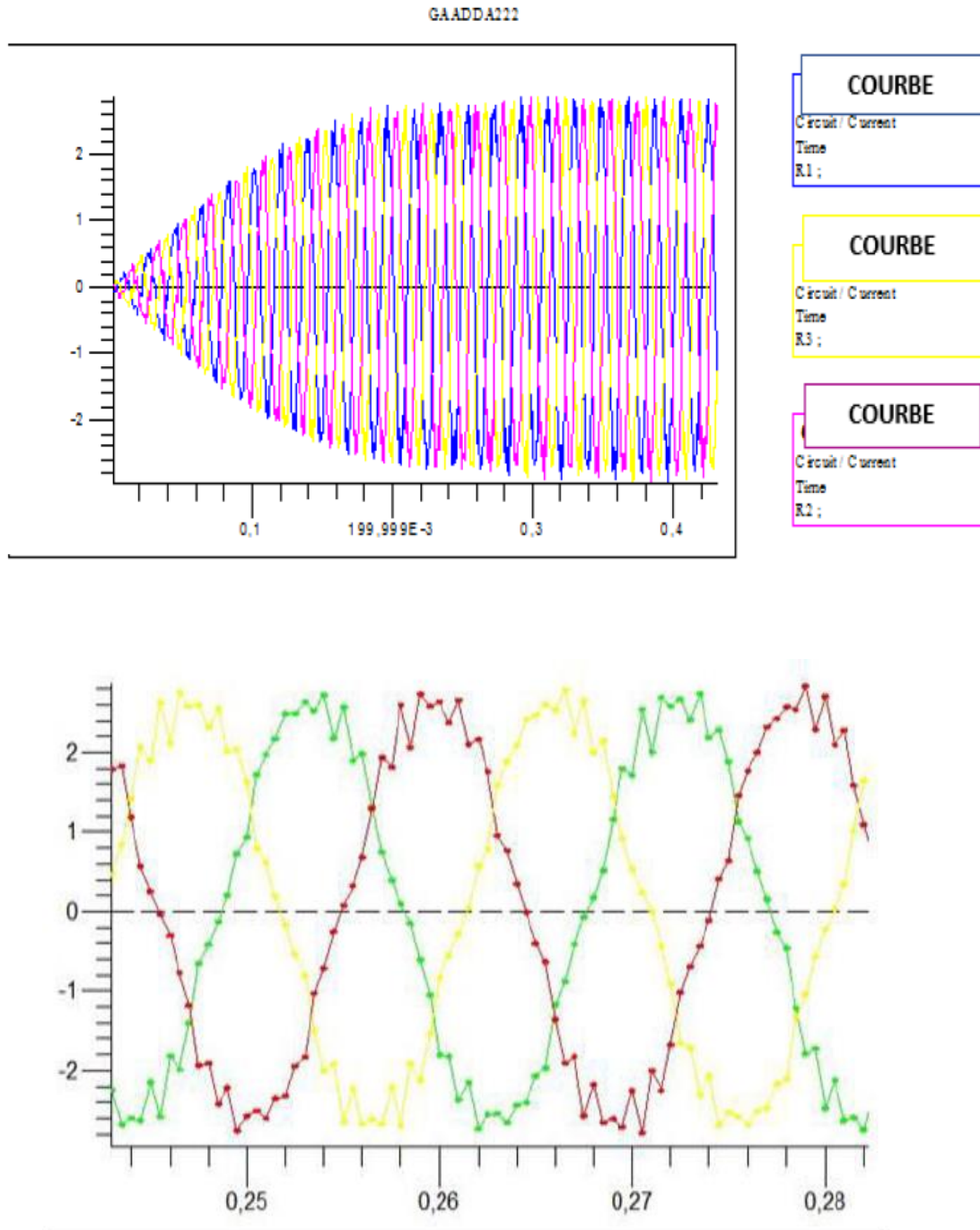
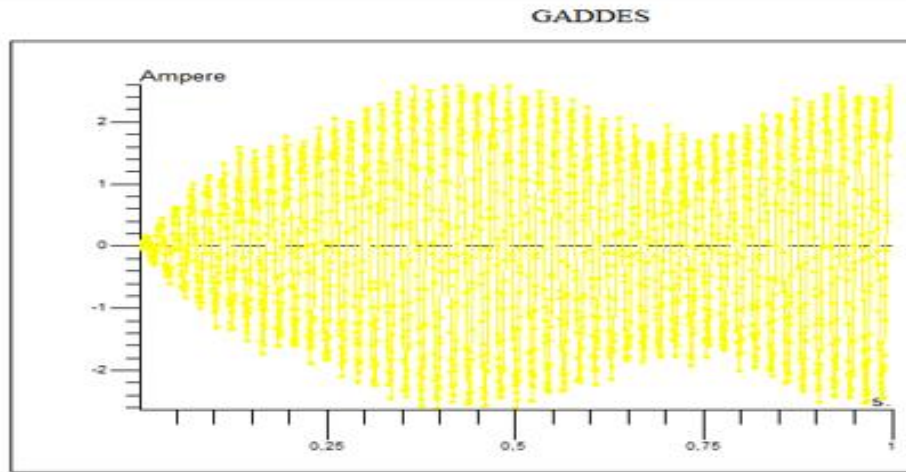


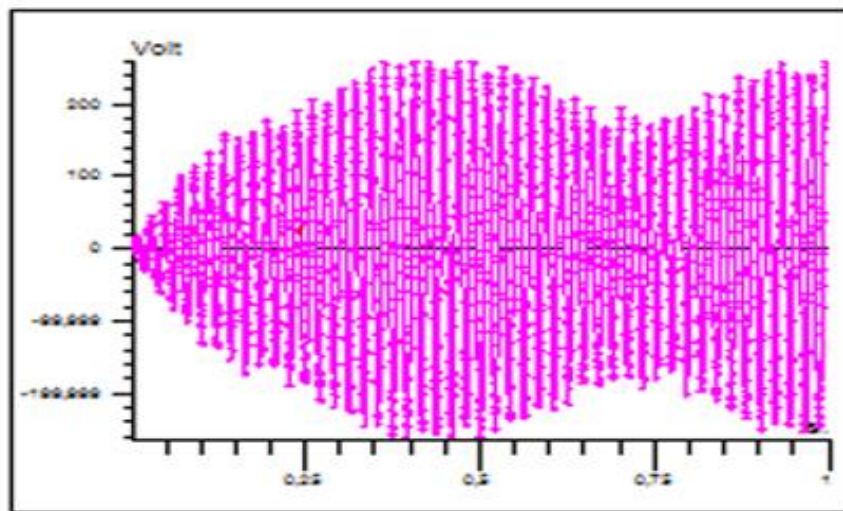
Figure III.20 : (a) Evolution des courants statoriques ;(b) Zoom d'évolution des courants. Statoriques.

B. Tensions rotoriques déséquilibrés avec charge équilibré :

D.1 Tension rotorique déséquilibré $V1=V3=12v$ $V2=6v$



(A)



(B)

Figure III.21 : (A) : Evolution de courant statorique (B) : Evaluation de tension statorique

D2. Tension rotorique déséquilibre a l'amplitude :

$$V1=12*\text{Sqrt}(2)*\text{Sin}(6*\text{TIME}) \quad V2=12*\text{Sqrt}(2)*\text{Sin}(6*\text{TIME}-2.0944/2)$$

$$V3=12*\text{Sqrt}(2)*\text{Sin}(6*\text{TIME}+2.0944)$$

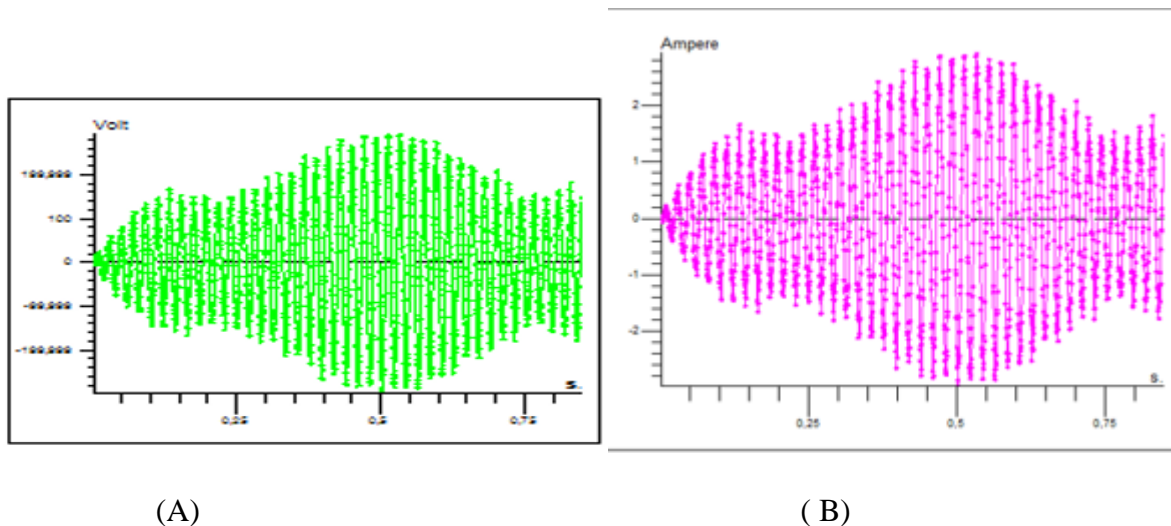


Figure III.22 : Evolution de courant et de tension statorique

III.10 Interprétation des résultats :

La densité de flux magnétique est répartie comme indiqué à la figure III.6 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 III.7 où les isovaleurs du flux magnétique ont été bien représentés pour montrer les surfaces avec la magnitude de flux magnétiques. La figure III.8 montre la variation de composantes 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 III.18 et en équilibre consommant la même quantité que dans la figure III.20 La vitesse a été maintenue à 500 tr/min pour assurer la même vitesse qui a été utilisée dans les expériences pratiques. Dans figure III.10 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 III.15 l'évolution avec une grande 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 figure III.21 le courant périodiquement augmente et décroît dans un essai des tensions 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.

III.11 Transformée de Fourier rapide (FFT) : Pour identifier le type de défaut on utilise la méthode d'analyse spectrale des courant statorique (F F T).

L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales. La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple. Le principe de la transformée de Fourier repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre. [9]

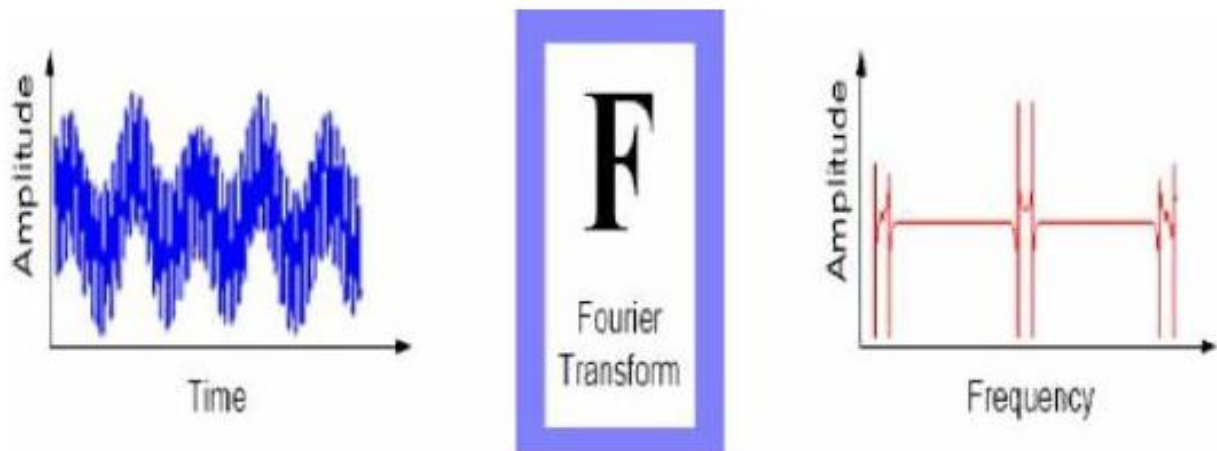


Figure III.23 : Principe de la Transformée de Fourier.

III.11.1 Résultat de l'analyse spectrale par FFT :

On applique dans cette partie la transformé de Fourier rapide FFT sur le courant de la phase 1 de la machine en régime sain a vide on obtient les résultats suivants:

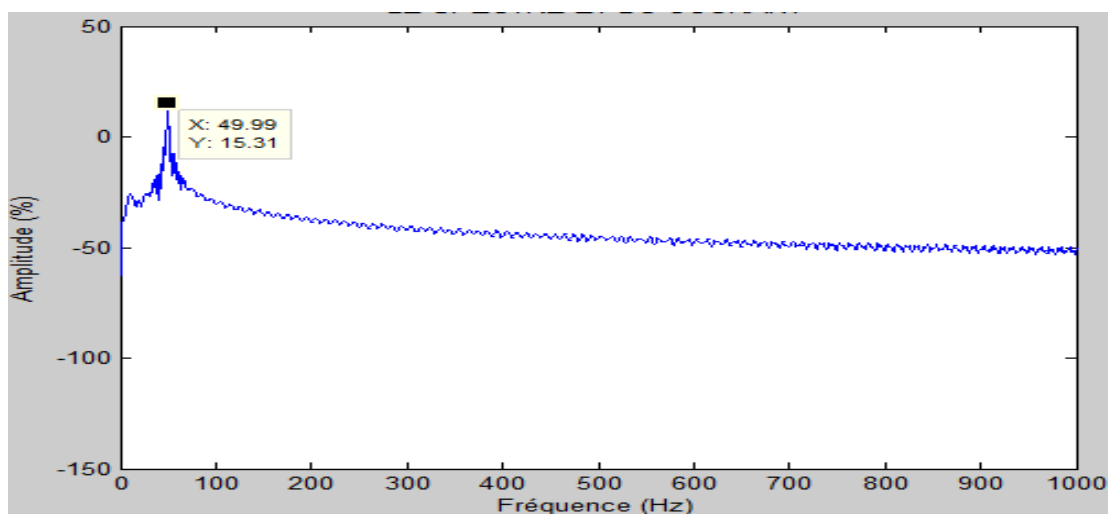


Figure III.24. Les spectres du courant statorique à vide avec tension équilibré

On applique dans cette partie la transformé de Fourier rapide FFT sur le courant de la phase 1 de la machine on obtient les résultats suivants:

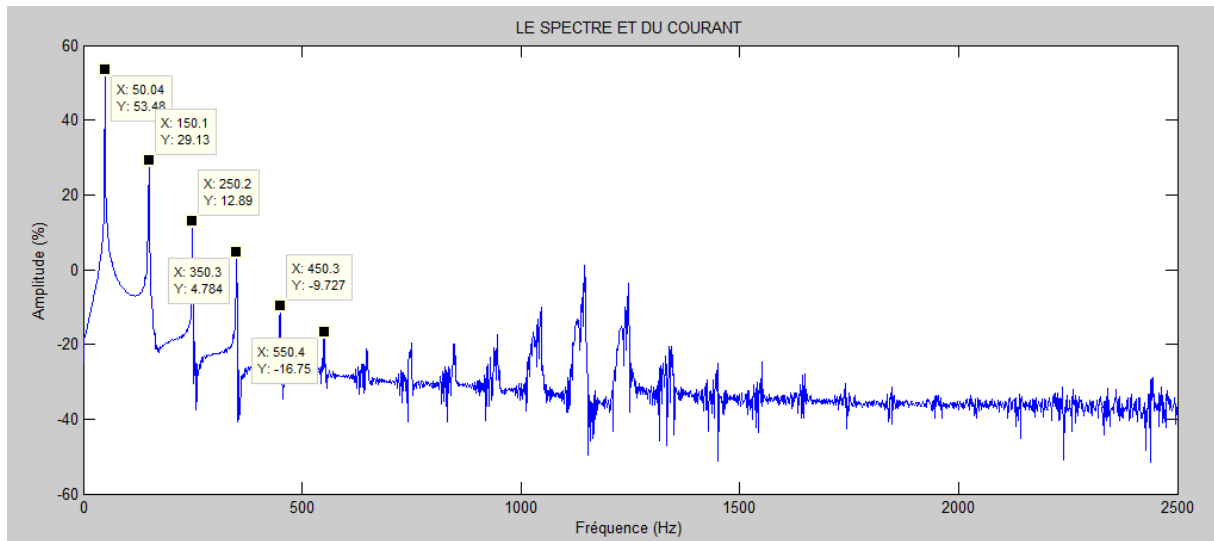


Figure III.25. Les spectres du courant statorique à vide avec tension déséquilibré

III.11.2 Interprétation de l'analyse spectrale :

Pendant le fonctionnement de la GADA, des phénomènes divers entrent en jeu affectent particulièrement les courants d'alimentation en modifiant leur contenu spectral. Le recours à la Transformée de Fourier Rapide (FFT) dans cette étude nous permet d'analyser le courant statorique de la machine saine et avec défauts. Présentent respectivement les spectres du courant statorique pour les deux cas; équilibré et déséquilibré. À partir de ces deux spectres on peut dire que la pauvreté en harmoniques observée dans le spectre obtenu du modèle équilibré est absolument incomparable avec la richesse en harmoniques du spectre obtenu du modèle déséquilibré. On remarque aussi l'émergence des harmoniques $f_{dés} = K.f_s$ avec un accroissement de leurs amplitudes. ($k=1, 3, 5$)

III.12 Conclusion :

Ce chapitre a été réservé à l'élaboration du modèle des éléments finis dédié à la simulation de la GADA en deux régimes à vide et en charge (saine et en défaut) sous l'environnement du logiciel Flux 2D. Malgré que cette modélisation soit très couteuse en temps de calcul, elle reste très fidèle au comportement de la machine. Cette caractéristique est bien argumentée par les différents résultats obtenus, Ainsi que la grande partie de ce chapitre a été consacrée pour le contenu spectral du courant statorique à l'état sain et en déséquilibre. Et comme le réseau

électrique a des perturbations, il est nécessaire de cerner l'impact de déséquilibre des tensions d'alimentation sur le contenu spectrale du courant statorique. Enfin, les effets: la connexion de circuit, la charge, déséquilibre de tensions, constituerons l'essentiel de prochain chapitre qui fait saillants sur le fonctionnement de la machine en pratique pour accomplir un diagnostic plus concis et surtout plus fiable.

Conclusion générale :

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées des systèmes de protection fiables car une défaillance, même la plus faible, peut mener à un dommage matériel. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les générateurs asynchrones à double alimentation. Nous avons focalisé l'étude de diagnostic sur les défauts électriques très critiques qui peuvent détériorer le bobinage de générateur dus aux mauvais branchements et aux problèmes de l'alimentation électrique à savoir tels que le mauvais contact d'une phase, l'erreur de branchement des phases du moteur, l'absence d'une phase,....

Et pour faire un diagnostic globale et voir le fonctionnement de générateur on voit le comportement de générateur par simulation à l'aide de logiciel flux 2D.

La modélisation de la génératrice asynchrone a double alimentation par la méthode des éléments finis réalisée est dédiée à la simulation de la génératrice saine et avec défaut. Malgré que cette modélisation soit très onéreuse en temps de calcul, elle montre une grande fidélité au comportement de la génératrice. Cette caractéristique est bien argumentée par les différents résultats obtenus en régime sain et défectueuse dans la troisième chapitre.

Ensuite, Nous avons effectué l'analyse spectrale du courant statorique, par la transformée de Fourier rapide (FFT) qui nous a offert la possibilité de détecter les défauts statoriques.

L'analyse spectrale du courant statorique a été focalisée sur la gamme des très basses fréquences, les composantes traditionnelles ($f_{dés} = k.f_s$) autour du fondamental ont été détecté pour un nombre différents de déséquilibre, et pour différentes charges.

Finalement, on peut dire que les résultats obtenu depuis la simulation on peut visualiser les signaux (tension rotorique, couple....) de générateur en plusieurs cas sans le risque de détruire la machine.

Paramètre géométrique de la machine :**Statorique :**

Epaisseur d'entrefer	0.44 mm
Diamètre interne statorique	158.80 mm
Diamètre externe statorique	247.65 mm
Ouverture d'encoche	2.54 mm
Largeur dents	5.334mm
Largeur d'encoche (sous les becs)	5.38 mm
Largeur d'encoche (au fond)	8.28 mm
Ouverture d'encoche	2.54 mm

[2]

Rotorique :2

Diamètre interne rotorique	50.8 mm
Diamètre interne externe	157.87 mm
Hauteur d'encoche rotorique	23.75 mm
Largeur d'encoche (sous les becs)	7.163 mm
Largeur d'encoche (au fond)	3.556 mm
Ouverture d'encoche	2.54 mm
Largeur dents	6.35 mm

[2]

Paramètres électriques :**Statorique :**

Resistance statorique les tête d'bobinage	R1 R2 R3	0.001 OHM
Resistance statorique de bobinage	B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8 B9 B10 B11 B12	1.35796 OHM
Inductance statorique	L 1 L2 L3	0.00956 H

[2]

Rotorique :

Resistance rotorique les tête d'bobinage	R4 R5 R6	0.001
Resistance rotorique de bobinage	B13 B 14 B15 B16 B17 B18 B19 B20 B21 B22 B23 B24 B25	1.15243
Inductance rotorique	L4 L5 L6	0.00448

[2]

Région surfacique :**Stator :**

Régine	Type de région	Matériau de région	Composant électrique de région	Nombre de spire du conducteur	Ensemble mécanique
SSA	Conducteur bobine	Cuivre	B1	112	Stator
SSA1	Conducteur	Cuivre	B2	112	Stator

	bobine				
SSA2	Conducteur bobine	Cuivre	B3	112	Stator
SSA3	Conducteur bobine	Cuivre	B4	112	Stator
SSB	Conducteur bobine	Cuivre	B5	112	Stator
SSB1	Conducteur bobine	Cuivre	B6	112	Stator
SSB2	Conducteur bobine	Cuivre	B7	112	Stator
SSB3	Conducteur bobine	Cuivre	B8	112	Stator
SSC	Conducteur bobine	Cuivre	B9	112	Stator
SSC1	Conducteur bobine	Cuivre	B10	112	Stator
SSC2	Conducteur bobine	Cuivre	B11	112	Stator
SSC3	Conducteur bobine	Cuivre	B12	112	Stator
Stator	Région magnétique no conductrice	Fer			Stator

[2]

Rotor :

SRA	Conducteur bobine	Cuivre	B13	100	Rotor
SRA1	Conducteur bobine	Cuivre	B14	100	Rotor
SRA2	Conducteur bobine	Cuivre	B15	100	Rotor

SRA3	Conducteur bobine	Cuivre	B16	100	Rotor
SRB	Conducteur bobine	Cuivre	B17	100	Rotor
SRB1	Conducteur bobine	Cuivre	B18	100	Rotor
SRB2	Conducteur bobine	Cuivre	B19	100	Rotor
SRB3	Conducteur bobine	Cuivre	B20	100	Rotor
SRC	Conducteur bobine	Cuivre	B21	100	Rotor
SRC1	Conducteur bobine	Cuivre	B22	100	Rotor
SRC2	Conducteur bobine	Cuivre	B23	100	Rotor
SRC3	Conducteur bobine	Cuivre	B24	100	Rotor
Rotor	Région magnétique non conductrice	Fer			Rotor

[2]

- [1] : Hamadou Adil. Nessissen Abdelkader « Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil » thèse de master en génie électrique, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, 2015. ■
- [2] : Megamez El Mokhtar & Joka Talent « Modélisation et Identification d'une génératrice asynchrone (GADA) », Université Saad Dahleb Blida 01, 2018.
- [3] : <http://www.powertoday.in/News.aspx?nId=1Ht+JZoFeuUhm2QiBNo+twR>, date de consultation 09/04/2018
- [4] : Abdessemed « Modélisation et Simulation de Machines Electriques », Collection Technosup, 2011.
- [5] : T. Wildi : Electrical Machines, Drives and Power Systems, 6ème Edition, 2006.
- [6] : S. Dan: Clarke's and Park's Transformations, 2008.
- [7] : Labvolt : Principles of Doubly Fed Induction Generators (DFIG).
- [8] : Dendouga, A. (2010). Contrôle des puissances actives et réactives de la machine à alimentation (DFIM) (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [9] J. Fletcher, J Yang: Introduction to Doubly fed induction generator for wind applications, pages 259-260, Glasgow, United Kingdom. ■
- [10] site internet
- [11] : HOCINI Yacine « COMMANDE D'UNE GENERATRICE POUR ENERGIE EOLIENNE », Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2013. ■
- [12] : Documents Leroy Somer, General Electric.
- [13] : C. Sabonnadière, L. Coulomb, « Calcul des champs électromagnétiques », Technique de l'ingénieur D 3020.
- [14] : BELATEL mimi « Etude des machines électriques par CAO » Thèse de doctorat en Génie Electrique, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [15] Romain Garnier. « Contribution à la résolution des équations de Maxwell dans les structures périodiques par la méthode des éléments finis », Electromagnétisme, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2013.
- [16] : P. Mas, « Modélisation en électromagnétisme », étude technique, janvier 1992.
- [17] : Nehal Ouassila, « Etude et modélisation des paliers planaires », thèse de magister, Université de Constantine, 2009.
- [18] : Mohamed Rachek, « Modélisation par méthode numérique de systèmes électromagnétiques en mouvement de structures tridimensionnelles : application au couplage

magnétique-mécanique et au contrôle non destructif par courant de Foucault », thèse de doctorat, UMMTO, 2007.

[19] : AINOUCHE Toufik, BOURAHLA Mohamed amine, « Calcul par éléments finis et réalisation expérimentale d'une machine asynchrone à cage double étoile », thèse de master en électrotechnique Industrielle, Université USTHB, 2010.

[20] : HACHELAF Redouane, « Etude de l'influence des défauts du bobinage sur les caractéristiques électromagnétiques de la MASDE », thèse de Magister a école militaire polytechnique, 2011.

[21] : G. Datt et G. Touzot « Une Présentation de la Méthode des Eléments Finis », Maloine S.A. Editeur Paris, Deuxième édition, 1984.

[22] : Ounnadi Mohammed, « Elaboration d'un modèle d'étude en régime dynamique d'une machine à aimants permanents », Thèse de magister, Université de Tizi-Ouzou, 07 avril 2011.

[23] : Khebbab Mohamed, « Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) », Thèse de magister, université de Constantine, 2007

[24] : M. Rachek, « Modélisation par éléments finis de systèmes électromagnétiques en mouvement de structures tridimensionnelles : application au couplage magnétique-mécanique et au contrôle non destructif par courant de Foucault », thèse de doctorat, UMMTO, 2007.

[25] : E. Chauveau, « Contribution au calcul électromagnétique et thermique des machines électriques : application à l'étude de l'influence des harmoniques sur l'échauffement des moteurs asynchrones », thèse de Doctorat de l'université de Nantes, 2001

[26] : Y. Boutora, « Elaboration de nouvelles méthodes de renumérotation des maillages en vue d'une modélisation électromagnétique des machines synchrones à aimants permanents avec la méthode des éléments finis », thèse de doctorat, ENP, Alger, 2007.

[27] : FLUX 2D®, version 7.60, "Notice d'utilisation générale, volume 4 : Equations, sous – programmes utilisateurs, géométrie et maillage avec PREFLU, axiperiodique", Cédrat, 2001.

[28] : DJOUADI Abdelhakim & ZEROUG Abdessamie 'Modélisation et diagnostic d'une MADA fonctionnant en régime déséquilibré' these de master université Saad Dahleb Blida 01 2018.

[29] : FERRAHI Akram et DENDANE Abdeslam «Modélisation et identification d'une machine asynchrone à rotor bobiné » thèse de master Université Saad Dahleb BLIDA1 ,2019

[30] : [https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/generatrice-asynchrone-503#:~:text=La%20g%C3%A9n%C3%A9ratrice%20asynchrone%20est%20une,\(variable%20suivant%20la%20charge\)](https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/generatrice-asynchrone-503#:~:text=La%20g%C3%A9n%C3%A9ratrice%20asynchrone%20est%20une,(variable%20suivant%20la%20charge),), Consulté le : 08/09/2020.

[31] : <https://sites.uclouvain.be/energie-plus/index.php?id=11531#c6749>, Consulté le : 08/09/2020.

[32] : <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/electrique/s-2264-fonctionnement-du-moteur-asynchrone-a-induction.php>, Consulté le : 08/09/2020.