

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département
d'Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par :

Melle. IDIR Maria

Melle. RACHI Chahrazad

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Analyse par la méthode des éléments
finis d'un moteur asynchrone alimenté
par un circuit externe

Soutenu le 06 / 07 / 2022 devant le jury composé de :

M'ZIOU	Nassima	Pr	UMBB	Président
ABDSALEM	Djamila	MAA	UMBB	Examineur
HAMEL	Meziane	MCA	UMBB	Encadreur
AOUZELLAG	Haroune	MCB	UMBB	Co-Encadreur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnés durant toutes ces longues années d'études.

Nous remercions en particuliers notre encadreur Mr Meziane Hamel, qui nous a proposé le sujet et guidé le long de ce travail.

Nous remercions également notre co-encadreur Mr Haroune Aouzellag, pour sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils.

Merci au directeur technique de la laiterie et fromagerie de Boudouaou Mr Haloufi, d'avoir accepté de nous encadrées au cours de notre stage pratique à la laiterie.

Nous remercions particulièrement les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A Mes chers parents, pour tout le soutien moral, psychologique
et particulièrement pour l'amour qu'ils me portent. ainsi mon
frere Anis , ma sœur Hana , chers grandes parentes , chers
tante Narimane*

*A mes amis , Sans oublier ma binôme RACHA chahrazad
IDIR Maria*

Je dédie ce travail :

*A Mes chers parents, pour tout le soutien moral ,
psychologique et particulièrement pour l'amour qu'ils me
portent. Ainsi mon frères et mes sœurs et mes nièces : Wassim
.Walid, Tassnim, Dania , Sofia , Eylin , Maissa .*

*A mes amis , Sans oublier ma binôme **IDIR MARIA***

Rachi chahrazad

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	III
Liste des symboles	IV
Introduction générale	IV
Conclusion generale	VIII

Chapitre I : Généralités sur la machines asynchrones

I.1	INTRUCTION.....	3
I.2	Constitutions de la machine asynchrone	3
I.2.1	Le stator.....	4
I.2.2	Le Rotor	4
I.2.2.1	Le rotor à cage.....	4
I.2.2.2	Rotor bobiné	6
I.3	Principe de fonctionnement	7
I.4	Avantages et inconvénient du MAS	8
I.4.1	Avantages du moteur asynchrone.....	8
I.4.2	Inconvénient du moteur asynchrone	8
I.5	Type de Bobinage.....	9
I.5.1	Bobinage imbriqué.....	9
I.5.2	Bobinage ondulé	10
I.5.3	Bobinage concentrique.....	10
I.6	Démarrage des moteurs asynchrones	11
I.6.1	Démarrage sous tension réduite.....	11
I.6.1.1	Démarrage étoile-triangle.....	11
I.6.1.2	Démarrage par autotransformateur	12
I.6.1.3	Démarrage résistif.....	12
I.6.2	Démarrage à tension nominale	12
I.6.2.1	Démarrage rotorique	12
I.7	Entraînements à vitesse variable	12
I.7.1	Coté stator	13

I.7.2	Coté rotor.....	13
I.8	Classification des matériaux selon leurs propriétés magnétiques	14
I.8.1	Les différentes catégories de matériaux magnétiques	15
I.8.2	Modèles d'hystérésis	15
I.9	Conclusion	18
Chapitre II :Modélisation numérique d'une machine asynchrones de 2.2kW		
II.	Introduction.....	20
II.1	Equations de base	20
II.1.1	Formulation électrique $\mathbf{A} - \mathbf{V}$	21
II.2	III. 4. Les équations des machines asynchrone à cage pour différents régions	22
II.3	Méthodes numériques.....	23
II.3.1	La méthode des différences finies	23
II.3.2	La méthode des éléments finis	23
II.3.3	Approximation par la MEF	23
II.3.4	Etapes de résolution par la MEF.....	24
II.4	Méthode des résidus pondérés	24
II.4.1	Principe de la méthode	24
II.4.2	Différentes méthodes déduites des résidus pondérés.....	25
II.4.3	La discrétisation.....	25
II.5	Présentation du logiciel	27
II.6	Présentation de la machine	28
II.7	Simulation de la machine.....	28
II.7.1	La courbe de la première aimantation.....	31
II.7.2	Essai de la machine à vide.....	32
II.7.3	Essai en charge	34
II.8	CONCLUSTION.....	36
Chapitre III: Etude d'un moteur asynchrone alimenté par un circuit externe		
III.	Introduction.....	37
III.1	Les onduleurs	37
III.1.1	onduleur-machine	37

III.1.2 Principe de fonctionnement.....	38
III.1.3 Onduleur MLI.....	38
III.1.4 Contrôle des tensions par MLI	39
III.1.5 Commande de l'onduleur de tension à MLI naturelle	39
III.1.6 Principaux avantages de la M.L.I	41
III.2 Série de Fourier	41
III.2.1 Coefficients de Fourier.....	41
III.3 Présentation de logiciel Simplorer	43
III.4 Applications et résultats.....	43
III.4.1 Application 1 : alimentation par réseau	43
III.4.2 Application 2 : alimentation par un onduleur.....	46
III.5 Conclusion	53
Conclusions general	
Bibliographer	
Résumé	

*Listes des
figures*

Chapitre I

Figure I.1 :Vue éclatée de la machine asynchrone	3
Figure I.2: Stator.....	4
Figure I.3: Rotor a cage.....	5
Figure I.4 :Rotor a cage d'écureuil	6
Figure I.5:Rotor bobine.....	7
Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone	8
Figure I.7:Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases à 2 pôles, 24 encoches	10
Figure I.8: Enroulement ondulé pour une phase d'un moteur à 4pôles, 36 encoches	10
Figure I.9:Enroulement concentrique triphasé à 2 pôles, 24 encoches	11
Figure I.10: Modèles d'hystérésis	17

Chapitre II

Figure II. 1: Domaine d'étude	20
Figure II. 2: Éléments à une dimension	26
Figure II. 3: Éléments à deux dimensions	26
Figure II. 4: Éléments carrés	26
Figure II. 5: Éléments à trois dimensions.....	27
Figure II. 6:l'interface de logiciel ansys électronique.....	28
Figure II. 7: La machine à étudier sous l'environnement Ansys-Maxwell	29
Figure II .8: maillages du moteur	29
Figure II. 9: les lignes de champ.....	30
Figure II.10: distributions du bobinage.....	30
Figure II.11:courbe B-H.....	31
Figure II. 12 :Allure de courants statoriques a vide.....	32
Figure II .13: Allure de vitesse du moteur a vide	33
Figure II .14:Allure de couple du moteur a vide.....	33
Figure II.15:Allure de courant statorique pour une charge de 10 N.m	34
Figure II. 16:Allure de la vitesse pour une charge de 10 N.m.....	34
Figure II.17: Allure de couple de moteur pour une charge de 10 N.m.....	35

Chapitre III

Figure III.1 : Représentation de l'ensemble onduleur –MAS.....	38
Figure III.2 : Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	38
Figure III.3: principe de la commande en MLI	39
Figure III.4 :alimentations de la machine par réseau	43
Figure III.5 : la tension de la machine alimentée par réseau	44
Figure III.6: le courant de la machine alimentée par réseau.....	44
Figure III.7 : la vitesse de la machine alimentée par réseau.....	45
Figure III.8: le couple de la machine alimentée par réseau.....	45
Figure III.9 : le THD de la machine alimentée par réseau	46
Figure III.10 : alimentation de la machine par onduleur	46

Figure III.11 : Tension de la machine alimentée par onduleur	47
Figure III.12 : Tension de la machine par zoom alimentée par onduleur	47
Figure III.13: le courant de la machine alimentée par onduleur	47
Figure III.14: le couple de la machine alimentée par onduleur	48
Figure III. 15: le THD de la machine alimentée par onduleur.....	48
Figure III.16: Alimentation de la machine par onduleur avec une commande MLI sinus-triangle	49
Figure III.17: Programme de la commande sinus-triangle sous Simplorer	49
Figure III.18: Tension de la machine avec une fréquence de la porteuse de 5 kHz.....	50
Figure III. 19: zoom de la tension.....	50
Figure III. 20: Courant de la machine alimentée par onduleur avec la commande MLI.....	51
Figure III. 21: Couple de la machine alimentée par onduleur avec la commande MLI.....	51
Figure III. 22: THD de la machine alimentée par onduleur commande MLI.....	52

*Liste des
tableaux*

Tableau I: Susceptibilité magnétique des principaux types de matériaux magnétiques	15
Tableau II: cahier de charge de la machine à étudier	28

*Liste des
symboles*

MAS: Machine asynchrone

MAS: Machine asynchrone

EDP : équations aux dérivées partielles

MIF : méthodes des équations intégrales de frontières

MDF : la méthode des différences finies

MEF : la méthode des éléments finis

g: glissement

Ω : Vitesse de rotation du champ tournant en rad.s⁻¹

ω : Pulsation des courants alternatifs en rad.s⁻¹

n_s : Vitesse de rotation du champs tournant en trs.s⁻¹

n : La vitesse de rotation de la machine.

f : Fréquence des courants alternatifs en Hz.

p : Nombre de paires de pôles. il peut être calculé par la relation

n : Vitesse en tours par second.

ρ : La densité volumique de charge électrique.

\vec{j} : Le vecteur densité de courant.

\vec{E} : Le vecteur champ électrique.

\vec{B} : Le pseudo vecteur induction magnétique.

ϵ_0 : La permittivité diélectrique du vide.

$\vec{\mu}_0$: La permittivité magnétique du vide

B : induction magnétique (T)

μ_0 : perméabilité du vide (H/m)

χ : susceptibilité magnétique (sans unités)

H : champ magnétique (A/m)

V_{ao} , V_{bo} et V_{co} : les tensions d'entrée de l'onduleur ou tensions continues

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} : les tensions des phases de la charge (valeur alternative)

V_{no} :Tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o »

MLI :Modulation de Largeur d'Impulsion

m :L'indice de modulation

f_p :la fréquence de la porteuse

f_r : la fréquence f_r de la fréquence

r :Le coefficient de réglage en tension

V_m :rapport de l'amplitude V_m de la référence

U_{pm} : tension crête de la porteuse

a_0, a_n, B_n : coefficients de Fourier.

*Introduction
générale*

Introduction générale

L'augmentation croissante de l'utilisation des machines électriques dans diverses applications a grandement contribué à la forte demande d'énergie dans le monde. Afin de limiter l'importante consommation d'énergie et les problèmes d'environnement générés, les solutions d'entraînements électriques plus compacts et à rendement plus élevé sont devenues très recherchées.

Un système d'entraînement électrique comporte, en général, un transformateur d'entrée ou une alimentation électrique, un convertisseur de fréquence, un moteur électrique et la charge entraînée. Le convertisseur de fréquence comprend lui-même un redresseur, un bus continu et un onduleur.

Traditionnellement, dans les systèmes d'entraînements électriques, la machine et le convertisseur sont construits séparément et doivent fonctionner ensemble pour garantir les performances les plus élevées possibles. Mais, de nos jours, la demande incessante de systèmes à grandes performances, à rendement élevé et à faible coût, nécessite une conception qui tienne compte, à la fois, de la structure de la machine et de celle du convertisseur.

Les moteurs à courant alternatif (synchrones, asynchrones, à reluctance variable, ...etc.) ne présentent pas de limitations. D'un coût moindre, ils sont robustes et fiables et peuvent supporter de très fortes puissances et de très hautes vitesses. Par contre, il faut les alimenter avec un convertisseur statique à tension et fréquence variables pour pouvoir envisager leur emploi en vitesse variable.

Parmi les moteurs électriques les plus utilisés, on cite le moteur asynchrone triphasé grâce aux multiples avantages qu'il présente notamment, la simplicité du processus de fabrication, sa robustesse ainsi que son adaptation facile aux équipements de commande tels que les contacteurs et les convertisseurs électroniques qui contribuent à la variation de sa vitesse.

Dans ce mémoire, nous allons étudier un système d'entraînement électrique composé d'un moteur asynchrone, son alimentation et sa charge mécanique. Le moteur asynchrone considéré a une puissance de 2.2 kW et il est modélisé par la méthode des éléments finis pour une prise en compte de l'effet de la géométrie et de la non-linéarité des matériaux.

Introduction générale

Notre manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des informations générales sur la construction et le fonctionnement des moteurs asynchrones. Ainsi que les différents types de démarrage de cette machine.

Le deuxième chapitre, est consacré à l'analyse numérique par la méthode des éléments finis des performances magnétodynamiques d'un moteur asynchrone de 2.2 kW fabriqué par l'entreprise nationale Electro-Industries.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous allons simuler notre système d'entraînement électrique composé du moteur susité, son alimentation et sa charge mécanique. Différentes alimentations seront considérées et une analyse des harmoniques sera faite pour voir l'impact de chaque alimentation sur le comportement du moteur.

Enfin nous présentons une conclusion générale qui résume les résultats de notre travail et les perspectives à aborder dans le futur.

*Généralités sur
la machines
asynchrones*

I.1 INTRODUCTION

De nos jours, le moteur asynchrone (MAS) est le plus utilisé dans le milieu industriel. Son utilisation classique est avant tout l'entraînement des systèmes à vitesse fixe ou variable. Aujourd'hui, avec le contrôle électronique du moteur, cela ouvre un large champ d'utilisation.

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes notions relatives à la construction des machines électriques, et nous nous sommes intéressés plus particulièrement à celles des machines asynchrones, objet de notre étude.

I.2 Constitutions de la machine asynchrone

Une machine asynchrone comprend un stator et un rotor constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

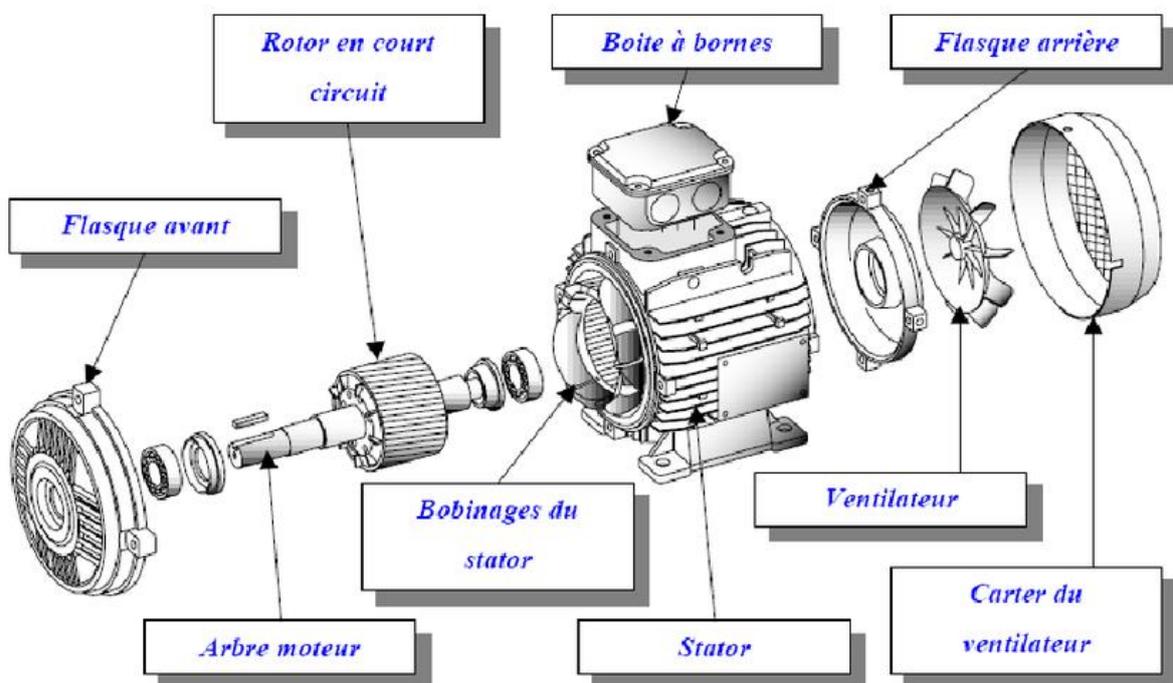


Figure I.1 : Vue éclatée de la machine asynchrone

I.2.1 Le stator

Le Stator (aussi appelé « l'inducteur » de la machine asynchrone est constitué de tôles de fer ou de silicium dont l'épaisseur varie entre 0,35 et 0,50 mm dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques .

Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importantes, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique [05].

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation de synchronisme (vitesse de synchronisme) [06].



Figure I.2: Stator

I.2.2 Le Rotor

Il existe deux types de rotors le rotor à cage d'écureuil (figure1.3) et le rotor bobiné (figure1.4).

I.2.2.1 Le rotor à cage

Le rotor est fait, comme le stator, de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées en une seule pièce et assemblées

sur un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections et montée sur un moyeu [08].

Le rotor n'est relié à aucune alimentation, il tourne à la vitesse de rotation Ω . Il est monté sur l'arbre moteur et se compose d'un cylindre fait des 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 0.2 à 2 mm seulement. Sachant que ce dernier tourne à une vitesse N_n qui est inférieur à la vitesse de synchronisme (celle du stator N_s). Il se compose essentiellement [07].

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.
- D'une cage d'écureuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices

Dans le cas d'un rotor à cage les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium [09].

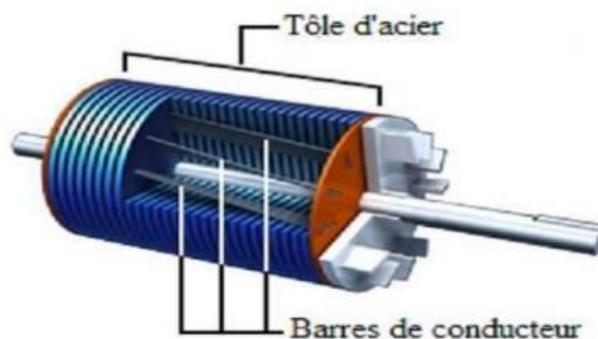


Figure I.3: Rotor a cage

Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible. Il existe différents types de

rotor à cage. Ces derniers dépendent principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera fait [10].



Figure I.4 :Rotor a cage d'écureuil

I.2.2.2 Rotor bobiné

Le rotor bobiné qui supporte trois bobinages similaire à celui du stator, où ces trois bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux même [11] .

Les enroulements rotoriques sont localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Ces enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile (Figure I.5), et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournants et de trois balais fixes [12] .Il offre, cependant les avantages suivants :

- Son courant de démarrage est moins élevé que celui d'un moteur à cage l'orsqu'on intercale trois résistances extérieures dans l'enroulement triphasé du rotor.
- Son couple de démarrage est alors supérieure à celui du moteur à cage ordinaire.
- Sa vitesse peut être réglée au moyen de résistances extérieures.

En plus de convenir aux charges qui demandent une vitesse variable, ce moteur s'adapte parfaitement aux charges qui exigent une période de démarrage prolongée d'un couple de démarrage élevée.



Figure I.5: Rotor bobiné

I.3 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant (Figure I.7). De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur: le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant:

$$\Omega_s = \frac{60 \times f_s}{p} \quad (\text{tr/min}) \quad \text{I.1}$$

Où f_s : la fréquence de tension triphasé du réseau d'alimentation

p : nombre de paires de pole

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (Ω_s) diffère de celle du rotor (Ω_1), c'est-à-dire, lorsque $\Omega_1 \neq \Omega_s$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $\Omega_1 = \Omega_s$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique. Le rapport :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_1}{\Omega_s} \quad \text{I.2}$$

Est appelé glissement d'une machine asynchrone [12].

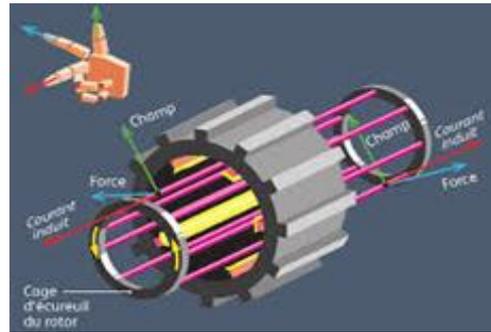
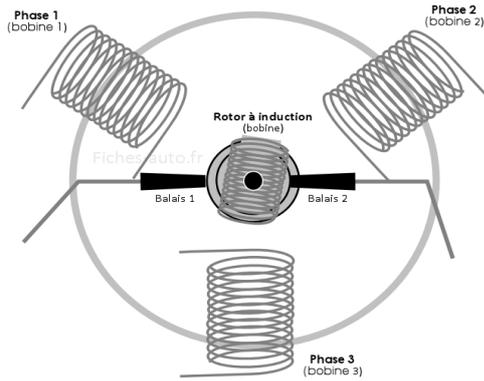


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone .

I.4 Avantages et inconvénient du MAS

I.4.1 Avantages du moteur asynchrone

Il ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone :

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- Il est utilisée pour la réalisation de la quasi
- totalité de l'entraînement à vitesse.

I.4.2 Inconvénient du moteur asynchrone

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone :

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).

- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage [13].

I.5 Type de Bobinage

On peut effectuer le bobinage d'une machine asynchrone de plusieurs façon, la disposition des bobines dans les encoches différentes ces types d'enroulements d'où on trouve habituellement trois types : l'enroulement imbriqué, concentrique et ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications. L'enroulement du stator peut être à une seule couche ou à deux couches, ce dernier nous permet de raccourcir le pas d'enroulement.

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties, les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique.

Les têtes de bobines permettent, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre ; l'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [17].

I.5.1 Bobinage imbriqué

L'enroulement imbriqué est le type de bobinage le plus employé dans les stators des moteurs triphasés des moyennes et grandes puissances. Mais on utilise le plus souvent l'enroulement à deux couches. Chaque bobine est formée de la moitié de conducteurs contenus dans une encoche et disposés de façon que l'un des cotés de la bobine soit dans le haut d'une encoche et l'autre dans le fond. Puisque les bobines n'occupent que la moitié d'une encoche, on peut en modifier leurs largeurs et les placées dans une paire d'encoches normale. Les bobines sont habituellement de largeurs réduite et donnent un pas dit raccourci. Cette configuration complique le bobinage, mais présente l'avantage d'atténuer les harmoniques de l'onde de flux et d'améliorer le comportement du moteur [17].

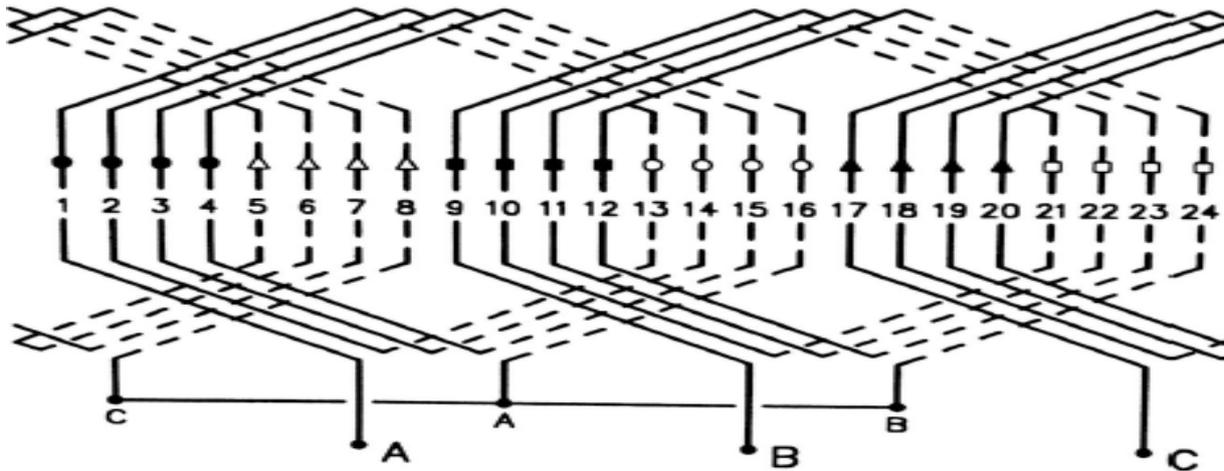


Figure I.7:Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases à 2 pôles, 24 encoches

I.5.2 Bobinage ondulé

L'enroulement ondulé est habituellement un bobinage à deux couches. Il doit être équilibré de point de vue électrique, c'est-à-dire que le nombre d'encoches actives doit être un multiple du produit du nombre de pôles et du nombre de phases. Dans ce type d'enroulement, les conducteurs qui occupent des phases analogues sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. Le circuit fait le tour du stator ou du rotor une ou plusieurs fois, allant d'un pôle à un autre sans revenir [17].

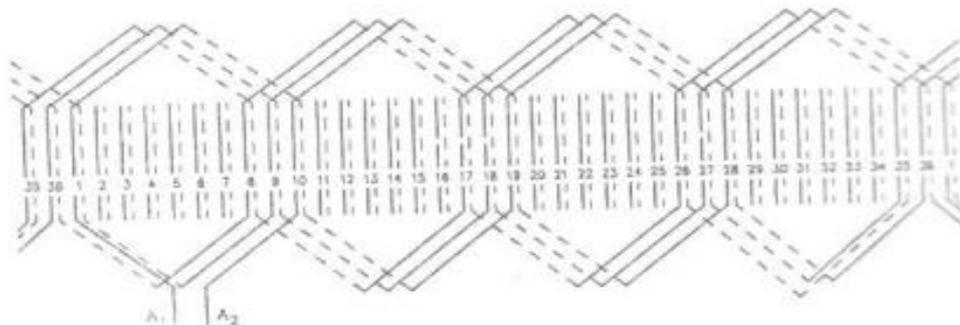


Figure I.8: Enroulement ondulé pour une phase d'un moteur à 4 pôles, 36 encoches

I.5.3 Bobinage concentrique

D'une façon globale, le bobinage concentrique est destiné pour les applications de grandes puissances, ou un nombre important de paires de pôles est nécessaire. Ce type de

bobinage permet d'éviter les courts-circuits entre les trois bobines, ce qui simplifie la construction du stator [17].

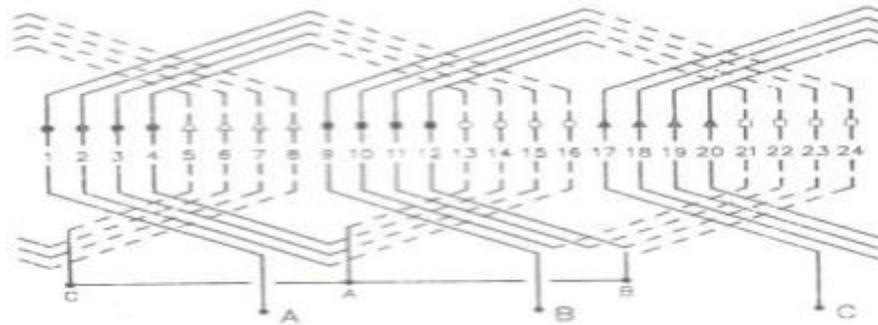


Figure I.9:Enroulement concentrique triphasé à 2 pôles, 24 encoches

I.6 Démarrage des moteurs asynchrones

Lors d'un démarrage d'un moteur asynchrone, le courant peut atteindre huit fois le courant nominal de la machine. Si l'application utilise un variateur, ce dernier se chargera d'adapter les tensions appliquées au moteur afin de limiter ce courant. En absence de variateur de vitesse, il existe plusieurs méthodes permettant de limiter le courant de démarrage, elles ont été développées avant l'application d'électronique de puissance, mais sont encore utilisées de nos jours dans les installations anciennes ou par mesure d'économie pour des applications ne nécessitant pas de variateur en dehors de démarrage [16].

I.6.1 Démarrage sous tension réduite

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité des courants de démarrage. L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle le moteur atteint le régime permanent [16].

I.6.1.1 Démarrage étoile-triangle

Lors d'un démarrage étoile-triangle, le moteur est d'abord connecté au réseau avec un couplage étoile, puis une fois démarré on passe sur le couplage triangle. Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par la racine carrée de trois la tension appliquée ; ainsi le courant maximal absorbé est de trois fois plus faible que lors d'un démarrage direct

avec un couplage triangle. Le couple de démarrage est lui aussi trois fois plus faible que lors d'un démarrage en triangle. La surintensité lors du passage étoile-triangle est inférieure au courant d'appel d'un démarrage effectué directement en triangle, réalisée simplement à l'aide des contacteurs, cette méthode de démarrage est très économique [16] .

I.6.1.2 Démarrage par autotransformateur

Dans ce mode de démarrage, le stator du moteur est relié à un autotransformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. La tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépasse pas la valeur maximale désirée [16] .

I.6.1.3 Démarrage résistif

Lors d'un démarrage résistif, on insère des résistances en série avec les enroulements statoriques, ce qui a pour effet, limiter la tension à leurs bornes. Une fois le démarrage est effectué on court-circuite ces résistances. Cette opération peut être effectuée progressivement par un opérateur à l'aide de rhéostat de démarrage [16] .

I.6.2 Démarrage à tension nominale

I.6.2.1 Démarrage rotorique

Lors d'un démarrage rotorique, des résistances de puissances sont insérées en série avec les enroulements du rotor. Ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacts glissants (bagues et balais), permettent des connexions électriques des enroulements rotoriques. Ces machines sont de prix de revient plus important [16] .

I.7 Entraînements à vitesse variable

La variation de la vitesse des moteurs asynchrones est assez difficile en générale parce que ces moteurs sont déjà préréglés. Seulement avec l'apparition de l'électronique de puissance, il est possible d'agir et de modifier la vitesse. Pour faire varier la vitesse d'une machine asynchrone, deux actions sont possibles ; action sur le stator ou action sur le rotor .

I.7.1 Coté stator

- Modification du nombre de paires de pôles : Ceci donne une variation non continue de la vitesse. Ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré [14].
- Changement de la tension appliquée au moteur :
Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un gradateur triphasé [14].
- Changement de la fréquence du réseau :
La fréquence de rotation de la machine étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statorique, on essaiera de créer pour ces enroulements un réseau à fréquence variable ce sont les onduleurs de tension. On peut aussi chercher à injecter des courants dans les enroulements pour imposer le couple de la machine ce sont les onduleurs de courant ou commutateurs de courant. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 à 1/3 de la fréquence réseau) à l'aide d'un cyclo convertisseur à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence en courant ou vectoriellement [14].

I.7.2 Coté rotor

- Variation des résistances rotoriques (action sur le glissement) :
L'utilisation de résistances rotoriques permet un réglage de la vitesse de la MAS au dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor c'est la cascade hypo synchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné [14].
- Variation de fréquences de convertisseur rotorique :
Alors que pour la MAS comme on l'a vu précédemment on agit par la variation de la fréquence du convertisseur qui alimente le rotor.

I.8 Classification des matériaux selon leurs propriétés magnétiques

L'utilisation d'un matériau magnétique doux dans une machine électrique vise à canaliser le flux magnétique pour maximiser la conversion d'énergie. Les matériaux sont classés selon quatre types sur la base de leur comportement en présence d'un champ magnétique d'excitation. Cette réaction est mesurée par l'induction qui est la quantité de flux magnétique par unité de surface [18]. L'équation permettant de relier l'induction au champ magnétique

est :

$$B = \mu_0(1 + \chi)H \quad \text{I.3}$$

B : induction magnétique (T)

μ_0 : perméabilité du vide (H/m)

χ : susceptibilité magnétique (sans unités)

H : champ magnétique (A/m)

La relation I.3 permet de remarquer que l'induction pour un champ magnétique donné est d'autant plus grande que la susceptibilité est élevée. Cette propriété est recherchée et exploitée lors de la réalisation du circuit magnétique d'une machine électrique. La susceptibilité magnétique est en réalité un tenseur mais dans cette partie, on la considère comme une grandeur scalaire car on ne s'intéresse pas à sa variation en fonction de la direction de propagation du flux magnétique [18]. Sur la base du comportement en présence d'un champ magnétique d'excitation, il existe quatre principaux types de matériaux:

- les matériaux diamagnétiques
- les matériaux paramagnétiques
- les matériaux ferrimagnétiques
- les matériaux ferromagnétiques

Les valeurs typiques de susceptibilité rencontrées pour ces types de matériaux ainsi que quelques exemples de matériaux représentatifs sont présentés au tableau I.1 [18].

Type de matériau	Susceptibilité magnétique (sans unité)	Exemples
Diamagnétique	$\sim -1 \times 10^{-5}$	Cu, Au
Ferrimagnétique	~ 3000	FeO, MnO, ZnO
Ferromagnétique	50 à 10000	Fe, Ni, Co
Paramagnétique	10^{-5} à 10^{-3}	Al, Pt

Tableau I: Susceptibilité magnétique des principaux types de matériaux magnétiques

I.8.1 Les différentes catégories de matériaux magnétiques

Les matériaux diamagnétiques et paramagnétiques

a- Les matériaux diamagnétiques (eau, plomb, cuivre...) et paramagnétiques (lithium, aluminium, ...) ont des susceptibilités magnétiques χ très faibles ($|\chi| < 10^{-3}$) qui sont respectivement négatives et positives. D'un point de vue magnétique, on assimile le comportement de ces matériaux à celui de l'air [19].

b- Les matériaux ferromagnétiques

Les matériaux ferromagnétiques sont ceux qui présentent un intérêt pour la conversion d'énergie, notamment dans les machines électriques. Ces matériaux possédant des susceptibilités magnétiques χ significatives ($\chi \gg 1$), ils permettent de canaliser et d'amplifier efficacement l'induction magnétique qui est nécessaire pour assurer une conversion d'énergie à forte densité. La structuration en domaines magnétiques et le comportement de ces matériaux sont développés dans les parties suivantes [19].

I.8.2 Modèles d'hystérésis

Les modèles d'hystérésis peuvent être classés en deux groupes

- Un premier groupe appelé modèles d'hystérésis physiques qui reposent sur des théories physiques des phénomènes. Il comprend, entre autres, le modèle Jiles-Atherton, le modèle basé sur le frottement sec et le modèle basé sur l'énergie. Tous expliquent l'hystérésis par la

présence de sites d'ancrage dans les matériaux ferromagnétiques, même si, la dérivation du modèle final à partir de cette idée se traduit différemment dans ces trois modèles .

- Un second groupe appelé modèles d'hystérésis phénoménologiques qui se base sur la mise en équation empirique de phénomènes phénoménologiques. Le modèle Preisach, le modèle Play and Stop et le nouveau modèle statique Loss-Surface sont les principaux représentants de ce groupe. Ils sont construits soit sur la superposition d'opérateurs d'hystérésis simples, soit sur la généralisation des observations expérimentales [20] .

Les modèles d'hystérésis sont tous initialement des modèles statiques, c'est-à-dire sans prise en compte de la variation temporelle de l'excitation. Afin d'obtenir une précision optimale, ils nécessitent tous un ensemble de cycles d'hystérésis mesurés dans des conditions quasi-statiques. Le comportement dynamique de ces matériaux est ensuite pris en compte par diverses approches. Nous ne citerons ici que les quatre principales approches. La contribution dynamique se base :

1. Soit sur la présence des courants de Foucault et peut être analysée en résolvant l'équation de la diffusion magnétique généralement en supposant un matériau homogène de perméabilité constante ;
2. Soit sur les termes classiques et les termes excédentaires du modèle de Bertotti ;
3. Soit sur l'introduction d'un décalage entre le champ magnétique \mathbf{H} et l'induction \mathbf{B} par un terme dérivé de \mathbf{B} (analogie avec la viscosité) [20] .
4. Soit sur un concept expérimental, appelé surface dynamique, qui met en relation le champ dynamique avec la valeur instantanée et le taux de variation de l'induction \mathbf{B} .

Les paragraphes suivants proposent de revenir sur les théories de chacun des modèles cités, en commençant par celui de Jiles Atherton qui reste le plus connu [20] .

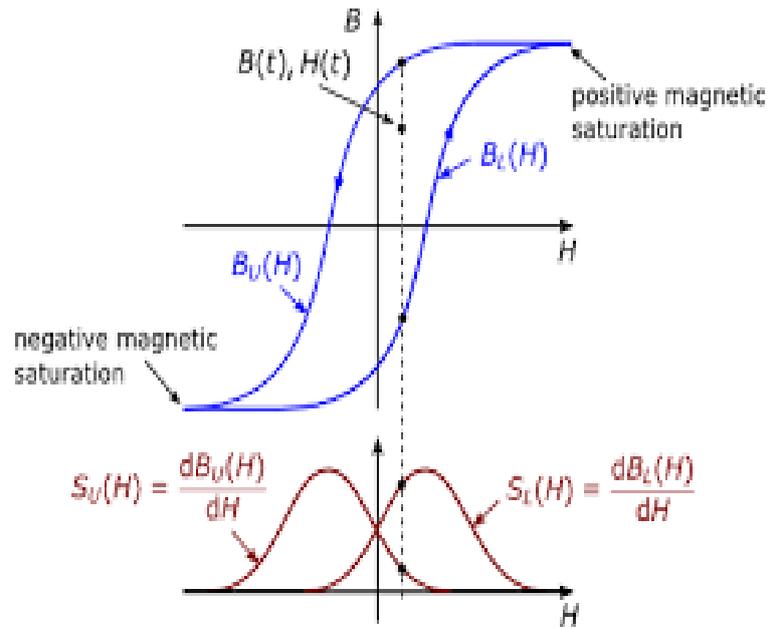


Figure I.10: Modèles d'hystérésis

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié la constitution générale d'une machine asynchrone, son rôle et son principe de fonctionnement. Ensuite, on a également vu les types de démarrage de la machine asynchrone et les types de bobinage ainsi la Classification des matériaux selon leurs propriétés magnétiques.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la modélisation numérique des machines asynchrones.

*Modélisation
numérique
d'une
machine
asynchrone
de 2.2 kW*

II. Introduction

Le fonctionnement des machines électriques est basé essentiellement sur les phénomènes de distribution spatio-temporelle du champ magnétique. Bien que l'aspect électrostatique intervienne dans des isolations diélectriques, il ne présente pas le même degré d'acuité que les aspects magnétiques. Le calcul de ce champ magnétique affecte directement la taille et les performances de la machine [22].

Dans ce qui suit, nous allons présenter les notions relatives à la modélisation numérique des moteurs asynchrones.

II.1 Equations de base

Nous considérons dans ce chapitre un système composé d'air, de matériaux ferromagnétiques et conducteurs. L'ensemble du système forme le domaine d'étude Ω de frontière Γ et les milieux conducteurs forment le domaine Ω_c avec $\Omega_c \subset \Omega$ Figure (II.1).

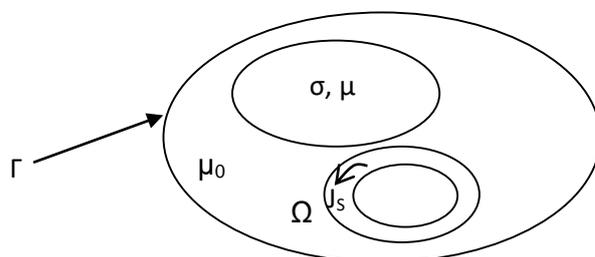


Figure II. 1: Domaine d'étude

L'ensemble des phénomènes électromagnétiques est régi par les équations de Maxwell. Celles-ci constituent un système d'équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques aux phénomènes électriques [24].

- **Maxwell-Gauss:**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{II.1})$$

- **Maxwell-Faraday:**

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

- **Conservation du flux**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

- **Maxwell-Ampère:**

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

L'équation (II.4) est une généralisation de la loi d'Ampère, i.e. $\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J}$. Elle constitue avec (II.2) les équations dites de couplage électromagnétique, alors que les équations (II.1) et (II.3) constituent des équations dites de conservation.

Les deux types de champs de vecteurs sont liés par les relations constitutives, dites lois de comportement, décrivant les caractéristiques des matériaux. Sans elles, le système serait indéterminé. Elles sont données généralement sous les formes suivantes :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad \text{II.5}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad \text{II.6}$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad \text{II.7}$$

Dans la plupart des problèmes d'électrotechnique, aux fréquences mises en œuvre, les courants de déplacement introduits par le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ sont négligés, le système est alors quasi-stationnaire. Dans ces conditions, on obtient la forme locale du théorème d'Ampère

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} \quad \text{II.8}$$

Ce qui induit la conservation de la densité de courant :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad \text{II.9}$$

II.1.1 Formulation électrique $\vec{A} - V$

Ce modèle de formulation utilise le potentiel vecteur magnétique \vec{A} dans tout le domaine incluant les régions conductrices et non conductrices et le potentiel scalaire électrique uniquement dans les régions conductrices [25].

En reprenant l'équation (II. 3), on peut montrer que l'induction magnétique \vec{B} peut être considérée comme le rotationnel d'un potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \quad \text{II.10}$$

De même en remplaçant (II.14) dans (II.2) on obtient :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad \text{II.11}$$

A partir de la relation précédente, nous pouvons définir un potentiel scalaire électrique v donné par la relation :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla}V \quad \rightarrow \quad \vec{E} = -\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad \text{II.12}$$

La combinaison des équations (II.16) et (II.7) nous donne :

$$\vec{J} = \sigma \left(-\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad \text{II.13}$$

L'équation magnétodynamique en termes de potentiel vecteur magnétique et en potentiel scalaire électrique s'écrit :

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left(\vec{\nabla}V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad \text{II.14}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \left(\frac{1}{\mu} \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{A} \right) + \sigma \left(+ \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_s \quad \text{II.15}$$

II.2 III. 4. Les équations des machines asynchrone à cage pour différents régions

➤ Au niveau feuille statorique

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] = 0 \quad \text{II.16}$$

➤ Au niveau d'encoches statoriques

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] = \vec{J}_{\text{ext}} \quad \text{II.17}$$

➤ Au niveau d'entrefer

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] = 0 \quad \text{II.18}$$

➤ Au niveau feuille rotorique

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] = 0 \quad \text{II.19}$$

➤ Au niveau des barres rotoriques

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right] + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad \text{II.20}$$

II.3 Méthodes numériques

Les formulations magnétodynamiques précédemment exposées sont des équations aux dérivées partielles sous forme continue. Elles peuvent être résolues par l'une des méthodes numériques suivantes :

La méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments de frontière (BEM), la méthode des intégrales de volume, la méthode des volumes finis (FVM) et la méthode des éléments finis (MEF) [28].

II.3.1 La méthode des différences finies

Historiquement la première, elle consiste à discrétiser le domaine étudié par un réseau de points à mailles rectangulaires et à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs de différences entre les valeurs de l'inconnue en différents points voisins. Si cette méthode est simple à programmer, elle nécessite un maillage régulier qui s'adapte mal aux géométries complexes [28].

II.3.2 La méthode des éléments finis

Elle est basée sur la transformation des équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Elle est bien utilisée lorsque l'excitation s'effectue à basse ou moyenne fréquence.

Nous ne nous intéressons qu'à la méthode des éléments finis malgré son coût en occupation mémoire et en temps d'exécution, cette méthode présente des avantages tels que la robustesse ou la précision [29].

II.3.3 Approximation par la MEF

La méthode des éléments fins a largement été présentée dans la littérature scientifique. Elle consiste en une double discrétisation : une discrétisation spatiale (maillage du domaine) et une discrétisation des champs. La discrétisation spatiale permet de définir les fonctions de base (scalaires ou vectorielles) donnant naissance aux sous-espaces d'approximation des espaces continus (espaces dans lesquels se trouvent les champs). La discrétisation des champs consiste en la discrétisation de l'équation différentielle et des conditions aux limites pour

obtenir un système algébrique où la vectrice solution de ce système contient les valeurs approximatives des champs sur les points du maillage [29].

De façon générale, les problèmes de magnétodynamique formulés sur un domaine de frontière peuvent s'exprimer sous la forme suivante :

$$L(u) = f \quad \text{Dans } \Omega \quad \text{II.21}$$

$$M(u) = g \quad \text{Sur } \Gamma \quad \text{II.22}$$

Où L et M sont des opérateurs différentiels, f et g des fonctions connues et u la variable (inconnue) recherchée.

II.3.4 Etapes de résolution par la MEF

D'une façon générale, la résolution par la MEF inclut les étapes suivantes :

- Obtention de la formulation variationnelle du problème et définition des espaces fonctionnels de solutions admissibles.
- Réalisation d'un maillage, correspondant à la discrétisation du domaine d'étude en éléments (triangles, tétraèdres, hexaèdres...) sur lesquels les champs sont écrits en termes d'un nombre fini de degrés de liberté et de fonctions de base à support local
- Calcul des matrices élémentaires qui, après assemblage, génèrent un système matriciel creux.
- Résolution du système algébrique pour l'obtention d'une solution approchée du problème.

II.4 Méthode des résidus pondérés

II.4.1 Principe de la méthode

La méthode des résidus pondérés est donnée par la formule suivante :

$$R = L(A) - f_V \quad \text{II.23}$$

A l'aide de fonctions de pondération bien choisies, on impose à l'intégrale du 3

Résidu de s'annuler en n points du domaine Ω :

$$\int_{\Omega} R_i \cdot \phi_i \cdot d\Omega = 0 \quad \text{II.24}$$

Les valeurs de A qui permettent d'annuler l'intégrale, sont solution du système algébrique obtenu.

II.4.2 Différentes méthodes déduites des résidus pondérés

Le choix des fonctions de pondération appelées aussi fonctions de projection, conduit à plusieurs méthodes. Parmi celles-ci nous citerons :

- La méthode de collocation par point.
- La méthode des moindres carrés.
- La méthode de Galerkin.

La méthode de collocation par point utilise les fonctions de Dirac comme fonction de pondération, la méthode des moindres carrés est basée sur la minimisation de la norme quadratique de l'erreur sur l'équation et les conditions aux limites. La méthode de Galerkin consiste à choisir des fonctions de projection identiques aux fonctions d'approximation [29].

Contrairement à la méthode variationnelle. La méthode des résidus pondérés ne nécessite pas la connaissance au préalable, de la fonctionnelle d'énergie du système.

Dans le cas de l'utilisation de la méthode de Galerkin, on obtient un système algébrique symétrique facile à résoudre

On se limitera dans ce qui suit, à la méthode projective de Galerkin qui est utilisée dans le cadre de ce travail.

II.4.3 La discrétisation

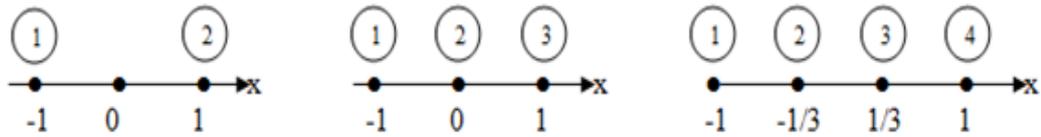
L'approche de base de la méthode des éléments finis est de subdiviser le domaine d'étude en un nombre finis de sous domaines appelés éléments. L'approximation de l'inconnue se fait en chaque élément à l'aide des fonctions d'interpolation. La fonction d'interpolation est aussi définie en fonction de la géométrie de l'élément qu'on choisit préalablement et coïncide avec les nœuds de cet élément relatifs aux valeurs de l'inconnue. On parle alors d'interpolation nodale [28].

➤ **Éléments finis réels**

Pour des domaines d'étude à une, deux ou trois dimensions, des éléments classiques peuvent être définis selon le degré de la courbe d'interpolation qui lui est associés. On rencontre généralement, des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

Nous présentons dans ce qui suit quelques éléments :

- **Éléments à une dimension**

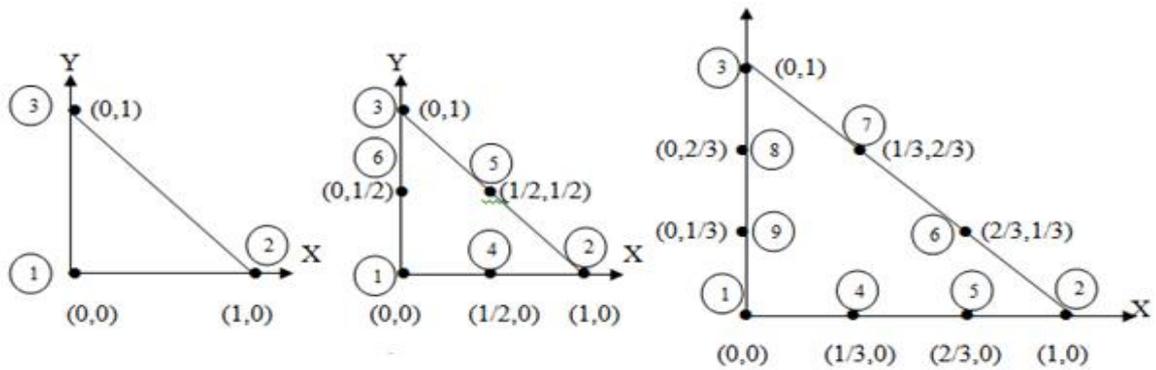


Linéaire (4 nœuds) Quadratique (3 nœuds) Cubique (4 nœuds)

Figure II. 2: Éléments à une dimension

- **Éléments à deux dimensions**

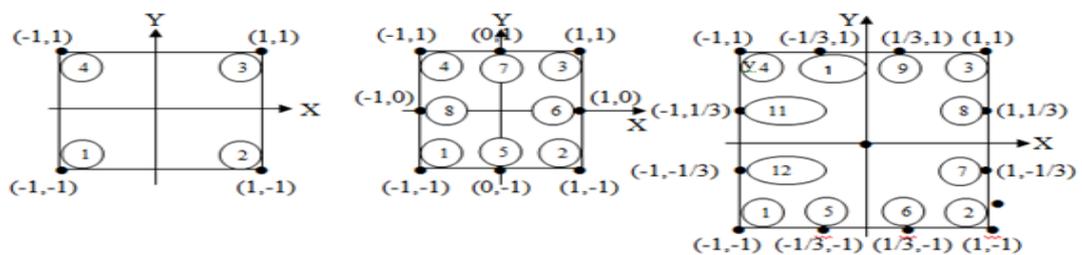
- **Éléments triangulaires**



Linéaire (3 nœuds) Quadratique (6 nœuds) Cubique (9 nœuds)

Figure II. 3: Éléments à deux dimensions

- **Éléments carrés**



Linéaire (4 nœuds) Quadratique (8 nœuds) Cubique (12 nœuds)

Figure II. 4: Éléments carrés

- **Éléments à trois dimensions**

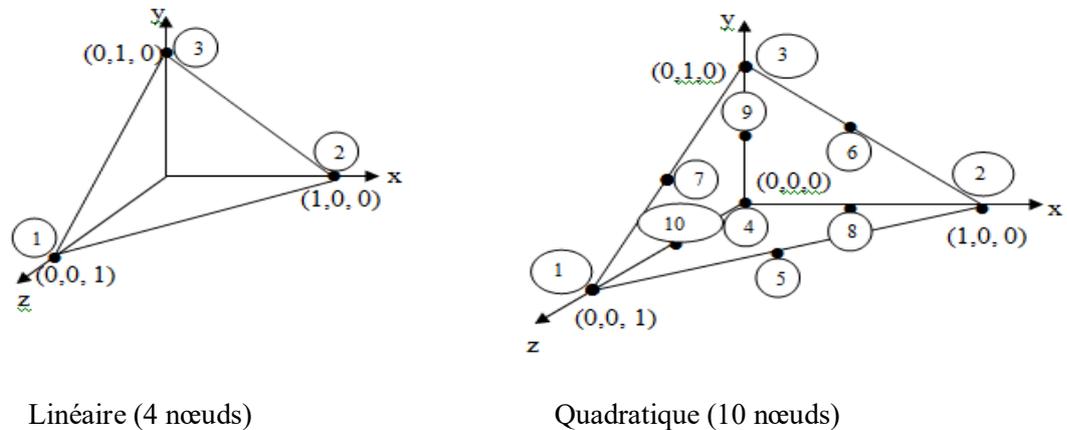


Figure II. 5: Éléments à trois dimensions

II.5 Présentation du logiciel

ANSYS Electronics est une plate-forme unifiée pour la simulation des circuits électriques et les systèmes électromagnétiques. Elle intègre plusieurs simulateurs comme ANSYS HFSS, Q3D Extractor, Simplorer et Maxwell qui nous permettent la simulation multiphysique des systèmes industriels [30].

Le simulateur ANSYS Maxwell est un outil de simulation du champ électromagnétique et leader dans l'industrie pour la conception et l'analyse des moteurs électriques, actionneurs, capteurs, transformateurs et autres dispositifs électromagnétiques et électromécaniques. Avec Maxwell, vous pouvez caractériser avec précision le mouvement transitoire des composants électromécaniques et leurs effets sur la conception du circuit d'entraînement et du système de commande.

Grace aux solveurs des champs électromagnétiques avancés de Maxwell reliés aux outils de simulation de circuits électriques, vous pouvez comprendre la performance des systèmes électromécaniques bien avant de fabriquer le prototype physique [31-32].

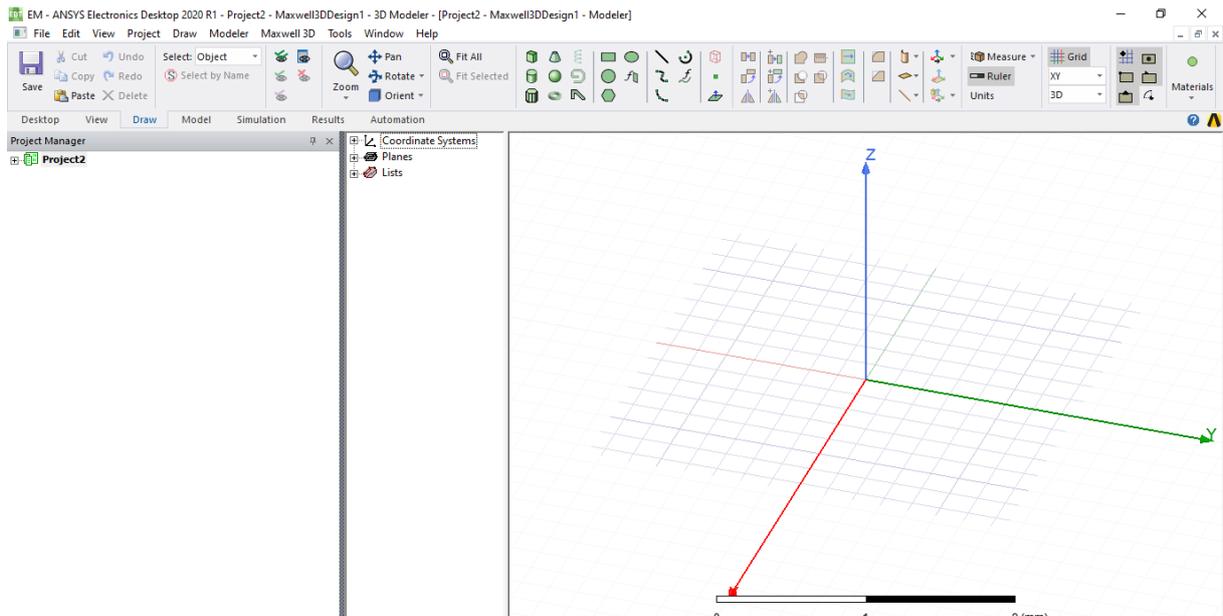


Figure II. 6: l'interface de logiciel ansys électronique

II.6 Présentation de la machine

La machine étudiée est une machine asynchrone à simple cage, de puissance de 2.2 kW, fabriquée à l'entreprise Electro-Industries de d'Azazga. Le cahier de charge de la machine est donné par le tableau IV.1 :

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Puissance nominal	P_n	2.2	kW
La fréquence	f_l	50	Hz
Tension nominal	U_n	400	V
Vitesse de rotation	n_r	1405	tr/min
Facteur de puissance	cos	0.85	
Courant nominal	I_n	4.7	A
Couplage	Δ	-	-
Couple nominal	C_n	15	N/m

Tableau II: cahier de charge de la machine à étudier

II.7 Simulation de la machine

La figure (II.7) représente la géométrie de notre moteur sous l'environnement Ansys Maxwell. Après avoir introduit les dimensions géométriques, les matériaux et construit le bobinage, la machine sera ensuite simulée à vide et en charge.

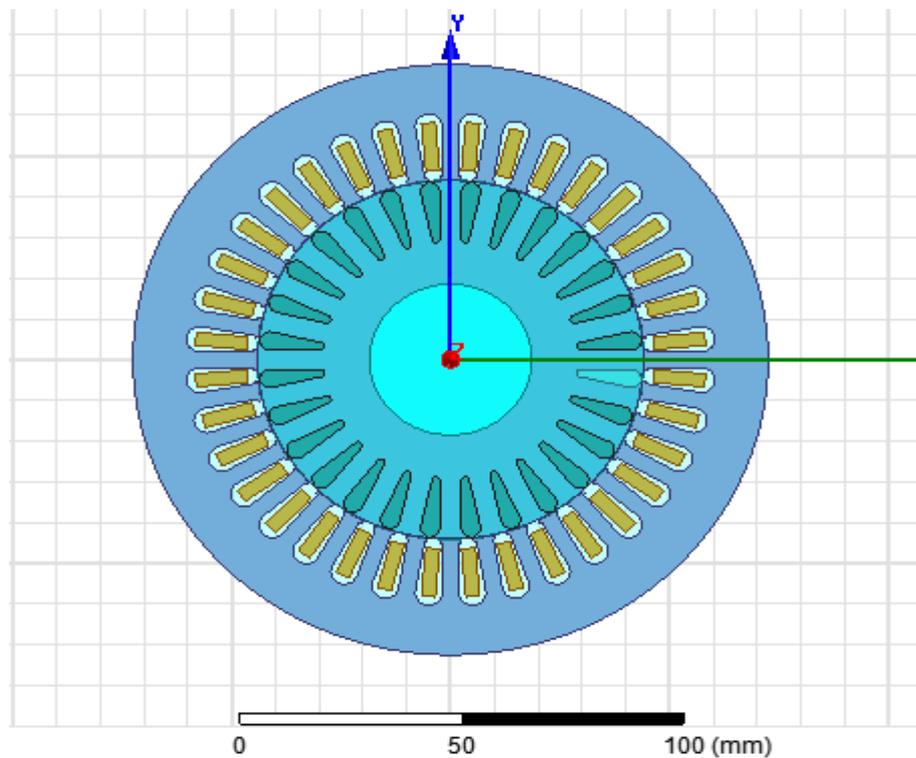


Figure II. 7: La machine à étudier sous l'environnement Ansys-Maxwell

La figure (II.8) représente le maillage du moteur, ce dernier est plus fin au niveau de l'entrefer et au niveau des barres rotoriques pour un meilleur calcul des grandeurs électromagnétiques.

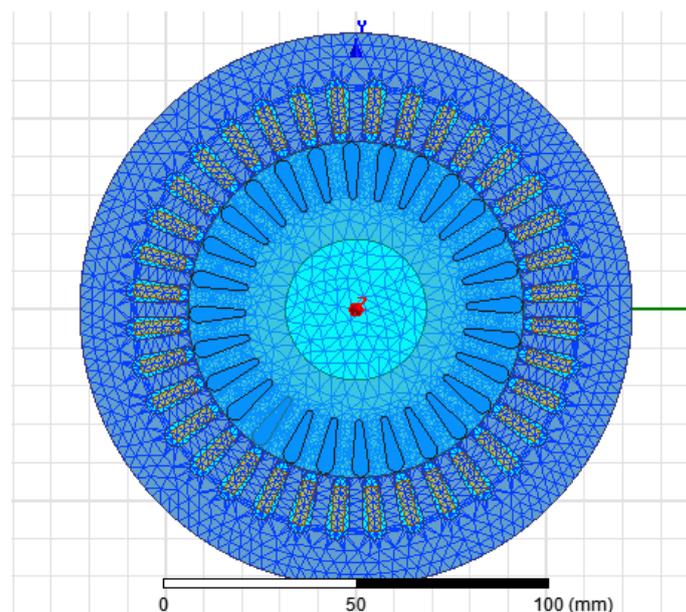


Figure II .8: maillages du moteur

La figure (II.9) représente la répartition des lignes de champs de la machine asynchrone.

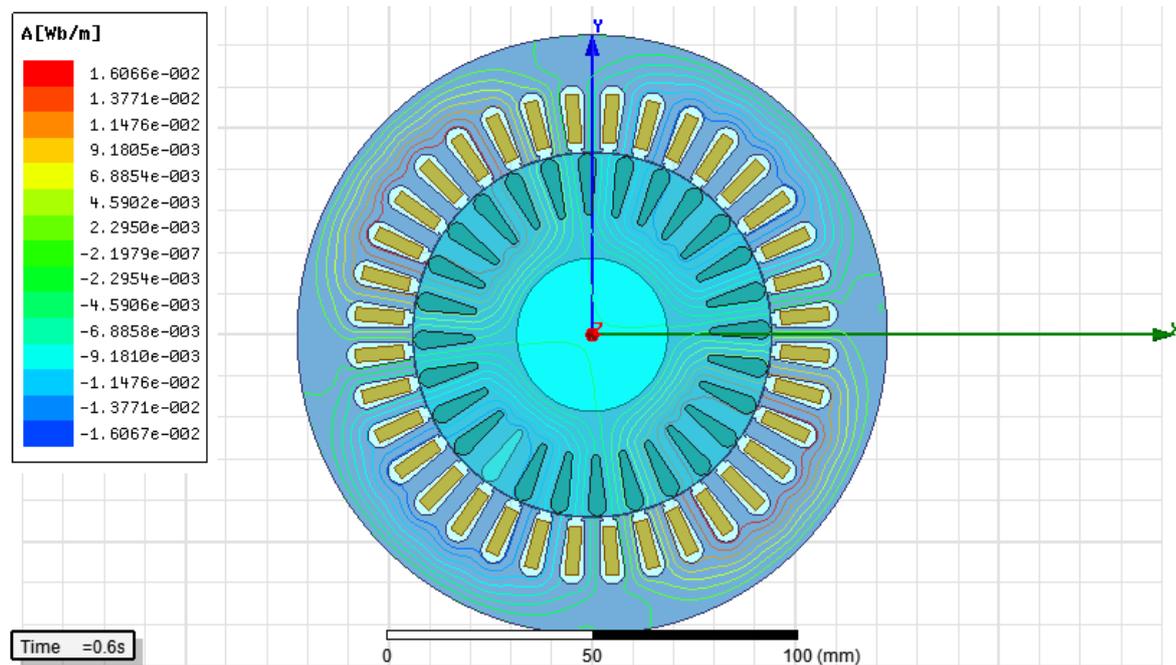


Figure II. 9: les lignes de champ

Après avoir calculé les paramètres du bobinage, ils ont été introduits dans le logiciel pour la construction de ce dernier. La distribution obtenue est représentée sur la figure (II.10)

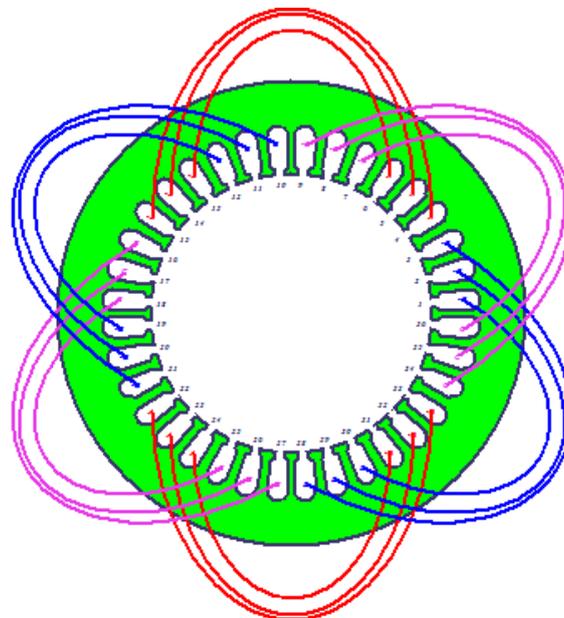


Figure II.10: distributions du bobinage

II.7.1 La courbe de la première aimantation

La courbe B-H est la courbe caractéristique des propriétés magnétiques d'un matériau, elle indique comment le matériau réagit à un champ magnétique externe et constitue une information essentielle lors de la conception de circuit magnétique des machines électriques. La tôle utilisée pour la fabrication du circuit magnétique de notre moteur est de type Fer-Si a gaine non orientés présente sous forme d'un modèle nommé **M800-50A**, sa signification est comme suit :

M : Matériau magnétique.

800 : centuple de perte spécifique en [W/Kg].

50 : centuple de l'épaisseur en [mm].

A : tôle isolée.

La courbe de première aimantation est obtenue après la saisie des valeurs acquises de l'expérimentation comme le montre la figure ci-dessous :

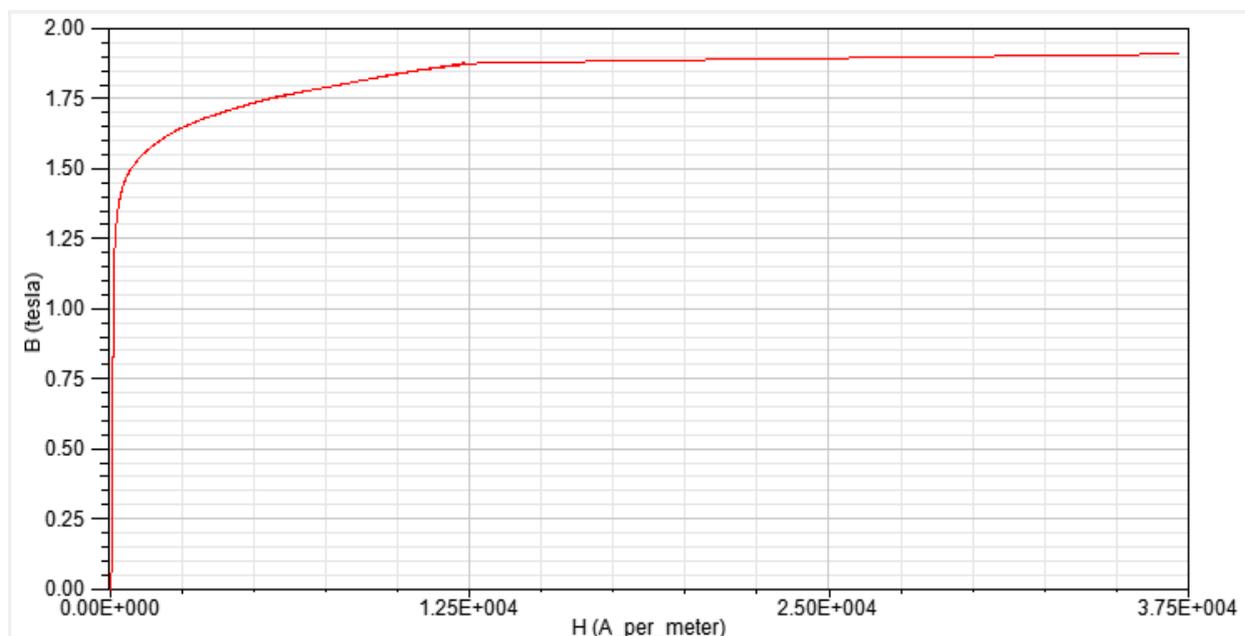


Figure II.11: courbe B-H

II.7.2 Essai de la machine à vide

Lors de cet essai, nous visualisons la variation des paramètres de la machine asynchrone tels que le courant, la vitesse et le couple en fonction de temps (régime transitoire et permanent).

Dans un premier temps, nous avons simulé le comportement de notre moteur pour un fonctionnement à vide. Le moteur est couplé en triangle sous une tension de 400 Volts entre phases. Les résultats obtenus sont donnés par les graphes suivants :

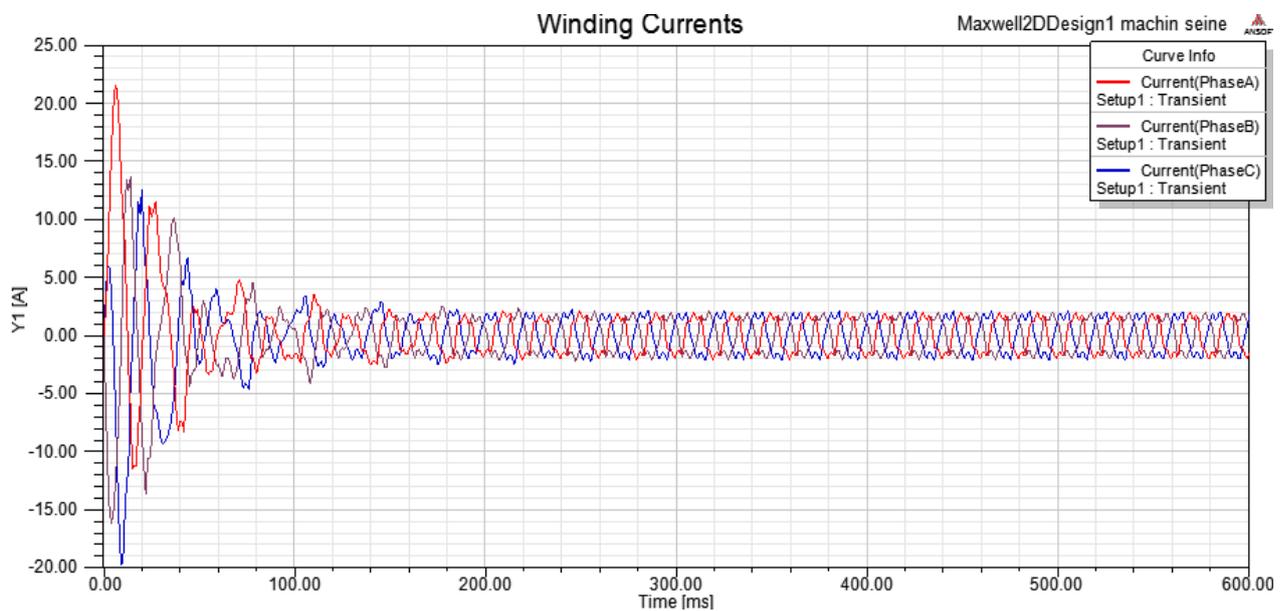


Figure II. 12 :Allure de courants statoriques a vide

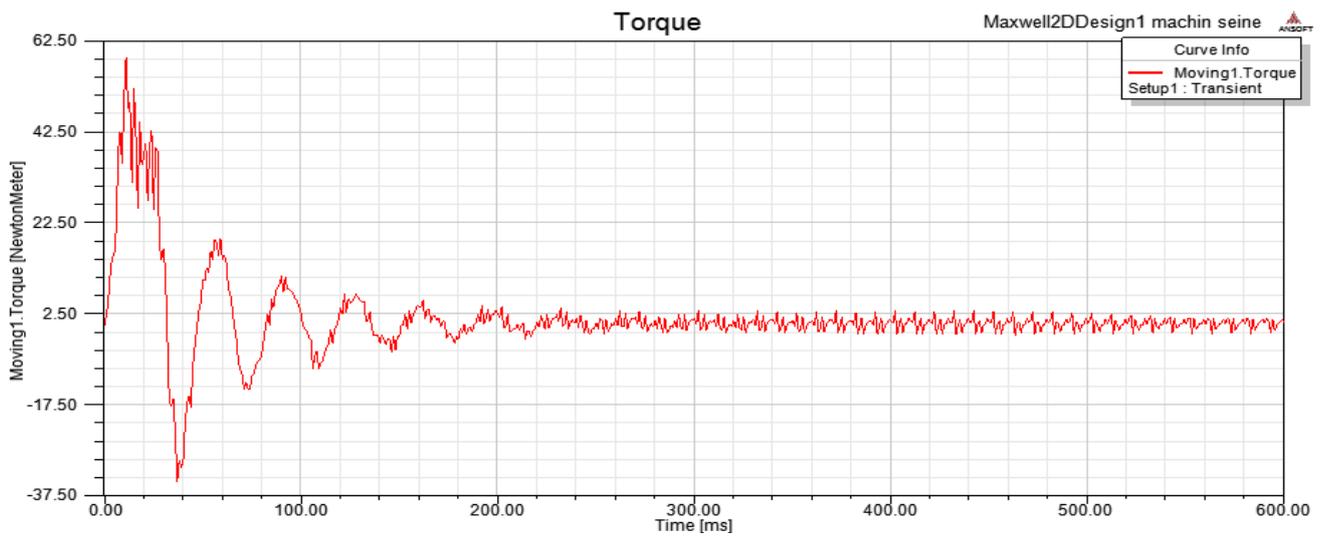


Figure II .13: Allure de couple du moteur a vide

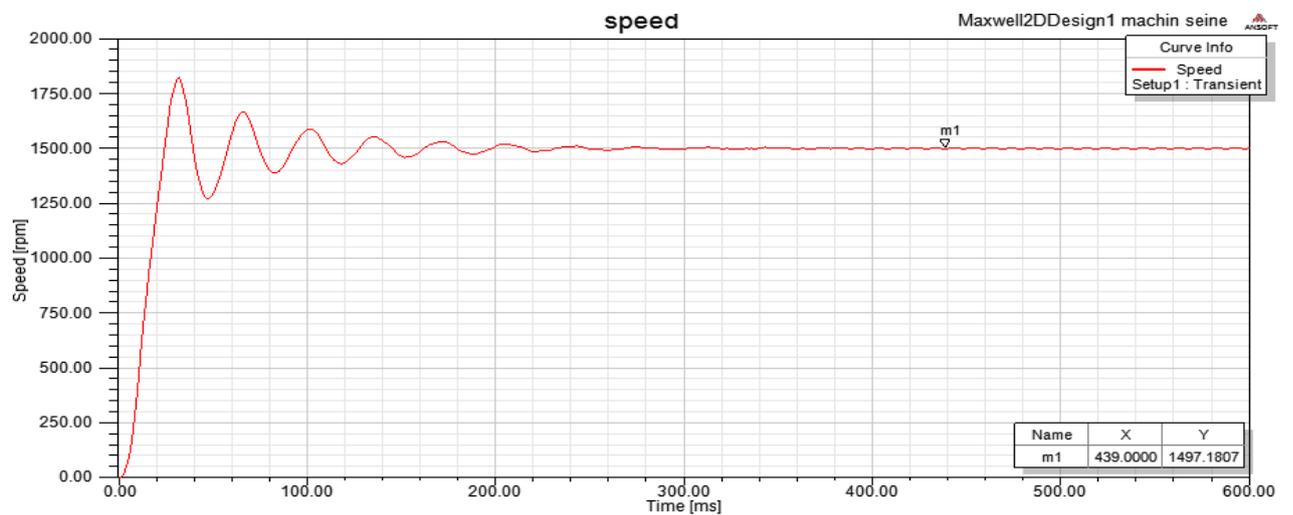


Figure II .14: Allure de vitesse du moteur a vide

II.7.3 Essai en charge

Le moteur est maintenant chargé. Ce dernier entraîne une charge résistive qui s'oppose au mouvement de rotor. Nous avons représenté les courbes : courant, vitesse et couple et ce pour une valeur du couple de charge de 10 N.m

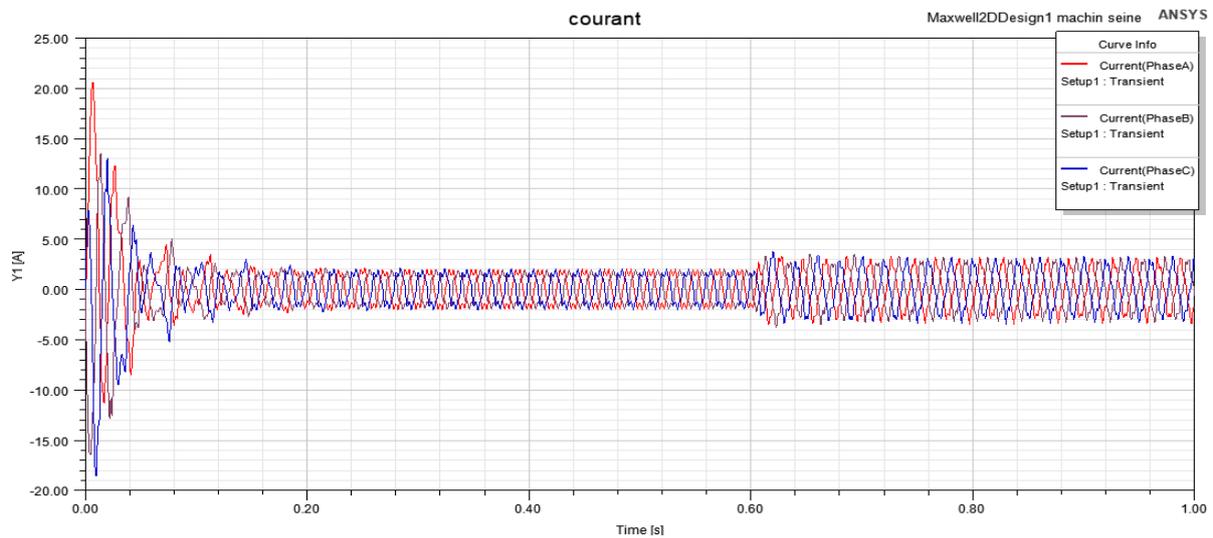


Figure II.13: Allure de courant statorique pour une charge de 10 N.m

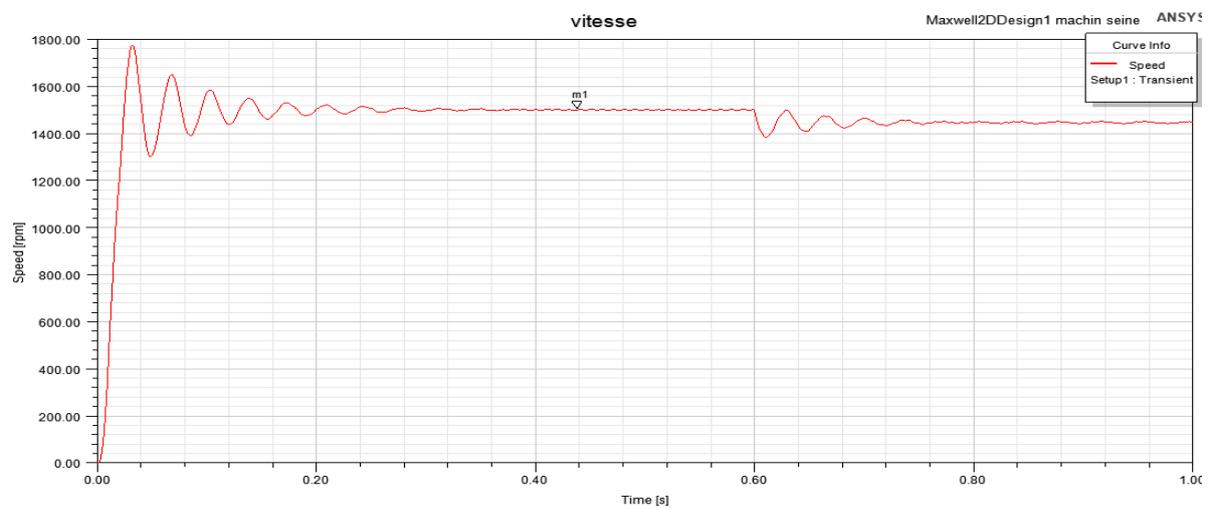


Figure II. 14: Allure de la vitesse pour une charge de 10 N.m

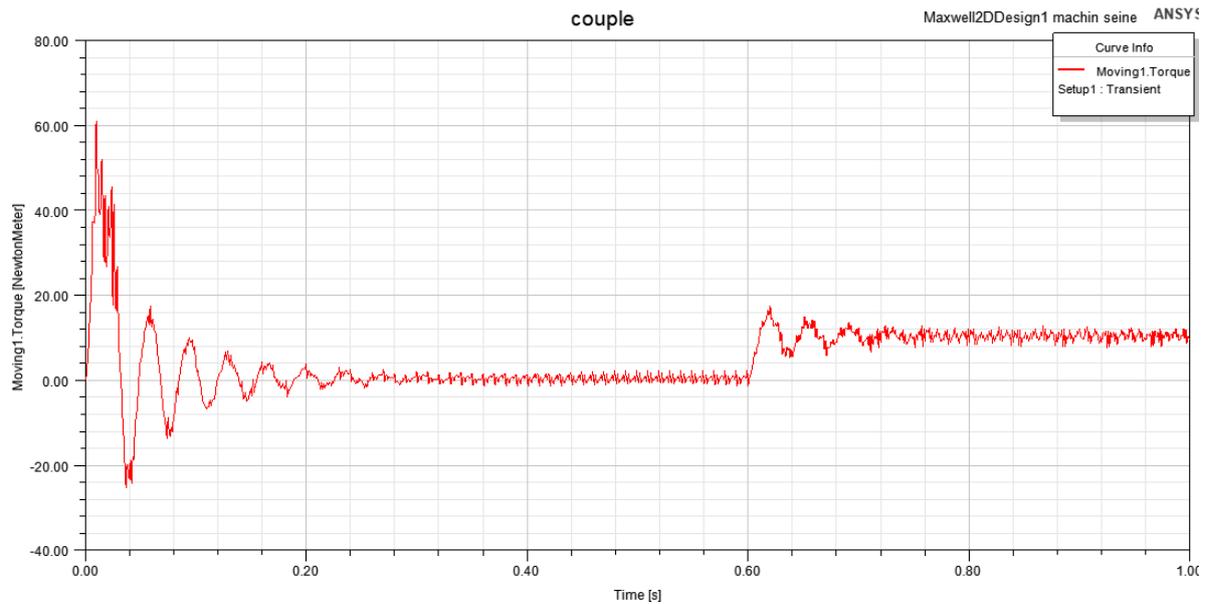


Figure II.15: Allure de couple de moteur pour une charge de 10 N.m

Le moteur tourne à une vitesse voisine de la vitesse synchrone lorsqu'il n'est pas chargé. Quand on le charge, il ralentit. Le champ tournant coupe alors les barres du rotor à une vitesse relative plus grande. Il en résulte que la tension induite et le courant dans le rotor augmentent de façon à développer un couple suffisant pour vaincre la charge mécanique à entraîner.

La vitesse se stabilise lorsque le couple développé par le moteur est exactement égal au couple imposé par la charge.

On ne peut augmenter indéfiniment la charge mécanique appliquée à un moteur asynchrone si la charge dépasse une certaine valeur, la vitesse tombe subitement et le moteur décroche.

II.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation numérique des moteurs asynchrones en utilisant les équations de Maxwell et le modèle magnétodynamique en termes de \vec{A} . Par la suite nous avons utilisé le solveur Ansys MAXwell qui adopte la méthode des éléments finis pour la simulation des performances d'un moteur asynchrone de 2.2 kW à vide et en charge. Dans le prochain chapitre nous allons intégrer le moteur étudié dans un système d'entraînement électrique et étudier l'influence des différentes alimentations sur ses performances.

*Etude d'un
moteur
asynchrone
alimenté par
un circuit
externe*

III. Introduction

Un entraînement électrique est un système électromécanique destiné à réaliser un processus technologique grâce au mouvement d'un organe de travail.

Il est généralement constitué d'un moteur électrique, son alimentation qui constitue le, qui est elle-même un circuit intermédiaire entre le moteur et le réseau et d'un convertisseur mécanique de mouvement (ex: Couplage/réducteur), d'un organe de travail (la charge) et d'un système de commande.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie est devenue un champ extrêmement important, car les équipements industriels utilisent de plus en plus d'entraînement à vitesse variable. Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des moteurs asynchrones [33].

Dans ce chapitre, nous avons exploité le modèle de la machine simulée précédemment pour l'alimenter avec un onduleur et le connecter à une charge mécanique.

III.1 Les onduleurs

III.1.1 onduleur-machine

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquence variables à partir d'un réseau standard 220/380V ; 50Hz. Après redressement, la tension filtrée U_d c'est appliquée à l'onduleur. Chaque groupe transistor-diode assemblé en parallèles forme un interrupteur bi commandable (à l'ouverture et à la fermeture) dont l'état apparaît complémentaire à celui qui lui est associé pour former ainsi un bras de commutation.

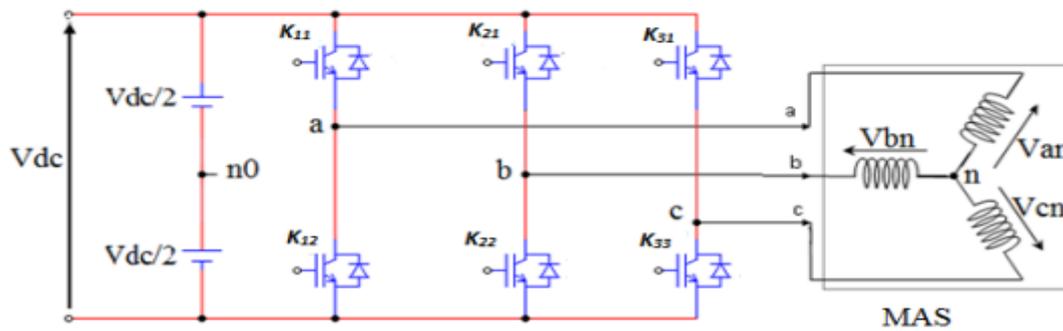


Figure III.1 : Représentation de l'ensemble onduleur –MAS

III.1.2 Principe de fonctionnement

Les onduleurs sont des structures en pont constituées, le plus souvent, d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, des transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée [10]. Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, en générant une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre le schéma suivant :

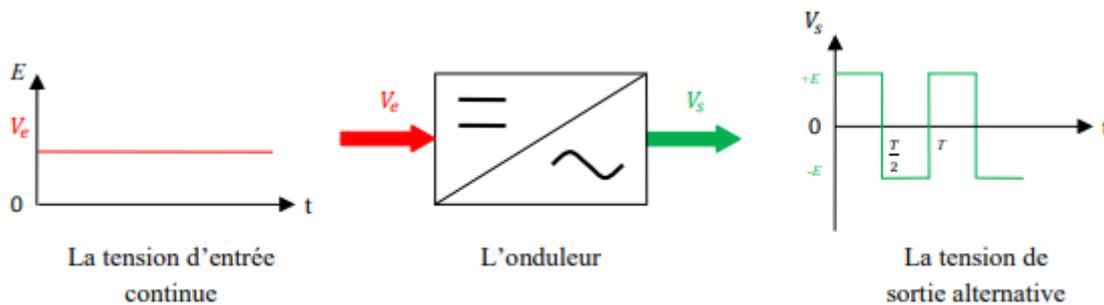


Figure III.2 : Principe de fonctionnement d'un onduleur

III.1.3 Onduleur MLI

L'onduleur de tension MLI triphasé permet l'échange d'énergie entre une source de tension continue et une charge inductive triphasée. Il est constitué de trois bras utilisant des interrupteurs à trois segments, bidirectionnels en courant et commandés à l'amorçage et au

blocage. Les interrupteurs peuvent être réalisés, suivant la puissance à contrôler, avec des transistors MOS ou bipolaire, des IGBT ou des GTO, associés à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant [33].

III.1.4 Contrôle des tensions par MLI

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs, on utilise la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), qui consiste à comparer le signal de référence onde (modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence, à un signal triangulaire onde (porteuse) de fréquence élevée. Le signal modulé est au niveau haut lorsque la modulante est supérieure à la porteuse et est au niveau bas lorsque la modulante est inférieure à la porteuse [34].

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante comme cela est montré dans la figure III.3

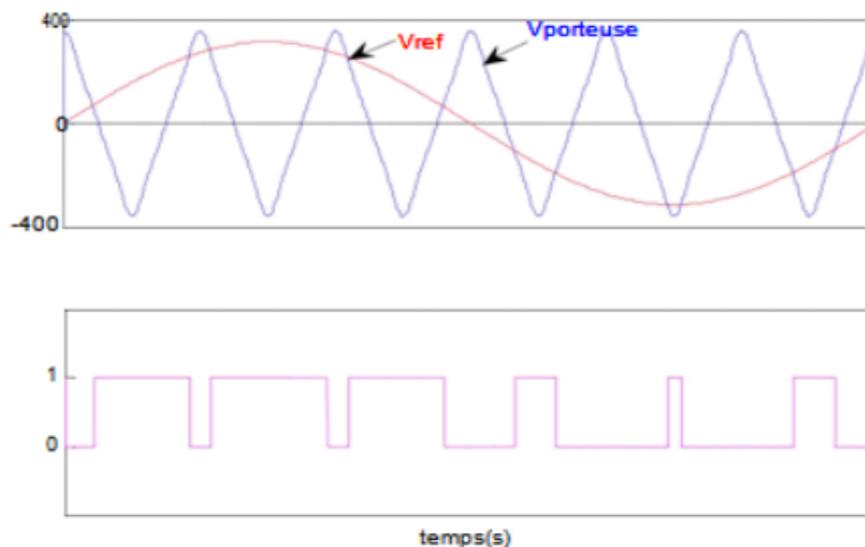


Figure III.3: principe de la commande en MLI

III.1.5 Commande de l'onduleur de tension à MLI naturelle

La technique de modulation de la largeur d'impulsions consiste à multiplier le nombre d'impulsions renvoyées aux interrupteurs de l'onduleur.

Ce procédé présente l'avantage de repousser les harmoniques de rangs faibles à des rangs d'ordre plus élevé ce qui facilite leur filtrage. Il permet aussi la variation à la fois de l'amplitude de fondamentale de la tension de sortie et sa fréquence.

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on fait appel à la technique MLI qui consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs en utilisant l'intersection de trois tensions de références sinusoïdales et une tension de modulation triangulaire.

Pour commander chaque bras, nous comparons le signal de référence (modulante) correspond à un signal triangulaire (porteuse) de fréquence élevée.

Cependant, l'essor de la modulation MLI est lié aux progrès du développement des interrupteurs semi-conducteurs de puissance, la montée en fréquence de découpage limite la puissance transmise et augmente les pertes par commutation.

Les caractéristiques de la modulation sinusoïdale sont :

- L'indice de modulation m égale au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_r de la référence :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad \text{III.1}$$

-Le coefficient de réglage en tension r égale au rapport de l'amplitude V_m de la référence à tension crête U_{pm} de la porteuse :

$$r = \frac{V_m}{U_{pm}} \quad \text{III.2}$$

La commande triangulaire-sinusoïdale de base, consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou plusieurs ondes de modulation ou porteuses, généralement triangulaire ou en dents de scie, unipolaire ou bipolaire. Cette technique exige une commande séparée pour chaque phase de l'onduleur. La détermination des instants d'ouvertures et de fermeture des interrupteurs est réalisée en temps réel par une électronique de commande analogique ou numérique [22].

III.1.6 Principaux avantages de la M.L.I

La modulation de largeur d'impulsion présente les avantages suivants :

- Une bonne neutralisation d'harmonique par rapport aux onduleurs à onde carrée ou en un seul créneau.
- Elle permet de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- De faire varier la valeur du fondamental de tension de sortie.
- La MLI permet aussi l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs asynchrones [35].

III.2 Série de Fourier

Le principe des séries de Fourier est introduit par Jean Baptiste Joseph Fourier. Les séries de Fourier sont des séries de fonctions périodiques. L'objectif est de décomposer un signal périodique en somme de sinus et de cosinus de fréquences égales à, et multiples de, la fréquence du signal de base. Ceci peut être exprimé d'une manière mathématique par la relation suivante [36] :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_0 t) + b_n \sin(2\pi f_0 t) \quad \text{III.3}$$

Ou : $n \in \mathbb{N}^*(1,2,3,..)$

Les paramètres a_0, a_n, B_n sont dis : **coefficients de Fourier.**

Leur valeur donne des indications sur la nature du signal. On note aussi que f_0 est appelée la fréquence fondamentale, et les multiples de $(2f_0, 3f_0, \dots)$ les fréquences harmoniques. La fonction $f(t)$ est donc une superposition continue de sinusoides dont les fréquences prennent leur valeur dans l'intervalle $[0, \infty]$.

III.2.1 Coefficients de Fourier

Pour une fonction périodique, continue par morceaux sur l'intervalle $[0, \infty]$, les coefficients a_0, a_n, B_n sont déterminés à partir des relations suivantes [36]:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+\tau} f(t) dt \quad \text{III.4}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+\tau} f(t) \cos(2\pi f_0 t) dt \quad \text{III.5}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+\tau} f(t) \sin(2\pi f_0 t) dt \quad \text{III.6}$$

Avec : T : la période du signal f(t).

Si la fonction f(t) est à valeurs réelles, les coefficients de Fourier sont aussi des réels. De l'équation (III.4), il est clair que le coefficient n'est autre que la valeur moyenne du signal f(t) à décomposer. Cette équation peut être obtenue par une simple intégration de l'expression (III.3) sur une période T :

$$\int_{t_0}^{t_0+\tau} f(t) dt = \int_{t_0}^{t_0+\tau} (a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_0 t) + b_n \sin(2\pi f_0 t)) dt \quad \text{III.7}$$

$$\int_{t_0}^{t_0+\tau} a_0 dt + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (a_n \cos(2\pi f_0 t) + b_n \sin(2\pi f_0 t)) dt \quad \text{III.8}$$

$$= a_0 T + 0 \quad \text{III.9}$$

La relation (III.4), peut être tirée directement de (III.8).

Pour calculer de la $k^{ème}$ valeur du coefficient a_n , on multiplie d'abord l'équation (III.3) par

$[\cos(2\pi f_0 kt)]$, puis l'expression obtenue est intégrée sur une période T

$$\int_{t_0}^{t_0+\tau} f(t) \cos(2\pi k f_0 t) dt = \int_{t_0}^{t_0+\tau} (a_0 \cos(2\pi k f_0 t) dt \quad \text{III.10}$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \int_{t_0}^{t_0+\tau} (a_n \cos(2\pi n f_0 t) \cos(2\pi k f_0 t)) dt + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{t_0}^{t_0+\tau} b_n \sin(2\pi n f_0 t) \cos(2\pi k f_0 t) dt$$

III.11

$$= 0 + a_k \left(\frac{T}{2}\right) + 0 \quad \text{III.12}$$

Par conséquent, l'expression (III.11) vérifie (III.5).

De même pour le calcul la $k^{ème}$ valeur de b_n , il suffit de multiplier (III.3) par $[\sin(2\pi f_0 kt)]$ et de l'intégrer sur T. Pour les fonctions admettant certaines symétries, le calcul des coefficients de Fourier se simplifie nettement. Nous allons présenter par la suite les deux cas les plus fréquents.

III.3 Présentation de logiciel Simplorer

Simplorer est un package de simulation pour les conceptions multiphysique que l'on trouve couramment dans l'automobile, l'aérospatiale et les systèmes d'entraînements électriques.

Les bibliothèques spécifiques à l'industrie disponibles sur Simplorer fournissent des composants paramétrés prêts à l'emploi, ce qui rend Simplorer innovant et flexible.

III.4 Applications et résultats

Dans la première application on a alimenté la machine par une source triphasée purement sinusoïdale. Par la suite et dans la deuxième application nous avons alimenté le même moteur par un onduleur commandé par la technique MLI.

III.4.1 Application 1 : alimentation par réseau alternatif

Le schéma général de notre entraînement électrique est présenté dans la figure III.4, ce dernier comprend le moteur, son alimentation, sa charge mécanique et les instruments de mesure :

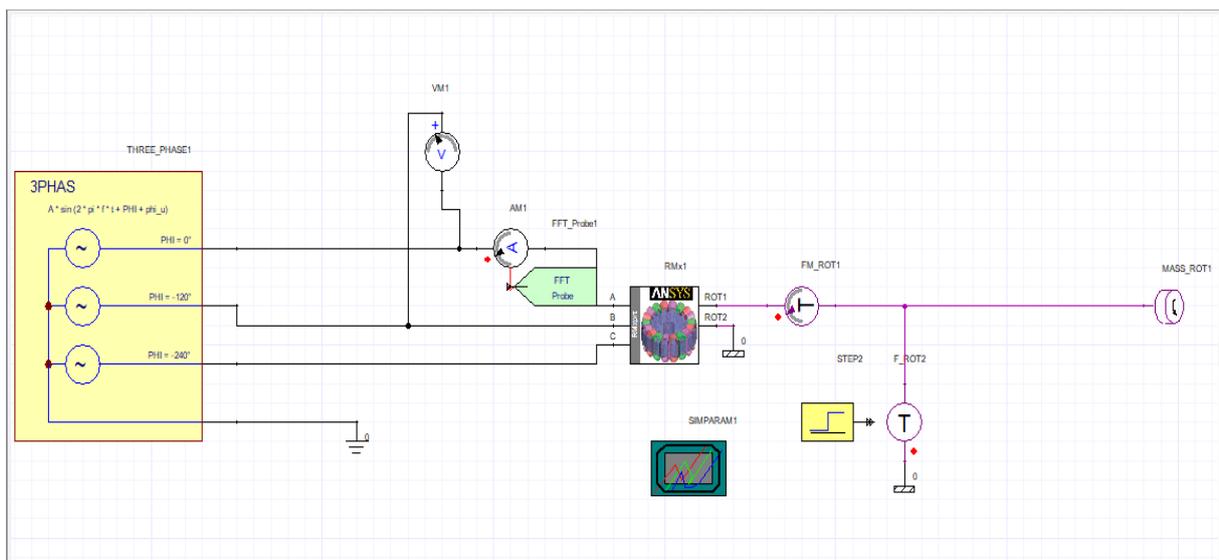


Figure III.4 : alimentations de la machine par réseau

Nous avons représenté les courbes de la tension, le courant, la vitesse, le couple et le THD.

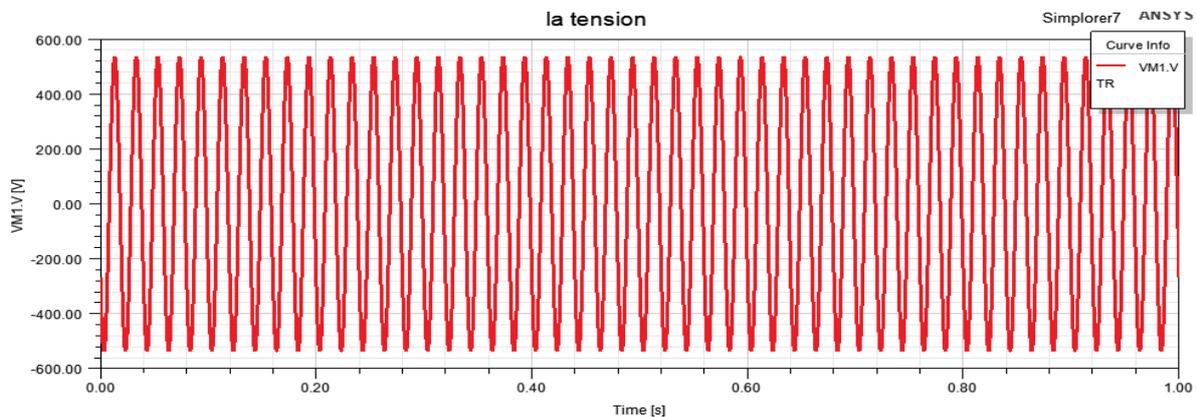


Figure III.5 : la tension de la machine alimentée par réseau

La figure III 5 montre la tension entre deux phases, on a remarqué que cette forme de tension est sinusoïdale. Sa valeur maximale est égale à la valeur de la source d'alimentation.

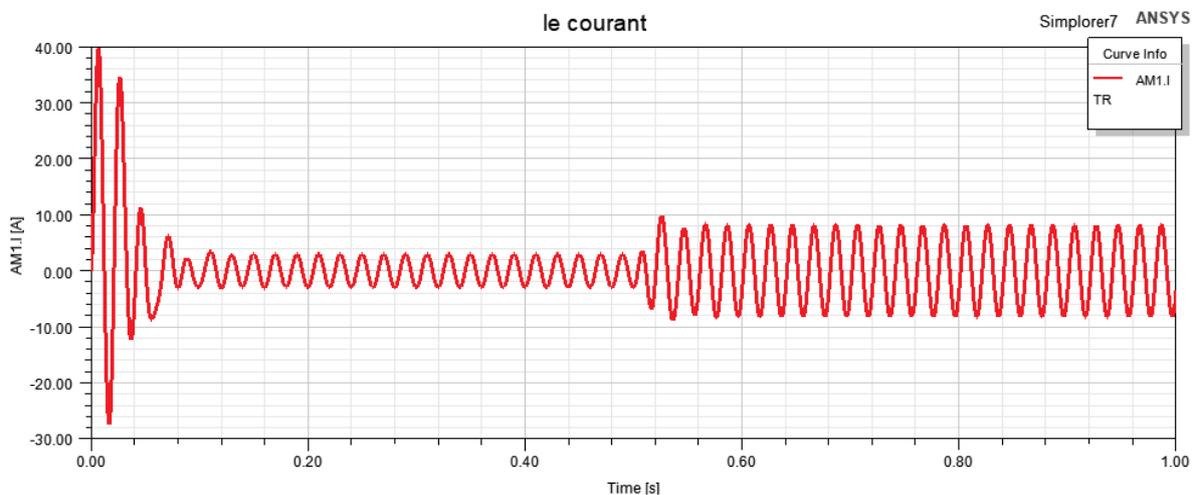


Figure III.6: le courant de la machine alimentée par réseau

Au démarrage le courant maximal est à 40 A (au premier régime transitoire) après il se stabilise 5 A (premier régime permanent). A l'instant 0.5 s on a appliqué une charge de 20 N.m on constate après un deuxième régime transitoire que le courant se stabilise à une valeur avoisinant les 10 A (deuxième régime permanent)

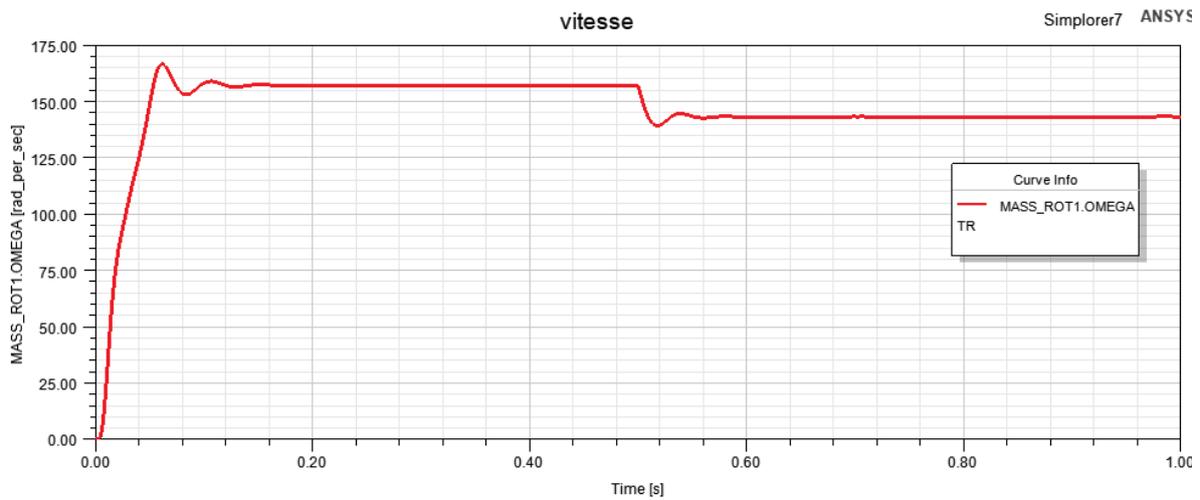


Figure III.7 : la vitesse de la machine alimentée par réseau

Au début la vitesse augmente jusqu'à 165 rad/s au premier régime permanent après 0.1 s la vitesse se stabilise à 145 rad/s au 2^{ème} régime permanent.

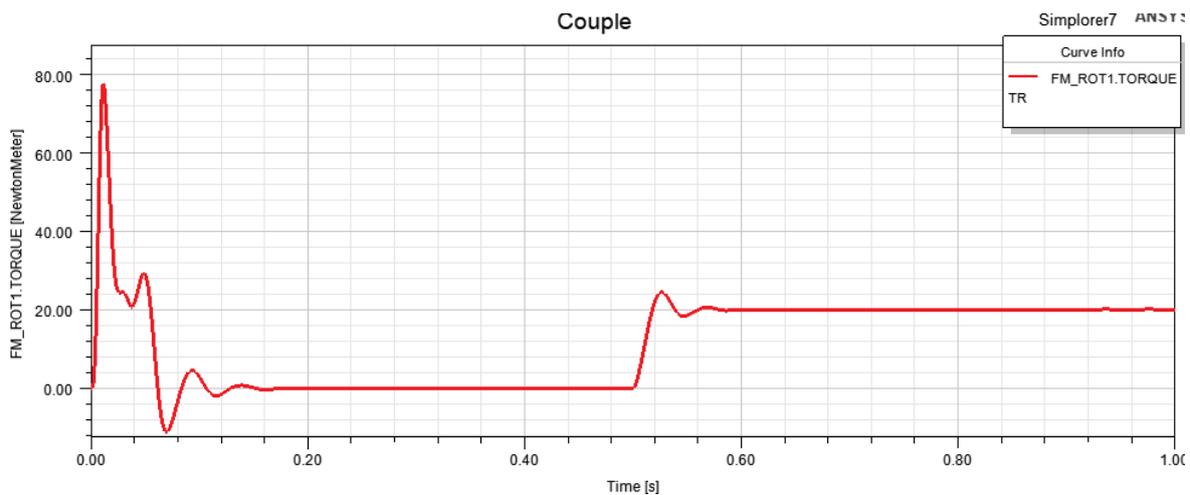


Figure III.8: le couple de la machine alimentée par réseau

Dans la figure III.8 le couple augmente jusqu'à 80 Nm au premier régime transitoire puis il diminue jusqu'à se qu' il s'annule, après 0.5 s et après avoir appliqué la charge le couple se stabilise à 20 N.m au deuxième régime permanent.

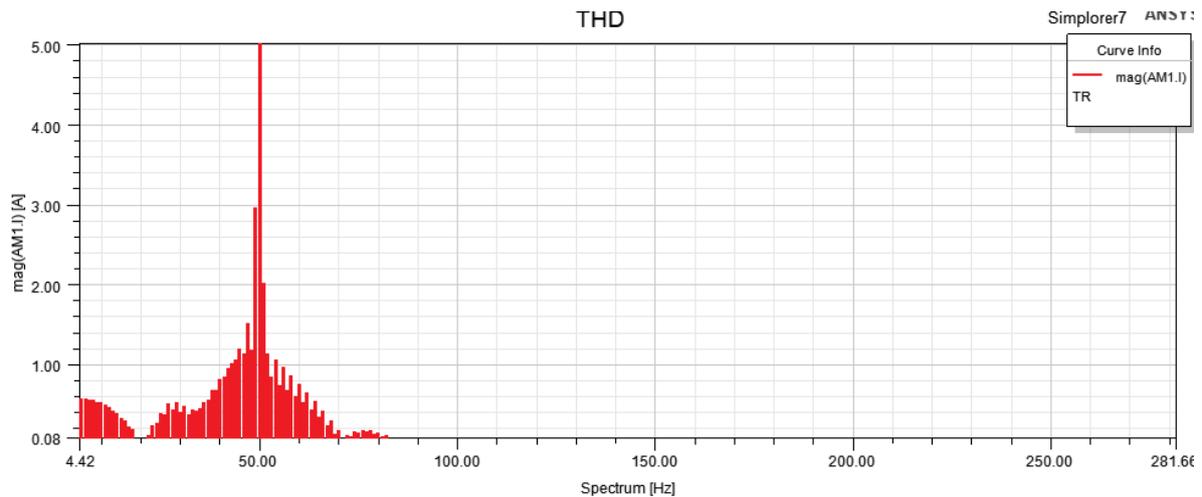


Figure III.9 : le THD de la machine alimentée par réseau

De la courbe du THD, nous remarquons l'absence des harmoniques du signal du courant.

III.4.2 Application 2 : alimentation par un onduleur

Le schéma dans la figure III.10 présente le montage réalisé dans le logiciel Simplorer. On a réalisé la commande des interrupteurs de l'onduleur avec le composant MLI présent dans la bibliothèque du logiciel.

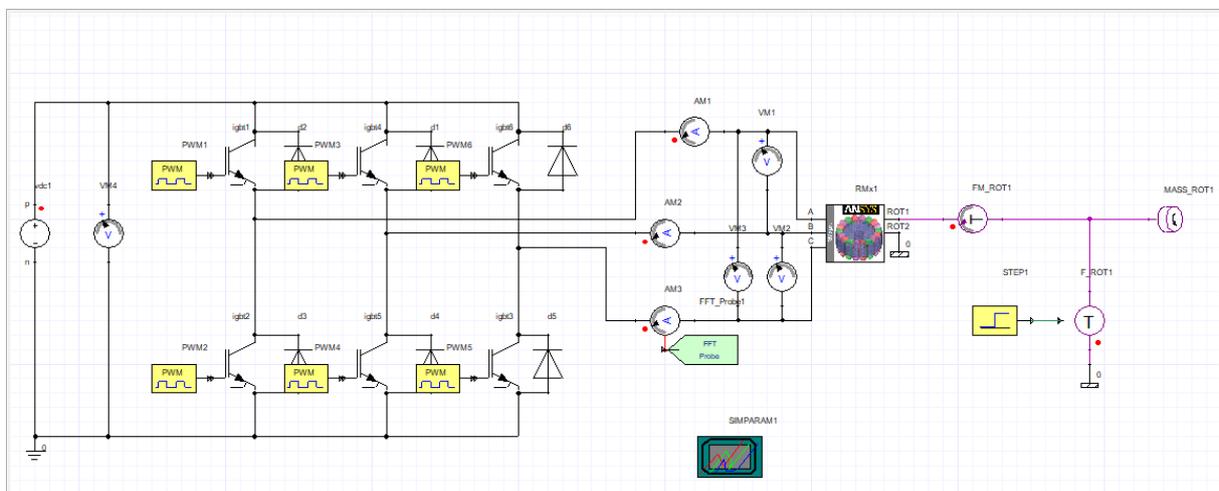


Figure III.10 : alimentation de la machine par onduleur

Nous avons représenté les courbes des grandeurs suivantes : la tension, le courant, le couple et le THD.

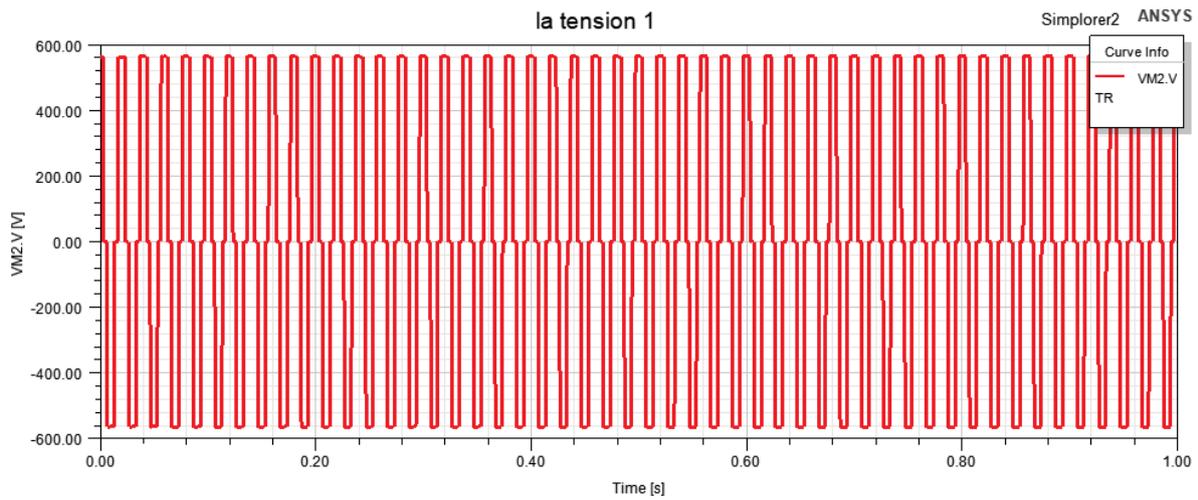


Figure III.11 : Tension de la machine alimentée par onduleur.

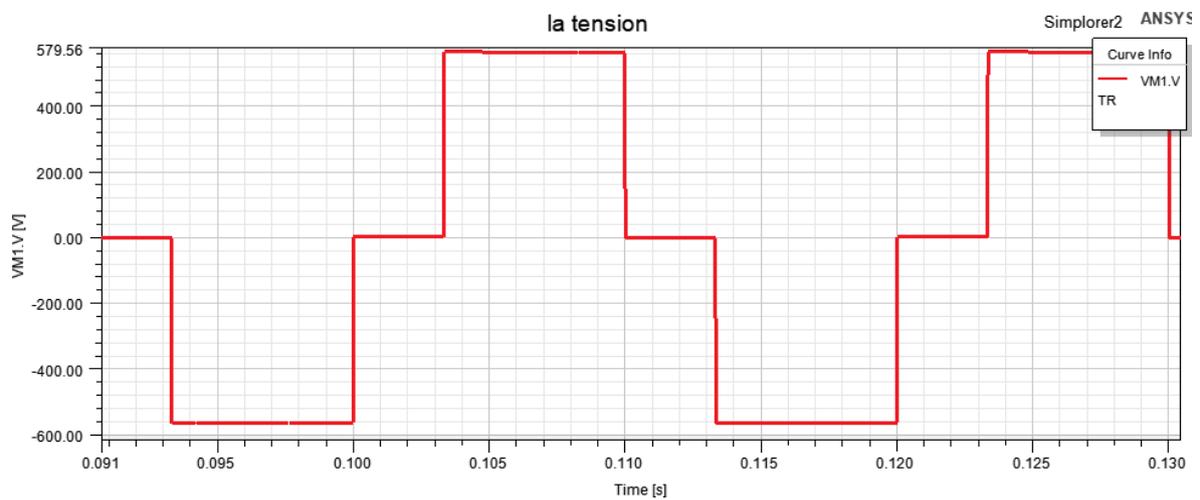


Figure III.12 : Tension de la machine par zoom alimentée par onduleur

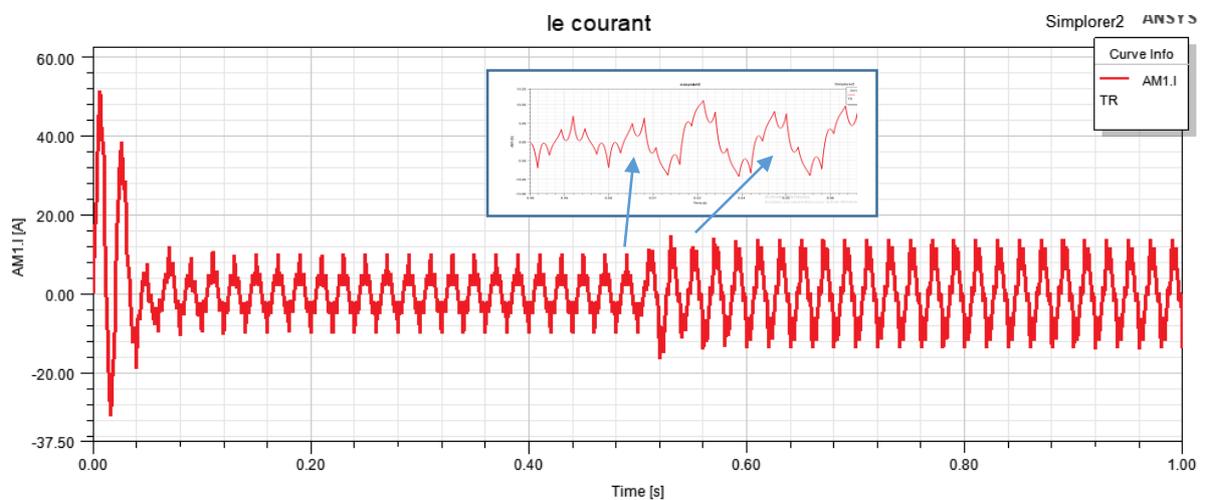


Figure III.13: le courant de la machine alimentée par onduleur

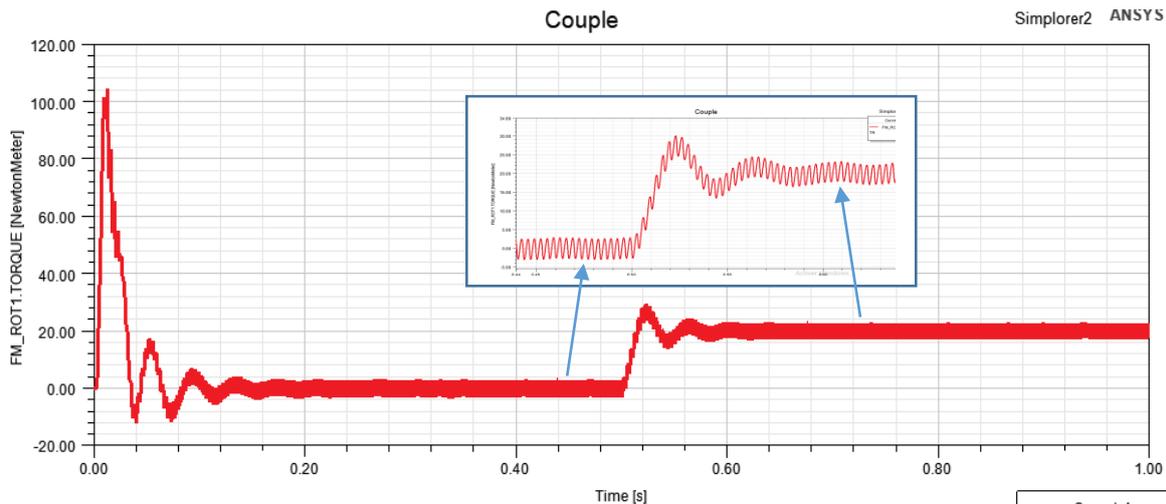


Figure III.14: le couple de la machine alimentée par onduleur

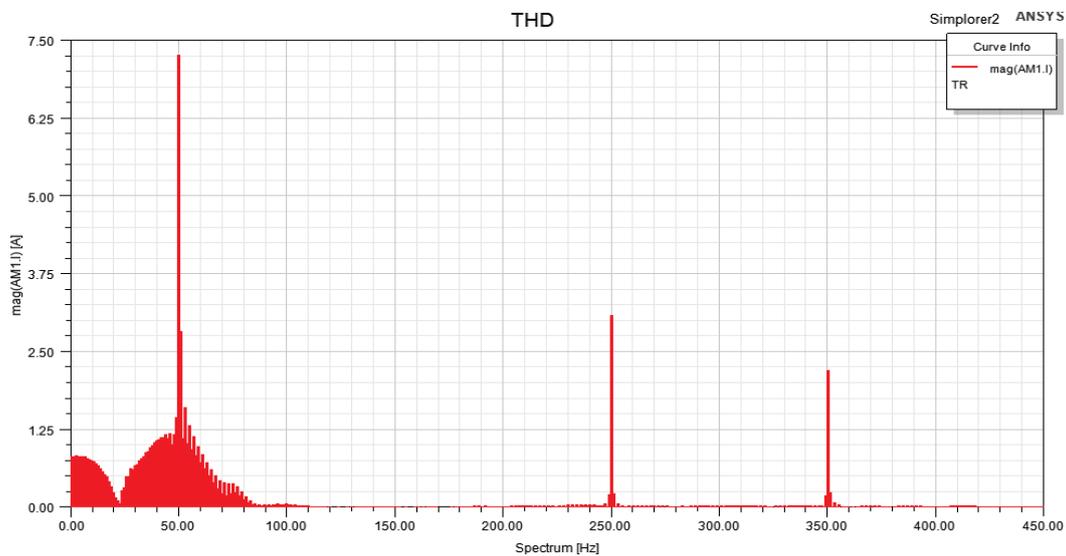


Figure III. 15: le THD de la machine alimentée par onduleur

La figure III. 11 montre la tension entre deux phases d'un onduleur, on remarque que cette forme de la tension est carrée.

Nous remarquons aussi de la courbe du courant que ce dernier est déformé, et ça nous renseigne sur l'existence des harmoniques. Cela a un impact direct sur la courbe du couple qui représente des vibrations.

L'analyse spectrale du signal courant pour une fréquence d'une porteuse égale à la fréquence de la modulatrice montre la présence des harmoniques impaires en plus du fondamental.

Pour éloigner ces harmoniques au-delà de la fréquence de coupure de la machine, on fait augmenter la fréquence de la porteuse à 5 kHz.

Dans ce qui suit nous avons considéré une porteuse triangulaire améliorer les performance de la machine. Le schéma de simulation globale est donné par la figure III.17. Nous avons représenté les courbes des grandeurs suivantes : la tension, le courant, le couple et le THD.

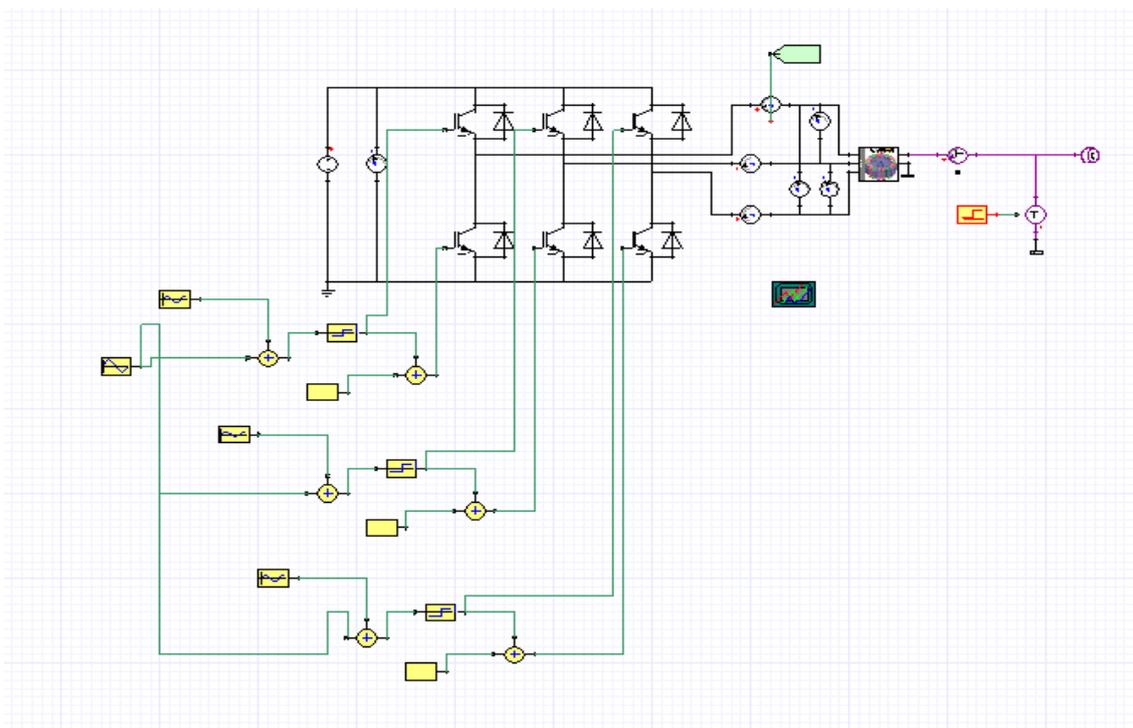


Figure III.16: Alimentation de la machine par onduleur avec une commande MLI sinus-triangle

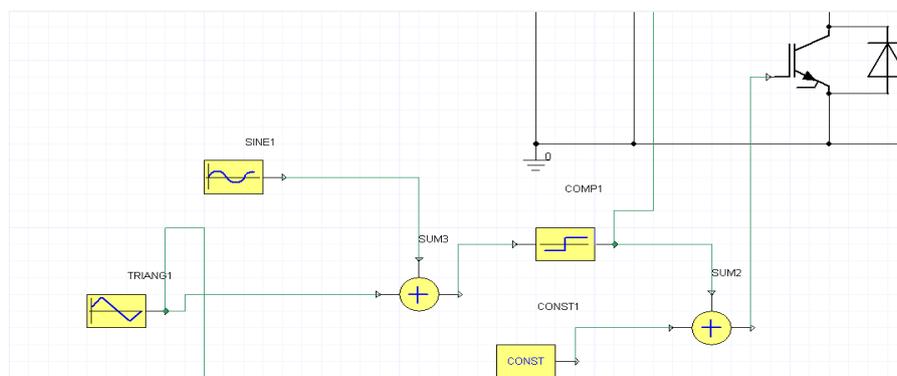


Figure III.17: Programme de la commande sinus-triangle sous Simplorer

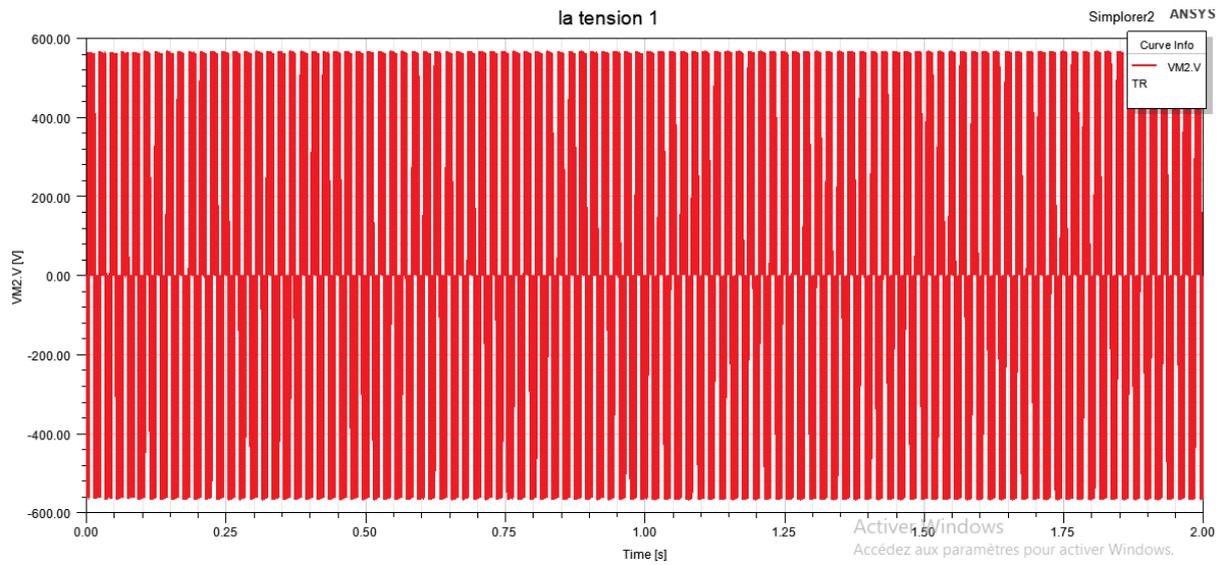


Figure III.18: Tension de la machine avec une fréquence de la porteuse de 5 kHz

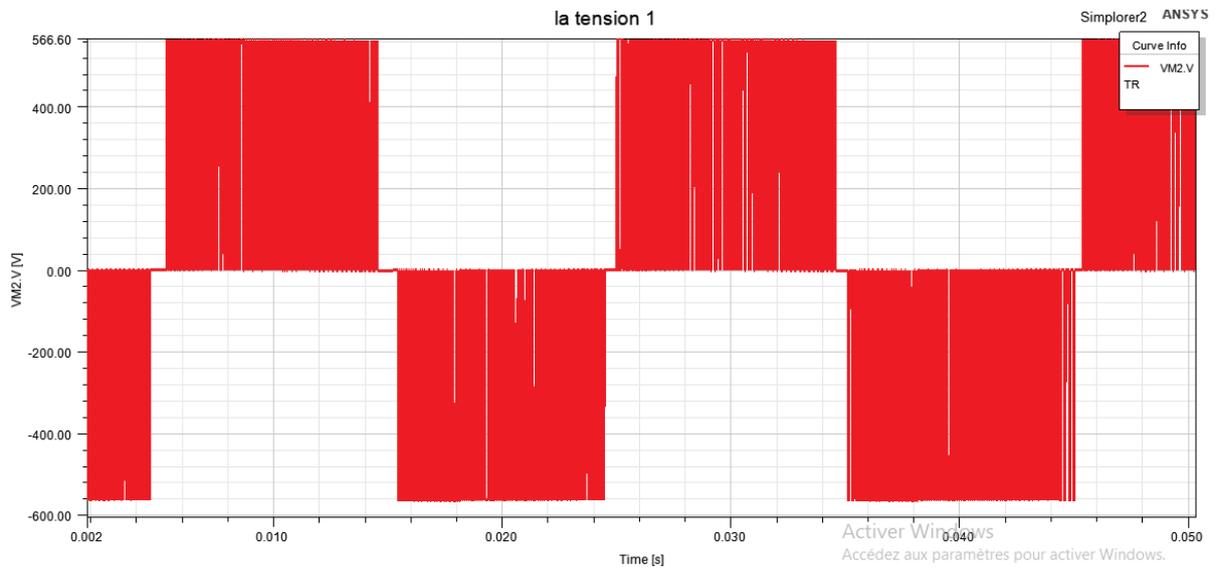


Figure III. 19: zoom de la tension

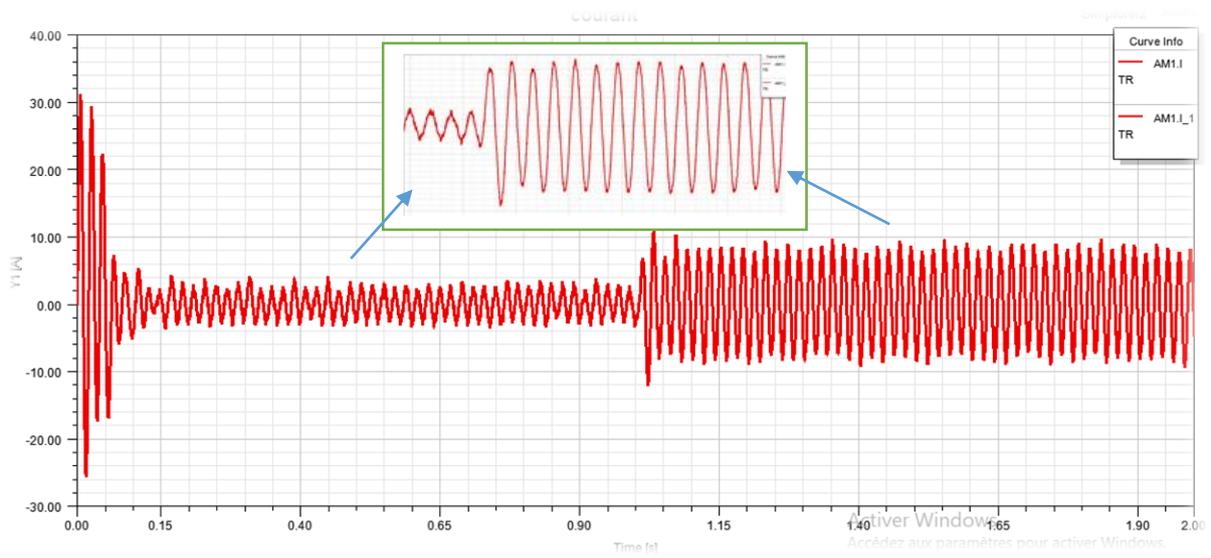


Figure III. 20: Courant de la machine alimentée par onduleur avec la commande MLI

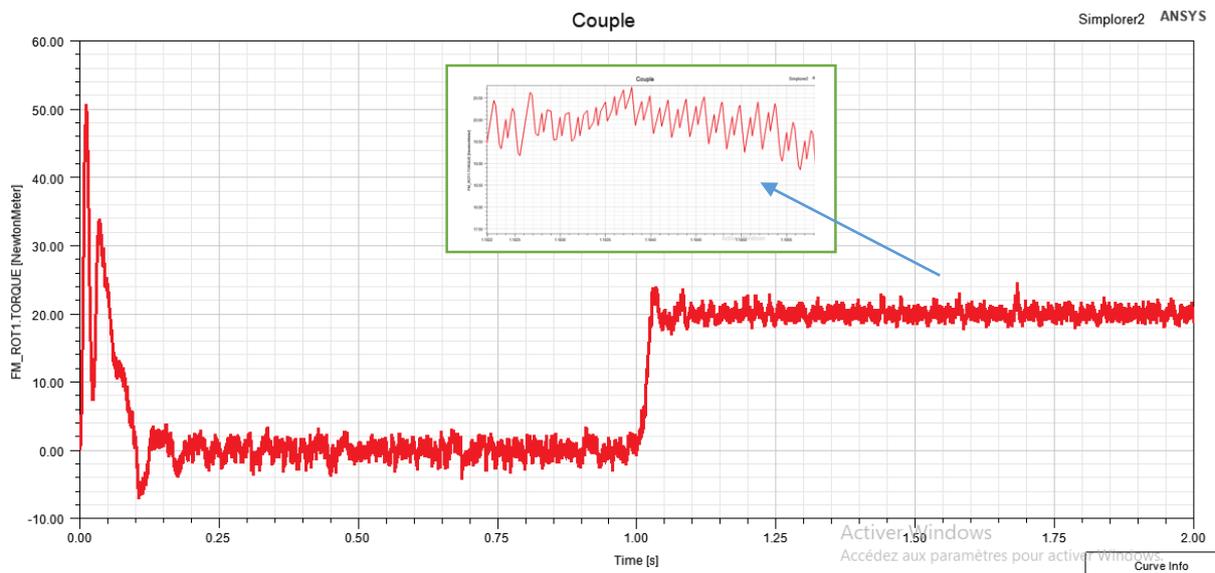


Figure III. 21: Couple de la machine alimentée par onduleur avec la commande MLI

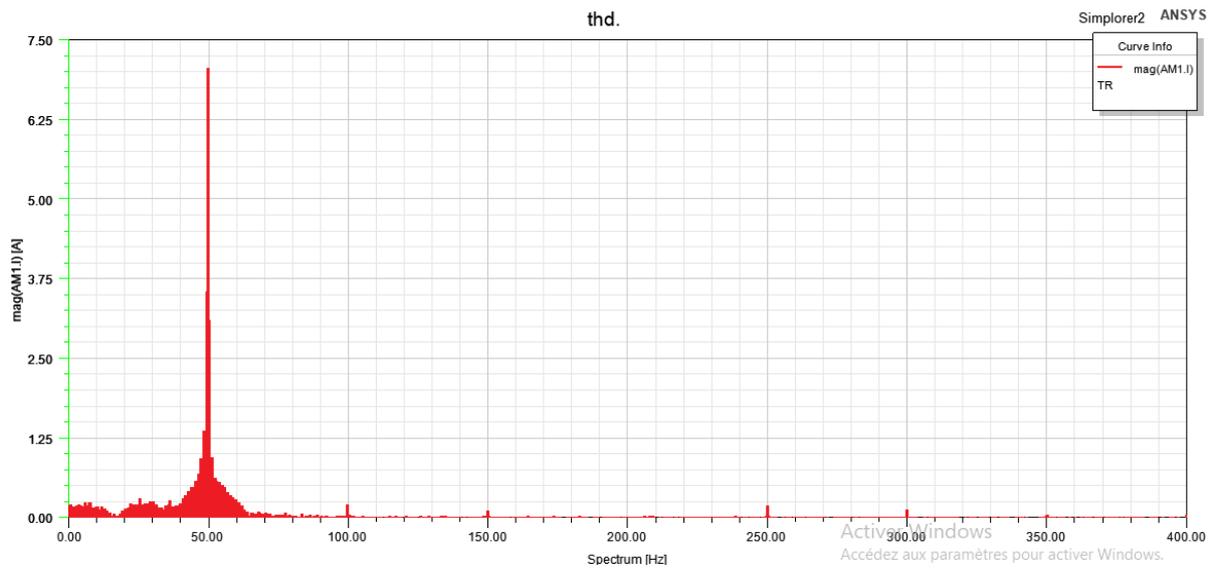


Figure III. 22: THD de la machine alimentée par onduleur commande MLI

En augmentant la fréquence de la porteuse on voit qu'il y a une nette amélioration des courbes du courant absorbé et du couple moteur, ce dernier présente beaucoup moins de vibration.

Le graphe THD, montre que l'amplitude des harmoniques est négligeable devant celui du fondamental et cela grâce à la technique MLI.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre avons simulé un entraînement électrique composé d'un moteur, son alimentation et une charge mécanique. L'alimentation considérée est un onduleur de tension commandé par la technique MLI. Les performances du moteur ont été simulées en considérant les courbes du courant, le couple développé. La technique MLI a nettement améliorer le rendement du moteur étudié.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

Les systèmes d'entraînements électriques convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique indispensable à la production industrielle, les entraînements électriques se trouvent dans des domaines variés comme les ascenseurs, les escalators, les portes motorisées, les mélangeurs, machines à laver, mais aussi pour des applications plus classiques comme le pompage hydraulique dans les réseaux de chauffage ou de froid, le transfert des fluides, la compression... L'entraînement électrique consomme environ 70% de la consommation électrique des entreprises industrielles, dont les usages principaux : ventilation (17%), pompage (16%), air comprimé (10%), production de froid (10%), le reste alimente les procédés (agitation, broyage, convoyage...). Le système d'entraînement électrique est constitué de plusieurs composants responsables à différent degré de sa performance énergétique.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude d'un système d'entraînement électrique composé d'un moteur asynchrone, son alimentation et sa charge mécanique.

En effet, nous avons, au cours de ce travail, abordé la modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage de 2.2 kW fabriqué à l'entreprise nationale Electro-Industries d'Azazga. Cette modélisation nous a permis de tenir en compte de la géométrie de la machine, la non-linéarité du matériau du circuit magnétique ainsi que le bobinage du stator.

Par la suite, nous avons considéré le module Simplorer du logiciel Ansys Electronics afin de simuler l'alimentation du moteur qui est un onduleur commandé par la technique MLI ainsi que la charge mécanique connectée au moteur.

Pour étudier l'effet des différentes alimentations considérées nous avons fait l'analyse des signaux courant et couple du moteur. Les résultats obtenus ont été discutés en terme de THD. Nous avons constaté que la technique MLI améliore considérablement les variable de sortie de notre moteur.

D'autres développements ouvrant de nouvelles perspectives peuvent être faits, on cite par exemple :

- Etude thermique du moteur asynchrone alimenté par un onduleur
- L'influence de la géométrie du moteur et son bobinage sur les caractéristiques de l'entraînement électrique.

Bibliographie

Bibliographie

- [01] M. Oubidar , S. Bendaoud, « Machine synchrone/asynchrone », mémoire master , Québec , 2010 .
- [02] Pierre mayé, « aide mémoire électrotechnique », livre.
- [03] B. bayala, « la machine asynchrone », Edition revue 2010.
- [04] G.Didier, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de Doctorat, France, 2004.
- [05] M.Kostenko, L.Piotrovski, « machine électrique», tome II, Editions Mir,1969.
- [06] T.Wildy, G.Sybille , « Electrotechnique 4eme édition»,De Boeck,paris,2005.
- [07] G.Bouchard,R.polivier, «conception de moteurs asynchrones triphasés »,l'école polytechnique de Montréal,1997.
- [08] R.Redjem, «calcul et conception assistée par ordinateur des machine electriques », Mémoire de magister ,Contantine,2006.
- [09] J. Chatlain, « Machine électrique» ,Dunod,Paris,1986.
- [10] W. Degaichia , «Conception et dimensionnement des moteurs asynchrone de petite et moyenne puissances », thèse de doctorat ,L ausanne,2001.
- [11] B. Moussaoui , Y. Nekomouche, «modélisation des moteurs asynchrones polyphasés dédiée au diagnostic de court-circuit entre spires, application aux moteurs penta phases et double étoile», Mémoire de master , Tizi-Ouzou , 2008.
- [12] R. Bousseksou, « modélisation analytique des machines asynchrone application au diagnostic », thèse de doctorat , Constantine 2007 .
- [13] Z.Damech , B.Mokhtari , « modélisation et simulation d'une génératrice asynchrone en saturation », mémoire de master ,Ouargla. 2011/2012.
- [14] Ph. Brun, « Variation De Vitesse Des Machines Asynchrones », Cours En Electrotechnique, France .
- [15] L. Kerszenbaum ,C F. Landy, «The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults IEEE Transactions on Power Apparatus Systems», July 1984.
- [16] M. Chaib, T. Rahab, « Conception d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil à haut rendement (IE2) »,thèse de doctorat , Tizi-Ouzou,2011.
- [17] D. Salah . F,Ahchine, «Calcul d'un moteur asynchrone à double cages » ,thèse de doctorat ,Tizi-Ouzou ,2012.
- [18]CharlesCyr,«Modélisationetcaractérisationdesmatériauxmagnétiquescompositesdouxutilisédans les machines électriques »,thèse Arts et Métiers ParisTech ,2007.

- [19] H, Helbling , «Etude de l'impact des procédés de fabrication des machines électriques sur les propriétés des noyaux magnétiques », thèse de doctorat ,Lille,2021.
- [20] Anh Tuan Vo, « Modèle LS pour une meilleure prise en compte de l'hystérésis dynamique dans les matériaux magnétiques doux : amélioration, identification et validation expérimentale», thèse de doctorat , France ,2021.
- [21] B.Hammia ,H.Alaeddine , « Etude comparative de différentes méthodes de freinage des moteurs asynchrones » ,mémoire de master, Jijel , 2020.
- [22] L. Hadjout, « analyse des performances électromagnétiques d'une machine synchrone autopilotée à aimants à, rotor lisse », mémoire de magister, Alger, 1994.
- [23] J.Farooq, « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents », Thèse de doctorat, France ,2008.
- [24] ENCARTA Encyclopédie Générale, 1998.
- [25] Y. Choua. «Thèse Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault Modélisation et simulation», thèse de doctorat , Paris ,2009.
- [26] S. BADJA , S. GAOUI , « Analyse de l'effet de Défauts sur les Performances et les Paramètres d'un Moteur Asynchrone triphasé en utilisant Maxwell 2D», Mémoire de master ,Tizi-Ouzou , 2019.
- [27] M.Zaouia , « mise en œuvre d'un modèle de couplage de phénomènes électriques en régime transitoire avec prise en compte du mouvement », mémoire de magister, Alger, 2009.
- [28] I.Benras, « Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques d'une Micro Pompe Magnétohydrodynamique à Conduction », thèse de doctorat , Ouargla, 2016.
- [29]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone
- [30] J.L. Couloumb et J.C. Sabonnadiere , «CAO en électrotechnique », Hermes publishing, 1985
- [31] https://www.academia.edu/10620745/Maxwell_2D_Simplorer_1_
- [32]. Site officiel ANSYS Maxwell technologies: Electricité-Electronique. Compagnie DirectIndustry " [www. directindustry.fr](http://www.directindustry.fr) " .
- [33] P. LADOUX, «Variation de Vitesse des Machines à Courant Alternatif » , Réseau Nationale de ressources en Electrotechnique.
- [34] K.Kouzi, " Commande Vectorielle d'moteur à induction sans Capteur de Vitesse par un Réglage PI- Flou à Gains-Flou Adapté Associa un Observateur par Modes de Glissement " Mémoire de magistère, Batna, 2002.

[35] www.wikipédia.com, Modulation de largeur d'impulsion, 21 Mars 2012.

[36] Kh , Imarazene « Application des Réseaux de Neurones à la Commande par Elimination d'Harmoniques des Onduleurs Multi niveaux », mémoire de magister , Alger ,2005.

Résumer

Parmi les moteurs électriques les plus utilisés, on cite le moteur asynchrone triphasé grâce aux multiples avantages qu'il présente notamment, la simplicité du processus de fabrication, sa robustesse ainsi que son adaptation facile aux équipements de commande tels que les contacteurs et les convertisseurs électroniques qui contribuent à la variation de sa vitesse.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude d'un système d'entraînement électrique composé d'un moteur asynchrone, son alimentation et sa charge mécanique. Le moteur asynchrone considéré a une puissance de 2.2 kW et il est modélisé par la méthode des éléments finis pour une prise en compte de l'effet de la géométrie et de la non-linéarité des matériaux.