

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : Industries Électroniques

Par

- **CHAA Abderrazak**
- **RAHMANI Fares**

Intitulé

Etude des performances d'un moteur asynchrone à cage double étoile

Évalué le : 27/06/2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>MERABET ELKHEIR</i>	<i>Prof</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>BENTOUHAMI LARAFI</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>TALBI BILLEL</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

*Tous d'abord nous tenons à remercier **ALLAH**, le tout puissant, de Nous avons donné la santé, la volonté et la patience.*

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire Mr. BENTOUHAMI, pour leur patience, leur disponibilité et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Je tiens, tout particulièrement, à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Amin, le bobineur, pour ces conseils précieux, les orientations ainsi que pour l'aide qu'il m'a accordé pour la réalisation de la partie pratique.

J'adresse leurs sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon travail et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Dédicace

En premier lieu, je remerciée DIEU, qui ma

donné le courage, la force et la volonté pour

Réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents qui m'ont permettent d'être ce que

Mes sœurs et mon frère.

Tous mes enseignants

Toute la promotion.

Tous mes amis.

Toute la famille.

A tous ceux qui me sont chers.

A.Chaa

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	II
Liste des symboles et abréviations	III
Introduction Générale	1
I. Généralités sur la machine asynchrone double étoile (MASDE)	3
I.1 Introduction	3
I.2 Les deux types de moteur asynchrone	3
I.2.1 Moteur asynchrone à rotor bobiné (rotor à bague)	3
I.2.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil : (rotor en court-circuit)	3
I.3 Constitution de la machine asynchrone	4
I.4 Les moteurs multiphasés	4
I.4.1 Les moteurs multiphasés de type 1	4
I.4.2 Les moteurs multiphasés de type 2	5
I.5 Applications des machines multiphasées	7
I.6 Les avantages et les inconvénients de la MASDE	7
I.6.1 Les Avantages de MASDE	7
I.6.2 Les inconvénients de la MASDE	8
I.7 Constitution de la machine asynchrone double étoile (MASDE)	8
I.7.1 Stator	9
I.7.2 Rotor	9
I.8 Principe de fonctionnement de la MASDE	10
I.9 Conclusion	11
II. Transformation d'une machine asynchrone triphasée à une machine asynchrone double étoile (MASDE)	12
II.1 Introduction	12
II.2 Enroulement triphasé et enroulement six phases	12
II.2.1 Principes de conception d'un enroulement triphasé à courant alternatif	12
II.2.2 Règles de base de conception d'enroulement à courant alternatif	12

II.3	Formules de conception de moteur asynchrone triphasé	14
II.3.1	Caractéristiques du moteur étudié	15
II.3.2	Calcul de couple à l'aide des équations de conception.....	17
II.4	Bobinage du stator	25
II.5	Les contraintes et les étapes impliqués dans la conception d'enroulement six phases	32
II.6	Certaines caractéristiques importantes d'un bon enroulement.....	32
II.7	Paramètres du moteur à induction double étoile	32
II.7.1	Calcul de la tension du moteur double étoile	35
II.8	Conception de l'enroulement statorique	36
II.9	Quelques considérations pour l'enroulement de la machine asynchrone double étoile	37
II.10	Modification de calculs	38
II.11	Conclusion	47
III.	Réalisation pratique d'enroulement et identification paramétrique de la MASDE .	44
III.1	Introduction	44
III.2	Identification du bobinage.....	44
III.2.1	Enlèvement du cuivre dans les encoches	45
III.2.2	Contrôle et nettoyage du circuit magnétique	46
III.2.3	Mesure des dimensions géométriques de la machine.....	46
III.2.4	Comptage du nombre de fils par encoche	47
III.2.5	Mesure de diamètre du conducteur	47
III.3	Réalisation de la machine asynchrone double étoile	48
III.3.1	Les matériaux nécessaires à la réalisation.....	48
III.3.2	Confection et montage des isolations d'encoche	48
III.3.3	Création de bobine	50
III.3.4	Montage les bobines pour chaque phase	51
III.3.5	Disposition des sections sur le stator de la machine :	51
III.3.6	Isolation entre phase	52
III.3.7	Connexion.....	53
III.3.8	Liaison entre bobines	53
III.3.9	Raccordement bobine et câble de connexion	53

III.3.10	Fixations et placement des gaines	53
III.3.11	Étape final vernis le bobinage	54
III.3.12	Test de moteur avant utilisation	54
III.4	Identification des paramètres du moteur réalisé	54
III.4.1	Essai volt-ampérométrique (détermination de R_s).....	57
III.4.2	Essai à vide du moteur asynchrone (détermination de L_s et R_f)	58
III.4.3	Essai à rotor bloqué du MASDE (essai en C/C) (détermination de R_r et M)	60
III.4.4	Essai de ralentissement du MAS (détermination de J et f_r)	61
III.4.5	Résultats de l'identification des paramètres du moteur asynchrone	62
III.4.6	Validation de l'identification	63
III.5	Conclusion	64
Conclusion générale.....		64

Liste des figures

Figure I-1 : Vue éclaté d'une machine asynchrone double étoile	8
Figure I-2 : Vue interne du stator	9
Figure I-3 : Modes de fonctionnement suivant le glissement	10
Figure I-4 : Les forces de Laplace sur la cage d'écureuil	11
Figure II-1 : Disposition de phase à simple couche.	13
Figure II-2 : Représentation des dimensions d'une encoche	16
Figure II-3 : Représentation spatiale des trois phases	26
Figure II-4 : Le raccordement des bobines de la phase U	28
Figure II-5 : Le raccordement des bobines de la phase V	29
Figure II-6 : Le raccordement des bobines de la phase W	30
Figure II-7 : Le schéma complet de l'enroulement montrant la connexion de toutes les bobines	31
Figure II-8 : Représentation schématique des enroulements de la MSADE	37
Figure II-9 : Le raccordement des bobines de la phase A	39
Figure II-10 : Le raccordement des bobines de la phase B	40
Figure II-11 : Le raccordement des bobines de la phase C	41
Figure II-12 : Le raccordement des bobines de la phase D	42
Figure 2-13 : Le raccordement des bobines de la phase E	43
Figure II-14 : Le raccordement des bobines de la phase F	44
Figure II-15 : Le schéma complet de l'enroulement montrant les connexions des phases.	45
Figure II-16 : Le schéma complet de l'enroulement montrant la connexion de l'étoile 1 et l'étoile2	46
Figure III-1 : Vue de la machine étudiée	44
Figure III-2 : Les étapes pour enlèvement des enroulements	45
Figure III-3 : Le stator après le nettoyage	46
Figure III-4 : Comptage du nombre des fils	47
Figure III-5 : Micromètre (palmer) pour mesure le diamètre fil	48
Figure III-6 : Traçage de papier isolant	49
Figure III-7 : Insertion du papier isolant dans les encoches	49
Figure III-8 : Mesure la taille de la bobine	50
Figure III-9 : Création des bobines pour chaque phase	51
Figure III-10 : Le stator après rebobinage	52
Figure III-11 : Les bobines de stator après l'isolation entre phases	52
Figure III-12 : La machine après la fixation de bobines	53
Figure III-13 : Vernis le bobinage	54
Figure III-14 : Schéma équivalent de la MASDE ramené au stator	55
Figure III-15 : Schéma équivalent d'un seul stator.....	55
Figure III-16 : Equipement d'essai du laboratoire	56
Figure III-17 : Schéma du montage de mesure de la résistance statorique	57
Figure III-18 : Montage de l'essai à vide du moteur	58
Figure III-19 : Représentation de P_{mec} et P_{fer} en fonction Uo^2	59
Figure III-20 : Le graphe de la vitesse en fonction du temps dans l'essai de ralentissement	62
Figure III-21 : Schéma bloc de Simulink du moteur asynchrone double étoile	63
Figure III-22 : Allure des vitesses mesurée et simulée avec les paramètres identifiés	63

Liste des tableaux

Tableau I-1 : multiphasées de type 1	5
Tableau I-2 : Les Moteurs multiphasées de type 2	6
Tableau 2-1 : Combinaisons possible pour les moteurs à induction triphasés, qui peuvent être reconfigurées aux moteurs à induction six phases.	15
Tableau II-2 : Configuration d'enroulement triphasée.....	27
Tableau II-3 : Configuration d'enroulement double étoile.	37
Tableau III-1 : Les mesures de la tension et du courant continu.....	57
Tableau III-2 : Les mesures des essais à vide.....	58
Tableau III-3 : Résultats de calculs de R_f , L_s et L_r	59
Tableau III-4 : Les mesures de l'essai à rotor bloqué.....	60
Tableau III-5 : Résultats des calculs de M et de R	61
Tableau III-6 : Les paramètres identifiés du MASDE.....	62

Liste des symboles et abréviations

CHAPITRE 02 :

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
f_{smax}	Valeur maximale de FMM statorique	(AT/Pôle)
B_{sr}	Flux maximaux par pôle	(Wb/m ²)
L	Langueur de rotor	(mm)
D	Diamètre de rotor	(mm)
K_r	Facteur de remplissage	/
S_{co}	Surface de conducteur	(mm ²)
J	Densité de courant	/
K_y	Facteur de raccourcissement	/
K_d	Facteur de distribution	/
K_w	Facteur de bobinage	/
y	Pas d'enroulement	/
τ_p	Pas polaire	/
Q_s	Surface d'encoche	(mm ²)
L_s	Longueur du circuit magnétique statorique	(mm)
D_s	Diamètre intérieure statorique	(mm)
N_s	Nombre d'encoches statorique	/
q	Nombre d'encoche par pole et par phase	/
m	Nombre de phase	/
2P	Nombre de pôles	/
n_r	Vitesse de rotation de rotor	(tr.s ⁻¹)
n_s	Vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant	(tr.s ⁻¹)
P	Nombre de paires de pôles	/
θ_r	Position du rotor	rd
I	Intensité	(A)
U	Tension	(Volt)
MASDE	Machine asynchrone double étoile	/
MAS	Machine asynchrone triphasé	/
E_{ph}	La tension induit	(Volt)
B	Induction magnétique dans l'entrefer	(T)
f	La fréquence	(Hz)
D	Diamètre de conducteur	(mm)
N	Nombre de conducteur	/
C_{max}	Le couple électromécanique maximale	(Nm)
F_s	L'amplitude de la FMM statorique	(AT/Pôle)
N_{ph}	Nombre de spires par phase	/
ϕ_{sr}	Flux par pôles	(Wb)

CHAPITRE 03 :

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
I_n	Courant nominal du moteur	(A)
P_n	Puissance nominale du moteur	(Watt)
ω_n	Vitesse mécanique nominale du moteur	tr/min
L_r	Inductance cyclique du rotor	(H)
L_s	Inductance cyclique du stator	(H)
R_r	Résistance rotorique	(Ω)
R_s	Résistance d'une phase du stator	(Ω)
ω_s	Pulsation de synchronisme	rd/s
X_1	Réactance globale stator et rotor	(Ω)
X_m	Réactance de la partie magnétisante	(Ω)
Q_{cc}	Puissance réactive à court-circuit	(Watt)
p_{cc}	Puissance active à court-circuit	(Watt)
p_{fer}	Perte fer	(Watt)
p_j	Perte joule	(Watt)
P_{mec}	Perte mécanique	(Watt)
f_r	Fréquence de référence	(Hz)
U_n	Tension nominale du moteur	(V)
P_{10}	Puissance utile à vide	(Watt)
I_{scc}	Courant de ligne mesuré « essai rotor bloqué »	(Ampère)
U_{scc}	Tension composée mesurée « essai rotor bloqué »	(Volt)
n_r	Vitesse de rotation de rotor	(tr.s ⁻¹)
n_s	Vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant	(tr.s ⁻¹)
Q_{reacs}	Energie réactive absorbée à vide	(var)
P_{scc}	Puissance active mesurée essai rotor bloqué	(Watt)

Introduction Générale

Les machines électriques sont l'élément le plus important dans les applications de l'énergie électrique à savoir : la production et les entraînements électriques. La machine à courant continu présente l'avantage d'être facilement commandable grâce au découplage naturel qui existe entre le flux et le couple. Cependant, l'inconvénient majeur réside dans l'entretien du dispositif balais-collecteur. Les machines à courant alternatif ont remplacé les machines à courant continu aux entraînements à vitesse constante, grâce à leurs simplicités de construction et au bon rapport entre le volume et la puissance. Parmi ces machines, la machine asynchrone à cage d'écureuil est la plus répandue en raison de sa robustesse.

Le moteur électrique asynchrone est le plus répandu des moteurs alternatifs. Il est connu également sous le terme " anglo-saxon " de « induction motor ». Il est alimenté par le courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces derniers n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Ils sont alimentés par des sources alternatives triphasé. Il a la particularité d'être robuste et simple. Leurs gammes de puissance peuvent aller de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. Ils sont installés sur des machines à outils tels que les nettoyeurs à haute pression

Les machines multi-phases représentent depuis plusieurs années un intérêt grandissant pour les chercheurs dans le domaine des machines électriques. Ce type de machine peut être utilisé pour des systèmes de traction électrique automobile, de propulsion électrique maritime, aérogénérateurs ou bien pour des applications électriques industrielles de haute puissance [1].

En particulier là, il s'agit du moteur asynchrone double étoile (MASDE), qui présente plusieurs avantages. En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport à celles conventionnelles triphasées, tels que : segmentation de la puissance, minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, réduction des courants harmoniques, grande fiabilité et forte puissance [1].

Dans sa configuration classique, deux enroulements triphasés identiques, se partagent le même stator et sont décalés d'un angle électrique de 30° (entre deux phases adjacentes). Ces enroulements ont le même nombre de pôles et sont alimentés à la même fréquence. La structure du rotor reste identique à celle de la MAS [2]. Une telle machine a l'avantage, outre la segmentation de puissance et la redondance intéressante qu'elle introduit, de réduire de manière significative les ondulations du couple dues aux harmoniques de rang 3, 5 et 7. Cette possibilité d'éliminer certains harmoniques est un réel avantage de la machine asynchrone à double étoile MASDE. Par ailleurs, un nombre élevé de phases confère intrinsèquement une meilleure fiabilité à l'ensemble convertisseur machine, en permettant des fonctionnements en modes dégradées lors d'un défaut sur une ou plusieurs phases.

Notre travail se focalisera sur l'étude des performances d'un moteur asynchrone à cage double étoile. En premier lieu nous nous intéresserons à la réalisation du moteur asynchrone double étoile à partir de celui triphasé.

Dans le premier chapitre, nous présenterons une description de la machine asynchrone double étoile, le principe de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la conception d'enroulement triphasé et double étoile, en premier lieu on calcule tous les paramètres importants pour transformer la machine

Asynchrone triphasé à une machine asynchrone double étoile, ensuite on décrit les schémas de bobinage.

Le dernier chapitre est la partie principale de notre travail, on s'intéresse à la réalisation de la machine asynchrone double étoile. Pour ce faire, le travail est scindé en plusieurs étapes, enlèvement du bobinage de la machine triphasée, mesure de ses dimensions, réalisation du bobinage, enfin, des essais d'isolation, et test de continuité. Ensuite, l'identification des paramètres de la machine asynchrone à cage double étoile.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale et quelques perspectives envisagées.

Chapitre I : Généralités sur la machine asynchrone double étoile (MASDE)

Généralités sur la machine asynchrone double étoile (MASDE)

I.1 Introduction

Le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé ces dernières décennies dans les différentes applications industrielles. Cela est dû à sa robustesse, sa fiabilité, ses performances et à sa simplicité de construction et à son coût de fabrication réduit. D'autre part, avec le récent développement du domaine de l'électronique de puissance, l'alimentation de ce moteur par un onduleur à fréquence variable permet son utilisation dans des applications industrielles qui nécessitent une large gamme de variation de sa vitesse de rotation.

I.2 Les deux types de moteur asynchrone

Parmi les deux types de moteur asynchrone qui existent, l'un est appelé à cage d'écureuil et l'autre à rotor bobine. La technologie avec cage d'écureuil est plus simple, plus robuste et moins chère et représente donc le choix préféré de beaucoup de fabricants et de développeurs

I.2.1 Moteur asynchrone à rotor bobiné (rotor à bague)

Le moteur à rotor bobiné possède un bobinage triphasé relié en étoile et branché à trois résistances externes à l'aide des bagues collectrices. Ce type de moteur s'avère plus coûteux que le moteur à cage d'écureuil. Cependant, il présente les avantages suivants :

- Le couple de démarrage est plus élevé.
- Il est possible de régler la vitesse du moteur à l'aide de résistances extérieures (rhéostats), le courant de démarrage est plus faible lorsqu'on ajoute un rhéostat [3].

I.2.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil : (rotor en court-circuit)

C'est le plus fréquent. Ce type de rotor a été inventé au début des années 1890. Ces rotors sont constitués de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par des anneaux de court-

circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants d'induits [3].

I.3 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- ❖ Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôle magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer ;
- ❖ Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté ;
- ❖ Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

I.4 Les moteurs multiphasés

Selon le nombre de phases statoriques, on différencie deux types de moteurs multiphasés : Il y a ceux dont le nombre de phases est multiple de trois et non multiple.

Le premier type s'appelle le moteur multi-étoile, le deuxième type regroupe le reste d'eux ou le nombre de phases est pair ou impair.

I.4.1 Les moteurs multiphasés de type 1

Ils ont le nombre de phase multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en n étoiles triphasées : $q = 3i$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$).

Ses machines sont également connues sous l'appellation « machines multi-étoiles ». Elles sont distinguées par plusieurs configurations possibles, à savoir pour un nombre donné de phases suivant le décalage angulaire α entre deux bobines adjacentes, en effet, celle avec ($q = 6$) dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \pi/6$ a des caractéristiques différentes de celle dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \pi/3$.

On illustre dans le tableau suivant quelques exemples de machines multiphasées de type 1.

Tableau I-1 : Les machines multiphasées de type 1 [2].

Nombre de phases	Nombre équivalent de phases (q_α)	Décalage angulaire α (rad)	Représentation schématique position des bobines
3	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	6	$\frac{\pi}{6}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
12	6	$\frac{\pi}{6}$	
12	12	$\frac{\pi}{12}$	

I.4.2 Les moteurs multiphasés de type 2

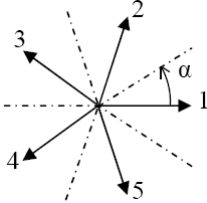
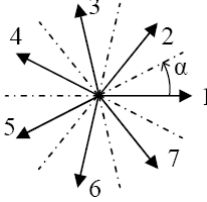
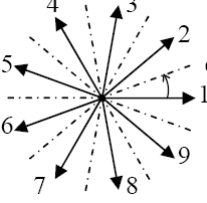
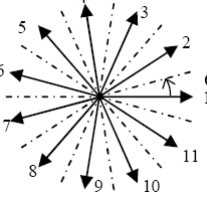
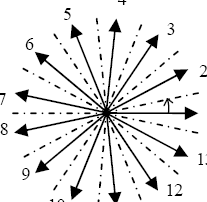
Si le nombre de phase statorique des machines multiphasées est impair et différent de trois

(Nombre de phases n'est pas multiple de trois.) donc, c'est le cas des celles de type 2. Dans ce type, les phases sont régulièrement décalées de $2\pi/q = 2\alpha$. On a donc toujours :

$$q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha}$$

Le tableau suivant illustre quelques exemples de machines multiphasées de type 2.

Tableau I-2 : Les Machines multiphasées de type 2 [2].

Nombre de phases	Nombre équivalent de phases (q_α)	Décalage angulaire α (rad)	Représentation schématique position des bobines
5	5	$\frac{\pi}{5}$	
7	7	$\frac{\pi}{7}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
11	11	$\frac{\pi}{11}$	
13	13	$\frac{\pi}{13}$	

I.5 Applications des machines multiphasées

La machine asynchrone double étoile (MASDE) est utilisée beaucoup plus dans les applications de puissances élevées, par exemple les alternateurs synchrones pour générer une puissance élevée par rapport aux alternateurs conventionnels. Parmi ces applications, on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs et les moulins du ciment, etc. Une autre application concerne l'utilisation de la MASDE dans les systèmes de production de l'énergie éolienne [4].

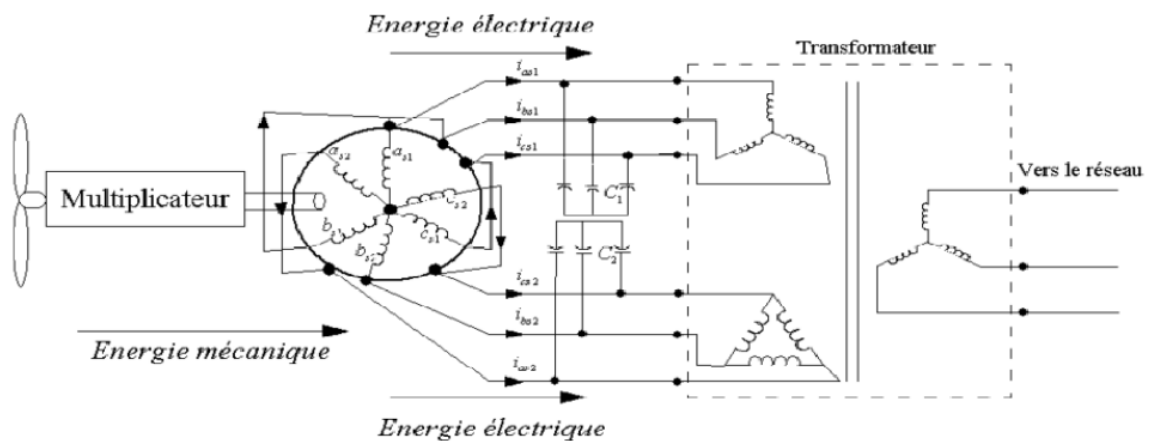


Figure I-1 : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases

I.6 Les avantages et les inconvénients de la MASDE

I.6.1 Les avantages de la MASDE

Ils ont un intérêt grandissant, et en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages de celles asynchrones à cage, ceux des multiphasées. En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages comparativement à ceux conventionnels triphasés [5] :

- Segmentation de puissance ;
- Amélioration de la fiabilité ;
- Amélioration du facteur de puissance ;
- Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

I.6.2 Les inconvénients de la MASDE

La MASDE présente des inconvénients tels que [4] :

- Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur- machine ;
- La multiplication du nombre des semi-conducteurs avec la structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux, ce qui complique évidemment sa commande [4].

I.7 Constitution de la machine asynchrone double étoile (MASDE)

Elle est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor, contrairement à celle asynchrone triphasés. Elle possède plus de 3 phases au stator (2x3 phases), et contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation, les enroulements rotoriques sont court-circuités.

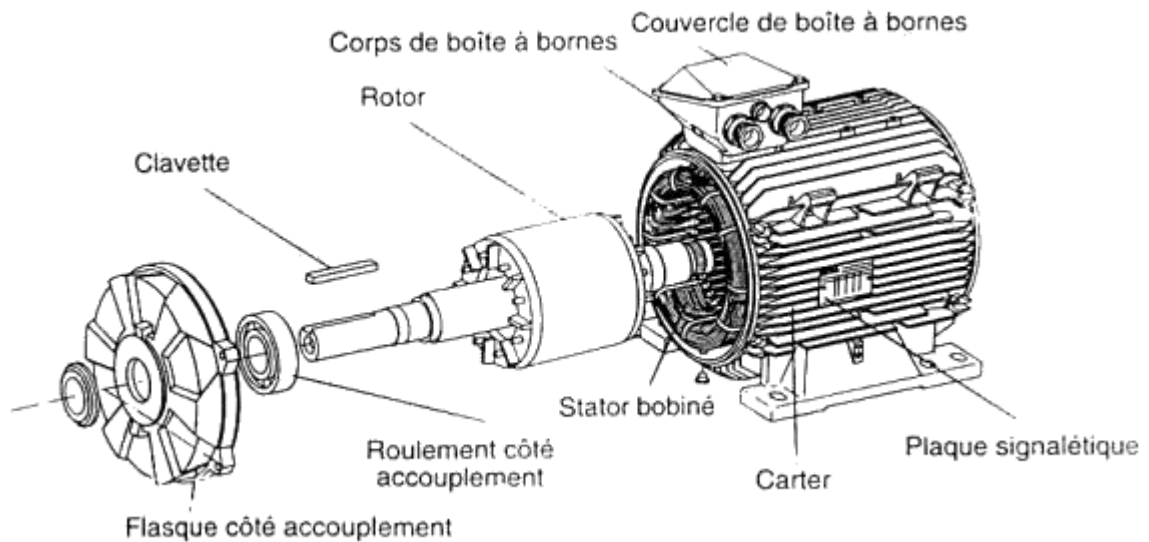


Figure I-2 : Vue éclatée d'une machine asynchrone double étoile

I.7.1 Stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent 6 bobinages indépendants, composent deux groupes de trois phases qu'on appelle les étoiles, chaque étoile est décalée par rapport à l'autre par un angle électrique (α) et alimentée par un réseau triphasé équilibré, elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par des systèmes de tensions ou de courants triphasés stator d'une machine asynchrone.



Figure I-3 : Vue interne du stator

I.7.2 Rotor

Le rotor présente deux configurations dont le choix dépend de l'utilisation de la machine, nous distinguons le rotor bobiné qui supporte trois bobinages similaires à celui du stator, où ces trois bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux même, La deuxième configuration qui est la plus usitée dans l'industrie et qui est également celle utilisée au niveau des différents axes de recherche concernant la machine asynchrone est le rotor à cage d'écureuil [6].

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un Conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.1). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné [6].

Dans le cas de rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les

tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur, de plus, il dispose d'une plus grande robustesse [6].

I.8 Principe de fonctionnement de la MASDE

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans les deux stators (l'étoile 1 alimentée par des courants triphasés et l'étoile 2 alimentée par les mêmes courants triphasés mais décalés d'un angle α). La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques f_s . C'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique, la vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme ω_s , elle est définie comme suit :

$$\omega_s = \frac{f_s}{p} [\text{rad/s}]$$

Ces deux champs tournants sont produits par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les conducteurs du rotor, générant ainsi des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse ω_r inférieure à celle du synchronisme (ω_r/ω_s), ainsi les effets de l'induction statoriques sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est dite vitesse relative :

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

On dira alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement par le rapport :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

Les différents modes de fonctionnement dépendent de la valeur du glissement :

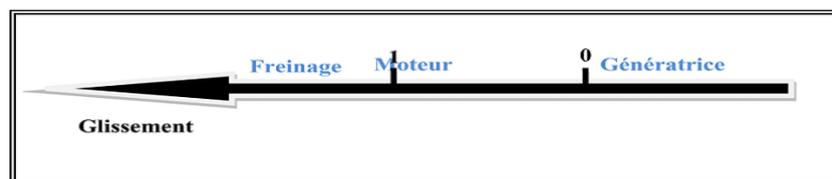


Figure I-4 : Modes de fonctionnement suivant le glissement

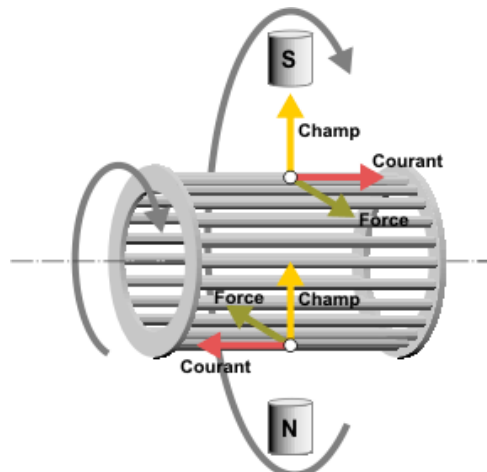


Figure I-5 : Les forces de Laplace sur la cage d'écureuil

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu une idée générale sur les différents types des machines multiphasées, leurs caractéristiques, leurs avantages et inconvénients.

Ensuite, on s'intéresse à celles les plus courantes des MASDE. Il est très intéressant de pouvoir étudier cette dernière en mode de fonctionnement (moteur). Le chapitre suivant a pour objet d'étudier les enroulements de la machine asynchrone simple et double étoile

Chapitre II : Transformation d'une machine asynchrone triphasée à une machine asynchrone double étoile (MASDE)

Transformation d'une machine asynchrone triphasée à une machine asynchrone double étoile (MASDE)

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on transforme l'enroulement d'une machine asynchrone à cage simple en un enroulement d'une machine asynchrone double étoile à tension d'alimentation réduite.

II.2 Enroulement triphasé et enroulement six phases

II.2.1 Principes de conception d'un enroulement triphasé à courant alternatif

La conception des enroulements à courant alternatif veut dire, en fait l'attribution des bobines dans les encoches de différentes phases, l'établissement de direction des courants dans les côtés des bobines et les connexions de bobines par phase et entre les phases, enfin, calculer le nombre de spires de différentes bobines ainsi que le dimensionnement des conducteurs [7].

Le but de l'enroulement alternatif polyphasé est de produire un $F.M.M$ Distribution et rotation sinusoïdales pures, grâce à l'alimentation correcte des différentes phases, courants sinusoïdaux symétriques qui varient dans le temps. Le tout dans le but de générer un couple constant (sans ondulation) dans des conditions de fonctionnement stables. Les enroulements du moteur triphasé sont disposés en une ou deux couches dans les encoches du stator, qui sont des enroulements à une ou deux couches. Le nombre total de bobines est égal à la moitié du nombre d'encoches du stator N_s dans une configuration monocouche et N_s dans une configuration double couche. Les enroulements de moteur à induction ont un nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

II.2.2 Règles de base de conception d'enroulement à courant alternatif

Lors de l'exécution des enroulements et des bobines, il convient de souligner :

- 1- Qu'ils peuvent être connectés en ondulé ou bien en imbriqué [12] ;
- 2- Les bobines pour un enroulement à une couche ne sont jamais affectées par le facteur de pas [12] ;
- 3- Le nombre d'encoches par pôle et par phase peut être un nombre entier ou fractionnaire et

généralement un nombre entier [12] ;

- 4- Etant donné que le coté d'une bobine occupe une encoche et son retour occupe une autre encoche, le nombre des côtés de bobines avec le courant entrant est évidemment égale au nombre des côtés de bobine avec le courant sortant [12] ;
- 5- Le nombre d'encoche de stator par phase N_s / m où m est le nombre de phases dans est l'enroulement du stator [12]; Finalement le décalage de phase entre les forces électromotrices de deux côtés de bobine dans deux encoches adjacentes par radian électrique mesuré.

$$\alpha_{es} = \frac{2P\pi}{N_s}$$

Où, $2P$ =Nombre de pôles et N_s =Nombre d'encoche du stator.

- 6- La répartition des encoches de phases pour produire un enroulement symétrique se fait comme suit :
 - Pour un enroulement à simple couche : les encoches par pôle et par phase forment ce qu'on appelle la zone de phase de côtés de bobine. Ces côtés de bobine retournent dans une zone de phase de π radians électriques retirés de la zone origine de phase susmentionnée [12].

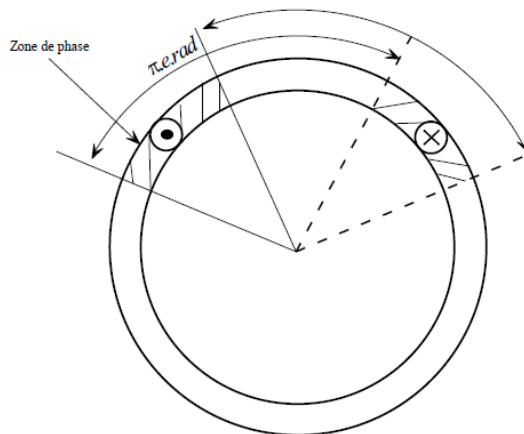


Figure II-1 : Disposition de phase à simple couche

- 7- Le placement des bobines dans les encoches :
 - Pour un enroulement à une seule couche et à pas totale, les côtés des bobines entrants et sortants occupent totalement les encoches affectées de gauche à droite pour chaque phase. Il y aura $(N_s/2m)$ bobines/phase, où m : le nombre de phase dans l'enroulement du stator

de la machine [12] ;

- 8- Connexion des bobines par phase : Les bobines par phase ($N_s/2m$) pour les enroulements à simple couche et les bobines par phase (N_s/m) pour les enroulements à double couche sont connectés en série (ou série parallèle) de sorte que les règles de la couche supérieur et la couche inférieur de la polarité FEM / polarité de courant sont respectées, voir les figures (II-1) et (II-2). Avec toutes les bobines par phase connectées en série, on obtient un trajet de courant unique ($a=1$). On peut obtenir des (a) trajets de courant si les bobines ($N_s/2ma$) sont connectées en parallèle dans un enroulement à un seule couche, et les bobines (N_s/ma) sont connecté en parallèle dans un enroulement à double couche [12] ;
- 9- Si le nombre de pôles $2P$, le nombre d'encoche par pôle par phase, q , et le nombre de phases d'une telle conception m est connu, le nombre d'encoche N_s est calculée comme suit : $N_s = 2pqm$.

II.3 Formules de conception de moteur asynchrone triphasé

- Il est connu que pour un enroulement triphasé équilibré, le nombre d'encoche doit être multiple de 3, avec en minimum une encoche par pôle et par phase. Pour une simple machine à deux pôles et m phases, le nombre minimal d'encoche est $2 \times P \times m$ (soit 6 encoches, 2 pôles, cas de triphasé) ;
- Le tableau ci-dessous indique les combinaisons possibles des encoches pour un moteur à induction triphasé qui peut être facilement reconfigure en moteur à induction double étoile :

Nombre d'encoches	Nombre de pôles	Nombre de phase / Nombre d'encoche par pole et par phase	Nombre de phase / Nombre d'encoche par pole et par phase
	2	3/2	6/1
12	4	3/1	6/ fractionnaire (1/3)
	6	3/ fractionnaire (2/3)	6/ fractionnaire (2/3)
	2	$\frac{3}{4}$	6/2
24	4	3/2	6/1
	6	3/ fractionnaire (4/3)	6/ fractionnaire (2/3)
36	2	3/6	6/3
	4	3/3	6/ fractionnaire (3/2)
	4	3/2	6/1
48	2	3/8	6/4
	4	$\frac{3}{4}$	6/2
	6	3/ fractionnaire (8/3)	6/fractionnaire (4/3)
	2	3/10	6/5

60	4	3/5	6/fractionnaire (5/2)
	6	3/fractionnaire (10/3)	6/fractionnaire (5/3)
72	2	3/12	6/6
	4	3/6	6/3
	6	3/4	6/2

Tableau II-1 : Combinaisons possible pour les moteurs à induction triphasés, qui peuvent être reconfigurées aux moteurs à induction six phases

Comme il est donné suggérer dans le tableau (II-1), il est préférable d'éviter une valeur fractionnaire des encoches par pôle et par phase. Par conséquent les combinaisons comme une machine à 12 encoches à 6 pôles ou machine à 60 encoches à 6 pôles ne sont pas considérées comme applicables pour la reconfiguration de triphasée à six phases. La combinaison d'encoche et de pôle choisi pour ce travail est une machine triphasée à induction à 36 encoches avec 6 pôles.

II.3.1 Caractéristiques du moteur étudié

Le moteur étudié est un moteur à induction à cage d'écureuil :

- Nombre d'encoches $N_s = 36$ encoches ;
- Nombre de pôles = 4 pôles ;
- Puissance nominale = 1.1 kW ;
- La tension nominale 230-400 V ;
- Le courant nominal par phase = 2.66 A ;
- La vitesse nominale = 1410 tr/min ;
- Facteur de puissance $\cos\varphi = 0.81$;
- Le diamètre intérieur de l'alésage du stator. $D_s = 92.45$ mm ;
- L'enroulement statorique est un enroulement imbriqué à 64 spires par bobine et 6 bobines par phase ;
- Le nombre de spires par phase $N_{ph} = 384$ spires ;
- Longueur du circuit magnétique de stator $L = 65.81$ mm ;
- Le nombre encoche par pôle par phase $q = 3$;
 - Nombre de groupe = $2pm = 4 \times 3 = 12$;
 - Nombre de bobine par phase = $N_s / 2m = 36 / 6 = 6$;

- Le diamètre du conducteur (fil de cuivre), $D_{co}=0,61$ mm ;
- La section du conducteur $S_{co}=0.292$ mm² ;
- La densité de courant :

$$J = \frac{I}{S_{co}} = \frac{2.66}{0.292} = 9.11 \frac{A}{mm} \quad (\text{II-2})$$

- La surface de l'encoche $Q_s = 44.77$ mm²,

$$Q_s = \frac{b_1+b_2}{2} \left(h_z - h_p - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2} \right) + (b_1^2 + b_2^2) \frac{\pi}{8} \quad (\text{II-3})$$

Telle que :

- Largeur inférieure d'encoche $b_1 = 5.46$ mm ;
- Largeur supérieure d'encoche $b_2 = 4.15$ mm ;
- L'ouverture d'encoche $bp = 3.23$ mm ;
- La hauteur d'encoche $hz = 13.51$ mm.

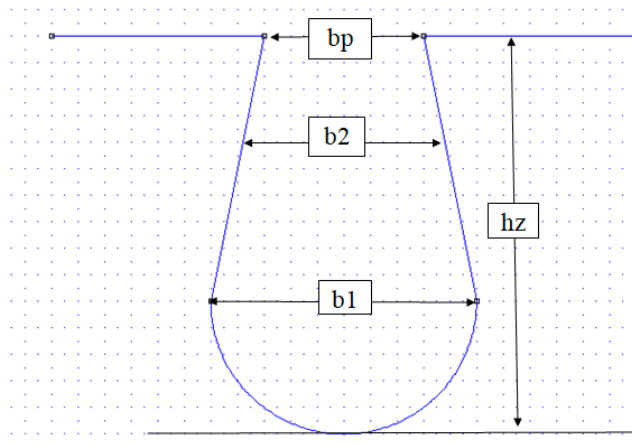


Figure II-2 : Représentation des dimensions d'une encoche

- Facteur de remplissage : $K_{re} = \frac{S_{co} \times Nph}{Q_s} = 0.417$

Les dimensions du rotor sont les suivant :

- Diamètre de rotor $Dr = 89.98$ mm ;

- Longueur de rotor $L = 66.49$ mm ;
- L'entrefer $g = 1.23$ mm ;

II.3.2 Calcul de couple à l'aide des équations de conception

La tension induite par phase est la tension élémentaire induite dans une seule spire multipliée par le nombre de spire par phase N_{ph} .

L'équation de la tension induite est :

$$E_{ph} = 4.44 f \phi_{sr} N_{ph} K_w \quad (\text{II-5})$$

Telle que :

f : La fréquence ;

ϕ_{sr} : Le flux par pôles ;

N_{ph} : Nombre de spires par phase ;

K_w : Facteur de bobinage.

Cela est vrai si l'enroulement est à pas totale et le nombre d'encoche par pôle par phase, $q = 1$.

Si $q > 1$, alors la tension induite dans une bobine d'enroulement d'une phase aura la même amplitude que celle d'une bobine adjacente, mais décalé par angle de phase, en rais hexa son de la forme d'onde sinusoïdale de densité de flux répartis dans l'espace de l'entrefer. Ainsi, la connexion en série des bobines ne donne pas la somme algébrique des tensions induites, mais dans une moindre valeur. Par conséquent la valeur calculée doit être multiplié par le facteur de bobinage K_w . Ici, l'angle de phase entre les tensions induites dans les deux encoches voisines est [7][8][10] :

II.4 Introduction

Dans ce chapitre, on transforme l'enroulement d'une machine asynchrone à cage simple en un enroulement d'une machine asynchrone double étoile à tension d'alimentation réduite.

II.5 Enroulement triphasé et enroulement six phases

II.5.1 Principes de conception d'un enroulement triphasé à courant alternatif

La conception des enroulements à courant alternatif veut dire, en fait l'attribution des bobines dans les encoches de différentes phases, l'établissement de direction des courants dans les côtés des bobines et les connexions de bobines par phase et entre les phases, enfin, calculer le nombre de spires de différentes bobines ainsi que le dimensionnement des conducteurs [7].

Le but de l'enroulement alternatif polyphasé est de produire un *F.M.M* Distribution et rotation sinusoidales pures, grâce à l'alimentation correcte des différentes phases, courants sinusoidaux symétriques qui varient dans le temps. Le tout dans le but de générer un couple constant (sans ondulation) dans des conditions de fonctionnement stables. Les enroulements du moteur triphasé sont disposés en une ou deux couches dans les encoches du stator, qui sont des enroulements à une ou deux couches. Le nombre total de bobines est égal à la moitié du nombre d'encoches du stator N_s dans une configuration monocouche et N_s dans une configuration double couche. Les enroulements de moteur à induction ont un nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

II.5.2 Règles de base de conception d'enroulement à courant alternatif

Lors de l'exécution des enroulements et des bobines, il convient de souligner :

- Qu'ils peuvent être connectés en ondulé ou bien en imbriqué [12] ;
- Les bobines pour un enroulement à une couche ne sont jamais affectées par le facteur de pas [12] ;
- Le nombre d'encoches par pôle et par phase peut être un nombre entier ou fractionnaire et généralement un nombre entier [12] ;
- Etant donné que le côté d'une bobine occupe une encoche et son retour occupe une autre encoche, le nombre des côtés de bobines avec le courant entrant est évidemment égale au nombre des côtés de bobine avec le courant sortant [12] ;
- Le nombre d'encoche de stator par phase N_s / m où m est le nombre de phases dans est l'enroulement du stator [12]; Finalement le décalage de phase entre les forces électromotrices de deux côtés de bobine dans deux encoches adjacentes par radian électrique mesuré.

$$\alpha_{es} = \frac{2P\pi}{N_s}$$

Où, $2P$ =Nombre de pôles et N_s =Nombre d'encoche du stator.

10- La répartition des encoches de phases pour produire un enroulement symétrique se fait

comme suit :

- Pour un enroulement à simple couche : les encoches par pôle et par phase forment ce qu'on appelle la zone de phase de côtés de bobine. Ces côtés de bobine retournent dans une zone de phase de π radians électriques retirés de la zone origine de phase susmentionnée [12].

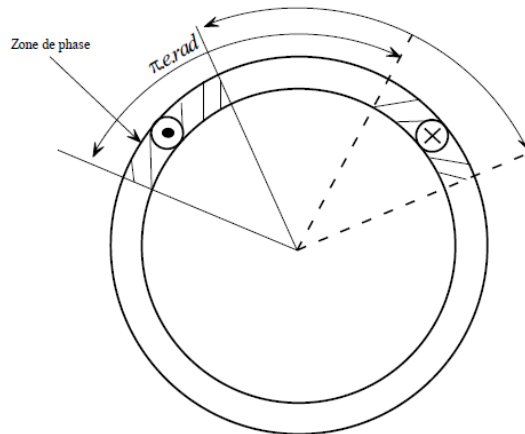


Figure II-3 : Disposition de phase à simple couche

- Le placement des bobines dans les encoches :
 - Pour un enroulement à une seule couche et à pas totale, les côtés des bobines entrants et sortants occupent totalement les encoches affectées de gauche à droite pour chaque phase. Il y aura $(N_s/2m)$ bobines/phase, où m : le nombre de phase dans l'enroulement du stator de la machine [12] ;
- Connexion des bobines par phase : Les bobines par phase $(N_s/2m)$ pour les enroulements à simple couche et les bobines par phase (N_s/m) pour les enroulements à double couche sont connectés en série (ou série parallèle) de sorte que les règles de la couche supérieur et la couche inférieur de la polarité FEM / polarité de courant sont respectées, voir les figures (II-1) et (II-2). Avec toutes les bobines par phase connectées en série, on obtient un trajet de courant unique ($a=1$). On peut obtenir des (a) trajets de courant si les bobines $(N_s/2ma)$ sont connectées en parallèle dans un enroulement à un seule couche, et les bobines (N_s/ma) sont connecté en parallèle dans un enroulement à double couche [12] ;
- Si le nombre de pôles $2P$, le nombre d'encoche par pôle par phase, q , et le nombre de phases d'une telle conception m est connu, le nombre d'encoche N_s est calculée comme suit : N_s

$$= 2 pqm.$$

II.6 Formules de conception de moteur asynchrone triphasé

- Il est connu que pour un enroulement triphasé équilibré, le nombre d'encoche doit être multiple de 3, avec en minimum une encoche par pôle et par phase. Pour une simple machine à deux pôles et m phases, le nombre minimal d'encoche est $2 \times P \times m$ (soit 6 encoches, 2 pôles, cas de triphasé) ;
- Le tableau ci-dessous indique les combinaisons possibles des encoches pour un moteur à induction triphasé qui peut être facilement reconfiguré en moteur à induction double étoile :

Nombre d'encoches	Nombre de pôles	Nombre de phase / Nombre d'encoche par pole et par phase	Nombre de phase / Nombre d'encoche par pole et par phase
	2	3/2	6/1
12	4	3/1	6/ fractionnaire (1/3)
	6	3/ fractionnaire (2/3)	6/ fractionnaire (2/3)
24	2	$\frac{3}{4}$	6/2
	4	3/2	6/1
	6	3/ fractionnaire (4/3)	6/ fractionnaire (2/3)
36	2	3/6	6/3
	4	3/3	6/ fractionnaire (3/2)
	4	3/2	6/1
48	2	3/8	6/4
	4	$\frac{3}{4}$	6/2
	6	3/ fractionnaire (8/3)	6/fractionnaire (4/3)
60	2	3/10	6/5
	4	3/5	6/fractionnaire (5/2)
	6	3/fractionnaire (10/3)	6/fractionnaire (5/3)
72	2	3/12	6/6
	4	3/6	6/3
	6	$\frac{3}{4}$	6/2

Tableau II-2 : Combinaisons possible pour les moteurs à induction triphasés, qui peuvent être reconfigurées aux moteurs à induction six phases

Comme il est donné suggérer dans le tableau (II-1), il est préférable d'éviter une valeur fractionnaire des encoches par pôle et par phase. Par conséquent les combinaisons comme une machine à 12 encoches à 6 pôles ou machine à 60 encoches à 6 pôles ne sont pas considérées comme applicables pour la reconfiguration de triphasée à six phases. La combinaison d'encoche

et de pôle choisi pour ce travail est une machine triphasée à induction à 36 encoches avec 6 pôles.

II.6.1 Caractéristiques du moteur étudié

Le moteur étudié est un moteur à induction à cage d'écureuil :

- Nombre d'encoches $N_s = 36$ encoches ;
- Nombre de pôles = 4 pôles ;
- Puissance nominale = 1.1 kW ;
- La tension nominale 230-400 V ;
- Le courant nominal par phase = 2.66 A ;
- La vitesse nominale = 1410 tr/min ;
- Facteur de puissance $\cos\varphi = 0.81$;
- Le diamètre intérieur de l'alésage du stator. $D_s = 92.45$ mm ;
- L'enroulement statorique est un enroulement imbriqué à 64 spires par bobine et 6 bobines par phase ;
- Le nombre de spires par phase $N_{ph} = 384$ spires ;
- Longueur du circuit magnétique de stator $L = 65.81$ mm ;
- Le nombre encoche par pôle par phase $q = 3$;
 - Nombre de groupe = $2pm = 4 \times 3 = 12$;
 - Nombre de bobine par phase = $N_s / 2m = 36 / 6 = 6$;
- Le diamètre du conducteur (fil de cuivre), $D_{co} = 0.61$ mm ;
- La section du conducteur $S_{co} = 0.292$ mm² ;
- La densité de courant :

$$J = \frac{I}{S_{co}} = \frac{2.66}{0.292} = 9.11 \frac{A}{mm} \quad (\text{II-2})$$

- La surface de l'encoche $Q_s = 44.77$ mm²,

$$Q_s = \frac{b_1 + b_2}{2} \left(h_z - h_p - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2} \right) + (b_1^2 + b_2^2) \frac{\pi}{8} \quad (\text{II-3})$$

Telle que :

- Largeur inférieure d'encoche $b_1 = 5.46 \text{ mm}$;
- Largeur supérieure d'encoche $b_2 = 4.15 \text{ mm}$;
- L'ouverture d'encoche $bp = 3.23 \text{ mm}$;
- La hauteur d'encoche $hz = 13.51 \text{ mm}$.

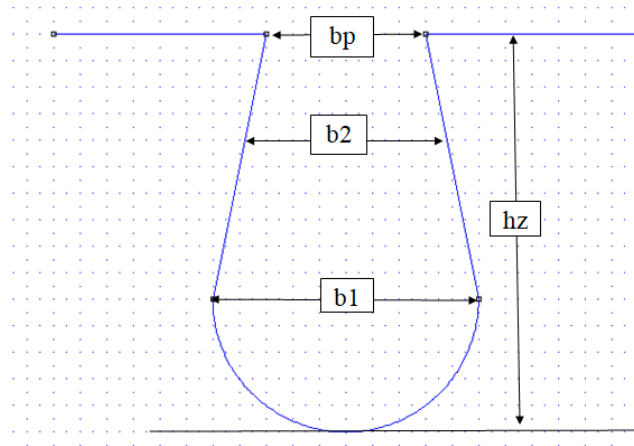


Figure II-4 : Représentation des dimensions d'une encoche

➤ Facteur de remplissage : $K_{re} = \frac{S_{co} \times N_{ph}}{Q_s} = 0.417$

Les dimensions du rotor sont les suivant :

- Diamètre de rotor $D_r = 89.98 \text{ mm}$;
- Le langur de rotor $L = 66.49 \text{ mm}$;
- L'entrefer $g = 1.23 \text{ mm}$;

II.6.2 Calcul de couple à l'aide des équations de conception

La tension induite par phase est la tension élémentaire induite dans une seule spire multipliée par le nombre de spire par phase N_{ph} .

L'équation de la tension induite est :

$$E_{ph} = 4.44 f \phi_{sr} N_{ph} K_w \quad (\text{II-5})$$

Telle que : f : La fréquence

ϕ_{sr} : Le flux par pôles.

N_{ph} : Nombre de spires par phase

K_w : Facteur de bobinage

Cela est vrai si l'enroulement est à pas totale et le nombre d'encoche par pôle par phase, $q = 1$.

Si $q > 1$, alors la tension induite dans une bobine d'enroulement d'une phase aura la même amplitude que celle d'une bobine adjacente, mais décalé par angle de phase, en rais hexa son de la forme d'onde sinusoïdale de densité de flux répartis dans l'espace de l'entrefer. Ainsi, la connexion en série des bobines ne donne pas la somme algébrique des tensions induites, mais dans une moindre valeur. Par conséquent la valeur calculée doit être multiplié par le facteur de bobinage K_w . Ici, l'angle de phase entre les tensions induites dans les deux encoches voisines est [7][8][10] :

$$\gamma = \frac{(2P\pi)}{N_s} \quad (\text{II-6})$$

Où, P=nombre pair de pôles.

$$\gamma = \frac{(4 \times 180^\circ)}{36} = 20^\circ \text{ électrique} \quad (\text{II-7})$$

Donc,

Facteur de distribution :

$$k_q = \frac{\sin\left(\frac{q \times \gamma}{2}\right)}{q \times \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (\text{II-8})$$

Par suite : $k_q = 0.984$

Il est connu que le facteur de raccourcissement est défini comme suite :

$$k_\gamma = \sin\left(\frac{\pi \gamma}{2 \tau_c}\right) \quad (\text{II-10})$$

Avec τ_p , Pas polaire et γ

Dans ce cas, puisque l'enroulement est à pas total, $\gamma = \tau_p$,

$K_y = 1$; Le facteur de bobinage, K .

$$K_w = K_q \times K_\gamma = 0.984 \times 1 = 0.984 \quad (\text{II-11})$$

L'équation (II-5) donne la FMM induite par phase :

$$E_{ph} = 4.44 f \phi_{sr} N_{ph} K_w \quad (\text{II-12})$$

Dans ce cas,

$$E_{ph} = 380 \text{ V} \quad (\text{II-13})$$

A partir des équations (II-12) et (II-13)

$$\phi_{sr} = \frac{E_{sr}}{4.44 f \cdot N_{ph} \cdot K_w} = \frac{380}{4.44 \times 50 \times 384 \times 0.984} = 4.53 \times 10^{-3} \text{ Wb} \quad (\text{II-14})$$

Sachant que le flux par pôle est donné par l'équation :

$$\phi_{sr} = \frac{2\tau_p L B_{sr}}{\pi} \quad (\text{II-15})$$

Et à partir de laquelle la densité de flux maximale par pôle B_{sr} peut être exprimée par :

$$B_{sr} = \frac{\phi_{sr} \times \pi}{2 \times \tau_p \times L} \quad (\text{II-16})$$

Où le pas polaire, τ_p est :

$$\tau_p = \frac{D_s \times \pi}{2P} \quad (\text{II-17})$$

Le diamètre de stator est $D_s = 85.80 \text{ mm}$

$$\text{Ainsi :} \quad T_p = 72.61 \quad (\text{II-18})$$

Par conséquent, la densité de flux maximum par pôle :

$$B_{sr} = 1.317 \quad (\text{II-19})$$

La valeur maximale de la FMM statorique, F_{smax} , peut-être exprimée comme suit :

$$F_{smax} = \frac{4k_w N_{ph} I \sqrt{2}}{2P\pi} \quad (\text{II-20})$$

Par conséquent :

$$F_{smax} = 452.45 \text{ AT/POL} \quad (\text{II-21})$$

Le moteur à induction triphasé est en équilibre, l'amplitude de FMM statorique résultante, est donnée par :

$$F_s = \frac{3}{2} F_{smax} \quad ; \quad F_s = 678.67 \quad (\text{II-22})$$

L'expression de la valeur maximale du couple électromécanique développé peut être exprimée comme suit :

$$C_{max} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{2P}{2} \right)^2 \times \phi_{sr} \times F_s \quad \text{NM} \quad (\text{II-23})$$

Par conséquent, la valeur maximale du couple électromécanique développé est calculée comme suit :

$$C_{max} = 19.31 \text{ Nm} \quad (\text{II-24})$$

II.7 Bobinage du stator

L'enroulement du moteur étudié est à simple couche, imbriqué à pas total. Selon les règles de conception des enroulements comme il est expliqué précédemment dans la section (II.1.1), il en résulte que :

- Le nombre d'encoches par pôle par phase $q=3$;
- Le nombre de phase $m=3$;
- Le nombre de pôles $2P=4$;

A partir de l'équation (II-2), le nombre d'encoches :

$$N_s = 2Pqm = 2 \times 3 \times 2 \times 3 = 36$$

Dans le cas du moteur à 36 encoches, considérant une configuration d'enroulement deux

encoches par pôle et par phase à simple couche, le nombre total de bobines est 18, donc il y'a 6 bobines par phase.

Le placement des bobines suivantes pour chaque enroulement dépend de pas de bobine qui est 6 encoches, le placement des bobines des autres phases est fait sur la base de la distribution spatiale des enroulements, la figure (II-4) montre comment les phases sont distribuées dans l'espace et leurs angles associés dans un simple enroulement à 2 pôles, 6 encoches. Cependant, à partir de ce principe illustré à la figure (II-4), on peut obtenir notre configuration d'enroulement, représentée dans le tableau (II-2).

Le schéma développé correspondant au schéma d'enroulement dans le cas de bobines à pas totale est représenté pour chaque phase dans les figures (II-5), (II-6), (II-7), Le schéma développé complet pour les trois phases correspondant au schéma d'enroulement dans le cas de bobines à pas totale est représenté dans la figure (II-8).

En outre, cette figure sera utile pour comprendre le prochain tracé d'enroulement de moteur sixphases [7][12].

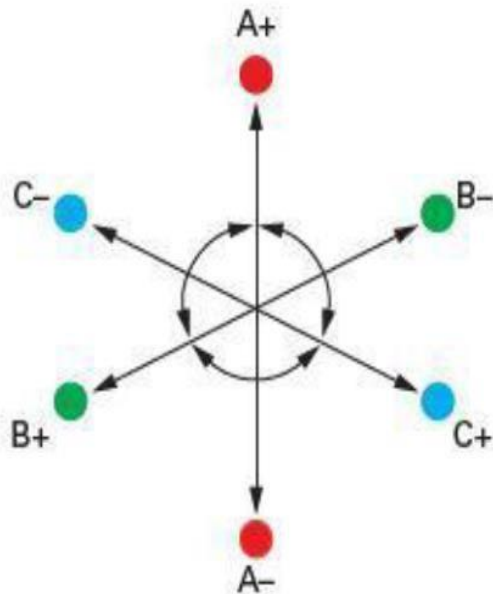


Figure II-5 : Représentation spatiale des trois phases



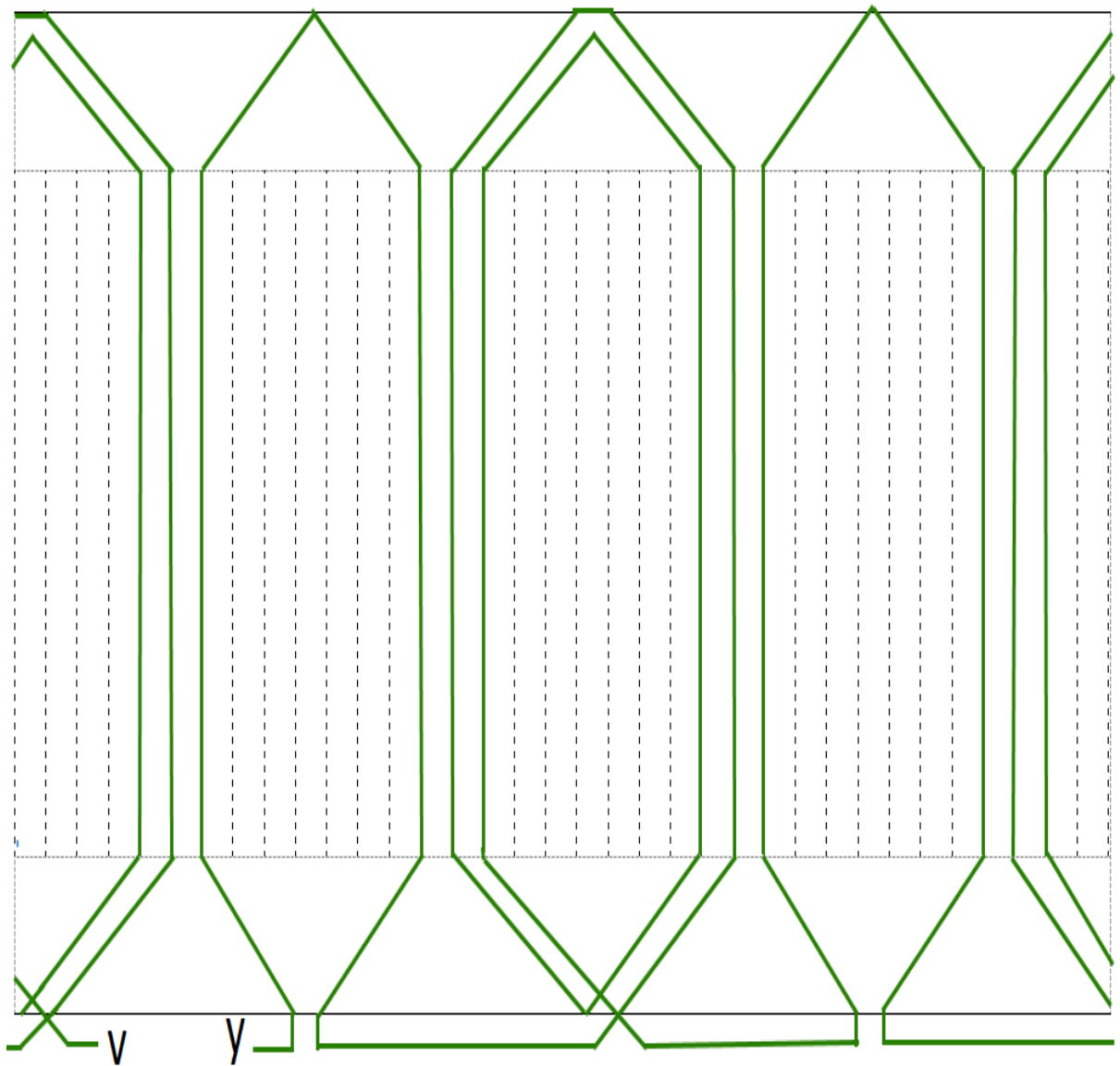
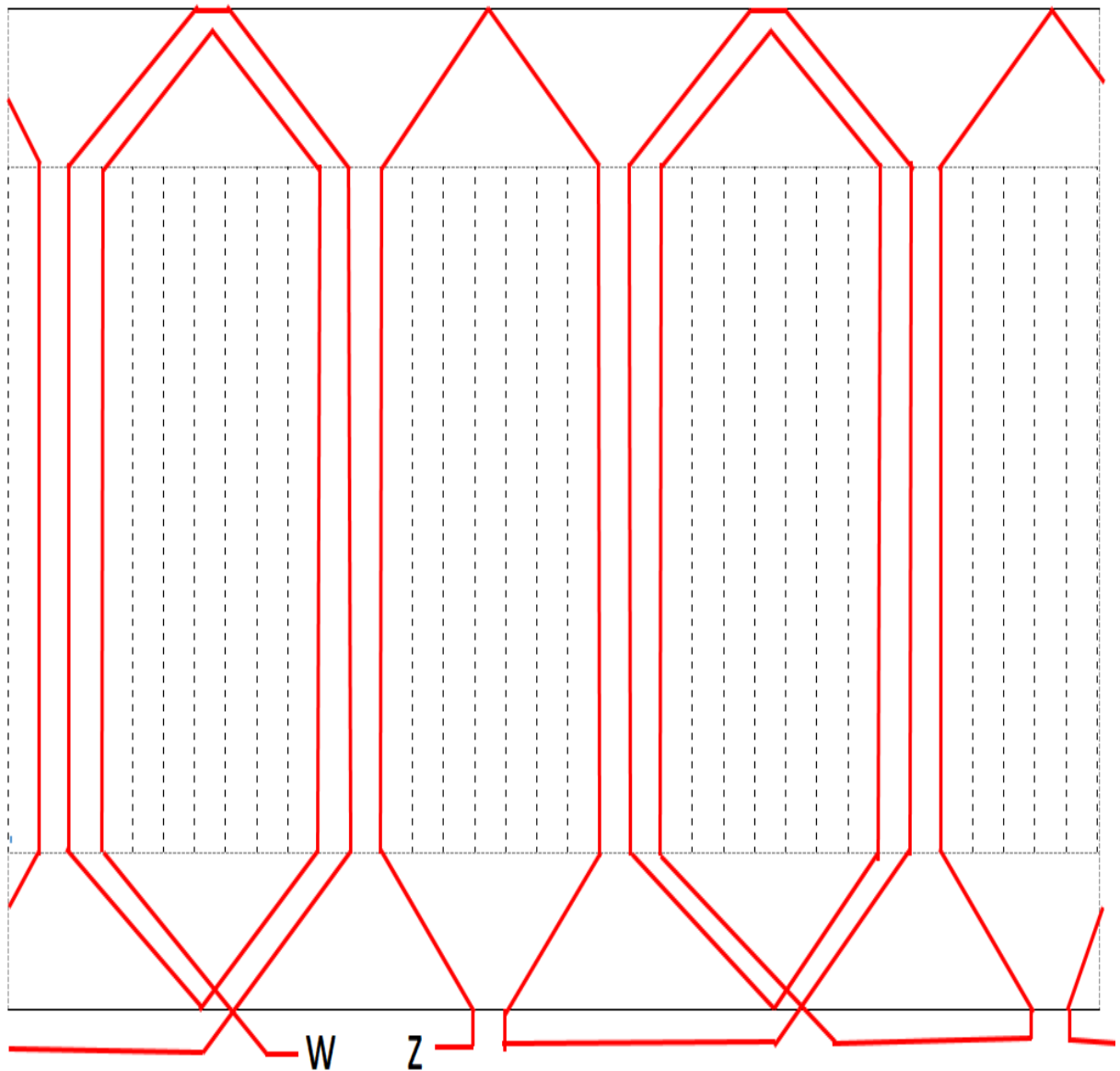
Phase U		Phase W		Phase V				
1		8	3		20	7		14
9, 10	 	17, 18	21, 22	 	29, 30	15, 16	 	23, 24
19	 	26	31	 	2	25	 	32
27, 28	 	35, 36	3, 4	 	11, 12	33, 34	 	5, 6

Tableau II-3 : Configuration d'enroulement triphasée



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
									-	-	+									-	+	+															

Figure II-7 : Raccordement des bobines de la phase V



1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3		
									0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	
				-	-	+								-	+	+																				

Figure II-8 : Raccordement des bobines de la phase W

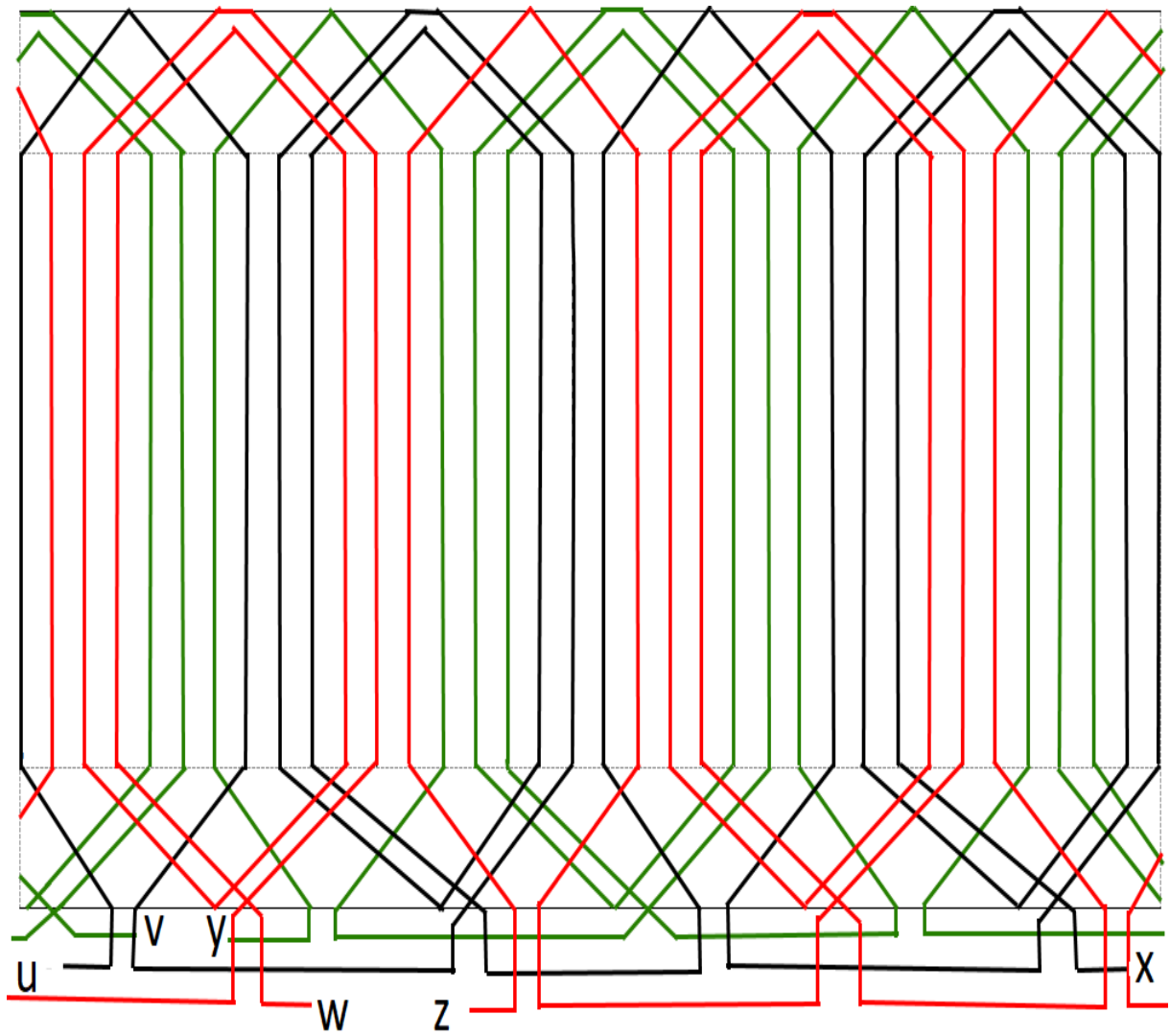


Figure II-9 : Schéma complet de l'enroulement montrant la connexion de toutes les bobines

II.8 Les contraintes et les étapes impliqués dans la conception

d'enroulement six phases

Les contraintes et concepts pris en compte dans la conception du schéma d'enroulement à 6 phases :

- ❖ La principale limitation est de maintenir les mêmes valeurs de couple de sortie et de densité de flux maximale le long de l'entrefer de la machine triphasée 6 phases.
- ❖ La puissance nominale de la machine 6 phases est également maintenue à la même valeur que la machine triphasée.
- ❖ Selon les données de conception disponibles pour la machine triphasée ci-dessus, les équations de couple et d'intensité sont utilisées ici pour déterminer le nombre réel de tours nécessaires pour concevoir une machine double étoile.
- ❖ Les enroulements sont conçus avec le schéma de reconstruction d'enroulement décrit ci-dessus à l'esprit, chacun contenant les déphasages requis entre les différentes phases A, B, C, D, E et F.

II.9 Certaines caractéristiques importantes d'un bon enroulement

- L'enroulement doit préserver la symétrie dans chaque phase. Cela se produira uniquement si l'angle électrique entre les tensions de phase est exactement $360^\circ/m$ [12].
- La tension de phase induite dans les enroulements de phase répartie avec une densité de flux donnée doit être aussi grande que possible, c'est-à-dire que le facteur d'enroulement doit être élevé [12] ;
- Les forme d'onde de la FEM créée par le bobinage doit être identique pour chaque paire de pôles équilibrés et doit contenir que quelques composantes harmoniques que possible avec une forte composante fondamentale [12].

II.10 Paramètres du moteur à induction double étoile

La géométrie du stator et du rotor (la valeur d'entrefer et le diamètre moyen) est la même pour les deux machines triphasées et double étoile, donc la machine double étoile a également 36 encoches dans le stator. Suite aux contraintes mentionnées dans la section (II-4), la puissance

du moteur double étoile est maintenue à une valeur de 750W. Elle a six pôles et le nombre d'encoche par pôles et par phase, q, est donc donnée par :

$$q = N_s / 2P / m = 36 / 6 / 6 = 1 \text{ encoche / pôle / phase .} \quad (\text{II-25})$$

Dans la première étape de la conception, le nombre de spires par phase doit être calculé à partir des équations de conception. Dans la seconde étape, on obtient la tension de fonctionnement du moteur. Enfin, on conçoit le schéma d'enroulement du stator.

II.6.1 Calcul du nombre de spire par phase

A partir de l'équation (II-23), il est connu que la valeur maximale du couple électromécanique développé est exprimée comme suit :

$$C_{max} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{2P}{2} \right)^2 \times \phi_{sr} \times F_s \quad (\text{II-26})$$

Dans laquelle tous les termes ont été définis précédemment.

Une contrainte est de maintenir même densité de flux et de couple que dans le cas de triphasée.

Comme les dimensions de base de la machine double étoile sont les mêmes que la MAS :

$$\tau_p = 72.61 \text{ mm}$$

$$L = 65.81 \text{ mm}$$

Sont resté les mêmes.

A partir de l'équation (II-16), la densité de flux maximale résultante le long de l'entrefer, $B_{sr6 \text{ phase}}$ pour la nouvelle conception de la double étoile est la suivante :

$$B_{sr6 \text{ phase}} = \frac{\pi \times 3.11 \times 10^{-3}}{2 \times 0.07261 \times 0.065841} = 1.02 \text{ Wb / m}_2 \quad (\text{II-27})$$

Il ensuit que le flux par pôle, est aussi de même valeur que pour la machine triphasée.

$$\phi_{sr} = 3.11 \times 10^{-3} \text{ Wb} \quad (\text{II-28})$$

En outre, le couple maximal pour la conception en six phases peut également être rédigé sur la base de l'équation (II-26) comme suit :

$$C_{max} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{2F}{2} \right)^2 \times \phi_{sr} \quad Nm \quad (II-29)$$

$$C_{max} = 19.27 Nm$$

Qui est la même que valeur donnée dans l'équation (II-23).

Par conséquent, il résulte de l'équation (II-25) que l'amplitude de la FMM statorique résultante, $F_{s6phase}$ est la suivante :

$$F_{s6phase} = \frac{C_{max6phase \times 8}}{\pi \times (2P)^2 \times Q_{sr6phase}} = 438.28 AT / pole \quad (II-30)$$

Pour une machine double étoile équilibrée, la valeur maximale de la force magnétomotrice statorique d'une phase, F_{max} est liée à la force magnétomotrice totale par pôle.

$$F_{s6phase} = \frac{6}{2} F_{smax6phase}$$

$$F_{smax6phase} = \frac{2}{6} F_{s6phase} = \frac{2}{6} \times 438.28 = 146.09 AT / Pole \quad (II-31)$$

Cependant, l'équation (II-23), F_{smax} est aussi égale à :

$$F_{smax} = \frac{4 \times k_w \times N_{ph} \times I \times \sqrt{2}}{\pi \times 6} \quad (II-32)$$

Donc :

$$F_{smax6phase} = 146.09 AT \quad (II-33)$$

D'après (II-31) le produit $K_w \times N_{ph}$ est comme suit :

$$K_{w6phase} \times N_{ph6phase} = \frac{\pi \times 2P \times F_{smax6phase}}{4 \times I \times \sqrt{2}} = \frac{\pi \times 6 \times 146.09}{4 \times 2.66 \times \sqrt{2}} = 183 \quad (II-34)$$

On garde le même courant nominal, I , que dans le cas du triphasé, qui est égale 2.66 A, le facteur d'enroulement, $K_{w6phase}$ peut être écrit comme suit :

$$k_{w6phase} = k_{q6phase} \times k_{y6phase} \quad (II-35)$$

$$k_{y6phase} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \frac{y}{\tau_p}\right) \quad (II-36)$$

Ainsi, dans le cas ci-dessus, puisque l'enroulement choisi est à pas total, donc le facteur de distribution égal à :

$$k_{q6phase} = \frac{\sin\left(\frac{q_{6phase} \times \gamma_{6phase}}{2}\right)}{q_{6phase} \sin\left(\frac{\gamma_{6phase}}{2}\right)} \quad (II-37)$$

Où, γ_{6phase} l'angle d'encoche qui est égale 30° , q_{6phase} le nombre d'encoche par pôle par phase est égal à 1, d'où $Kd_{6phase} = 1$.

D'après l'équation (II-34) (II-35), $K_{w6phase} = 1$, Le nombre de spires par phase $N_{ph6phase} = 183$ spires.

On conclure que le nombre de spires choisi par phase pour la conception double étoile est de 183 spires.

II.10.1 Calcul de la tension du moteur double étoile

Puisque l'une des contraintes est de garder la même valeur de puissance de la machine hexaphasée double étoile que dans la machine triphasée, on peut affirmer que la puissance de sortie de la machine triphasée égale la puissance de sortie de la machine hexaphasée double étoile [10] [11].

$$3 \times V_{ph3phase} \times I_{ph3phase} = 6 \times V_{ph6phase} \times I_{ph6phase} \quad (II-38)$$

De l'analyse précédente, on sait que

$$V_{ph3\ phase} = 380\ V\ et\ I_{ph3\ phase} = 2.66\ A \quad (II-39)$$

➤ Si on garde le même courant :

$$I_{ph3} = I_{ph6} = 2.66A$$

Ainsi, à partir de l'équation (II-37)

$$v_{6phase} = \frac{3}{6} \times \frac{v_{ph3phase} \times I_{ph3phase}}{I_{ph6phase}} = \frac{3}{6} \times \frac{380 \times 2.66}{2.66} = 190V \quad (II-40)$$

II.11 Conception de l'enroulement statorique

Dans le cas du moteur à 36 encoches, 6 pôles et 6 phases, le nombre d'encoche par pôle par phase est égal à 1, puisque la conception d'enroulement statorique est disposée à simple couche, le nombre total de bobine par phase est 3 qui est égalent à la moitié du nombre de bobine par phase de la machine triphasé. Chaque phase contient 464 spires (Calculé dans la section précédente), alors, chaque bobine comporte 154 spires [11][12].

L'angle de pas d'encoche de la machine double étoile est donc calculé comme suite :

$$\gamma_{6\ phase} = \frac{360^\circ}{36} = 10^\circ\ mécanique \quad (II-41)$$

$$\gamma_{6\ phase} = 10^\circ\ mécanique \times \frac{2P}{2} = 10^\circ\ mécanique \times \frac{6}{2} = 30^\circ\ électrique \quad (II-42)$$

Par conséquent, si la bobine (1) de phase A commencée à l'encoche (1), la bobine (1) de phase B qui est déphasée de 120° de phase A est placé dans l'encoche (5). Même façon, la bobine (1) de la phase C est placée dans l'encoche (9), la bobine (1) de la phase D est placée dans l'encoche (2), la bobine (1) de la phase E est placé dans l'encoche (6) et la bobine (1) de la phase F est placée dans l'encoche (10), toujours on garde le déphasage entre les phases(A-D), (B-E), (C-F) de 30°. Voir figure (II-11), (II-12), (II-13), (II-14), (II-15), (II-16).

D'autre côté, le déphasage entre l'extrémité de chaque bobine est de 180°e et donc le pas de bobine est 6 encoches. Pour clarifier, la présentation des six premières paires de bobines d'enroulement six phases est montrée à la figure (II-17).

On peut obtenir notre configuration d'enroulement, représentée dans le tableau (II-2), La

présentation de l'étoile (1) et l'étoile (2) est montrée dans la figure (II-18).

Tableau II-4 : Configuration d'enroulement double étoile

Phase A	Phase B	Phase C	Phase D	Phase E	Phase F
1 \Rightarrow 7 ↙	5 \Rightarrow 11 ↙	9 \Rightarrow 15 ↙	2 \Rightarrow 8 ↙	6 \Rightarrow 12 ↙	10 \Rightarrow 16 ↙
13 \Rightarrow 19 ↙	17 \Rightarrow 23 ↙	21 \Rightarrow 27 ↙	14 \Rightarrow 20 ↙	18 \Rightarrow 24 ↙	22 \Rightarrow 28 ↙
25 \Rightarrow 30 ↙	29 \Rightarrow 35 ↙	33 \Rightarrow 39 ↙	26 \Rightarrow 32 ↙	30 \Rightarrow 36 ↙	34 \Rightarrow 4 ↙

II.12 Quelques considérations pour l'enroulement de la machine asynchrone double étoile

Dans ce projet de fin d'étude, la conception de la machine asynchrone double étoile est choisie de telle sorte qu'il existe un déphasage symétrique 120° entre les enroulements de l'étoile (1) et l'angle de zone est de 30° , avec un déphasage symétrique 120° entre les enroulements de l'étoile (2) et l'angle de zone est de 30° , et on garde toujours un déphasage de 30° entre l'étoile (1) et l'étoile (2) [11].

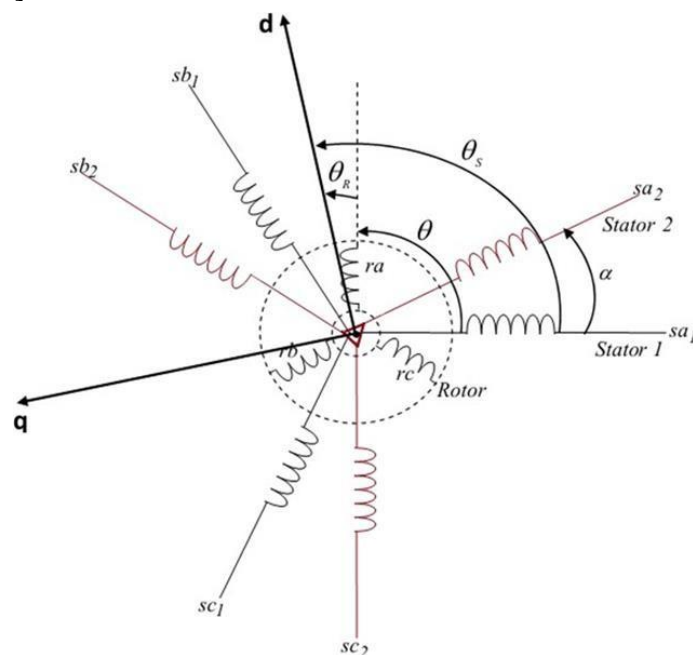


Figure II-10 : Représentation schématique des enroulements de la MSADE

II.13 Modification de calculs

Après qu'on a fait la réalisation et le test, on a vu que le courant à vide est très élevé donc on a deviné que notre moteur a été déjà modifier puisque l'encoche n'été pas rempli à 60 % et dans tous les usines de la réalisation des moteurs il faut qu'on avoir un facteur de remplissage entre 0.6 et 0.7 pour que le moteur fonctionne bien. À la base de ça on a deviné le nombre de spires réel du moteur pour un facteur de remplissage de 0.6 :

$$K_{re} = \frac{S_{co} \times N_{sphase}}{Q_s} \quad \rightarrow \quad N_{sphase} = \frac{K_{re} \times Q_s}{S_{co}} = \frac{0.6 \times 44.77}{0.292} = 92 \text{ spires.}$$

Donc, on propose que le nombre de spires réel du moteur soit 92. Après que on a refait les calculs à la base de ce nombre on trouve que :

- La tension nominale 190 V ;
- Le courant nominal par phase= 2.66 A ;
- La vitesse nominale 950 tr/min ;
- L'enroulement statorique est un enroulement imbrique à 92 spires par bobine et 3 bobines par phase ;
- Le nombre de spires par phase $N_{ph} = 276 \text{ spires}$;
- Le diamètre du conducteur (fil de cuivre), $D_{co}=0,61 \text{ mm}$;
- La section du conducteur $S_{co}=0.292 \text{ mm}^2$;
- La puissance du moteur $P = 1.1 \text{ kW}$.

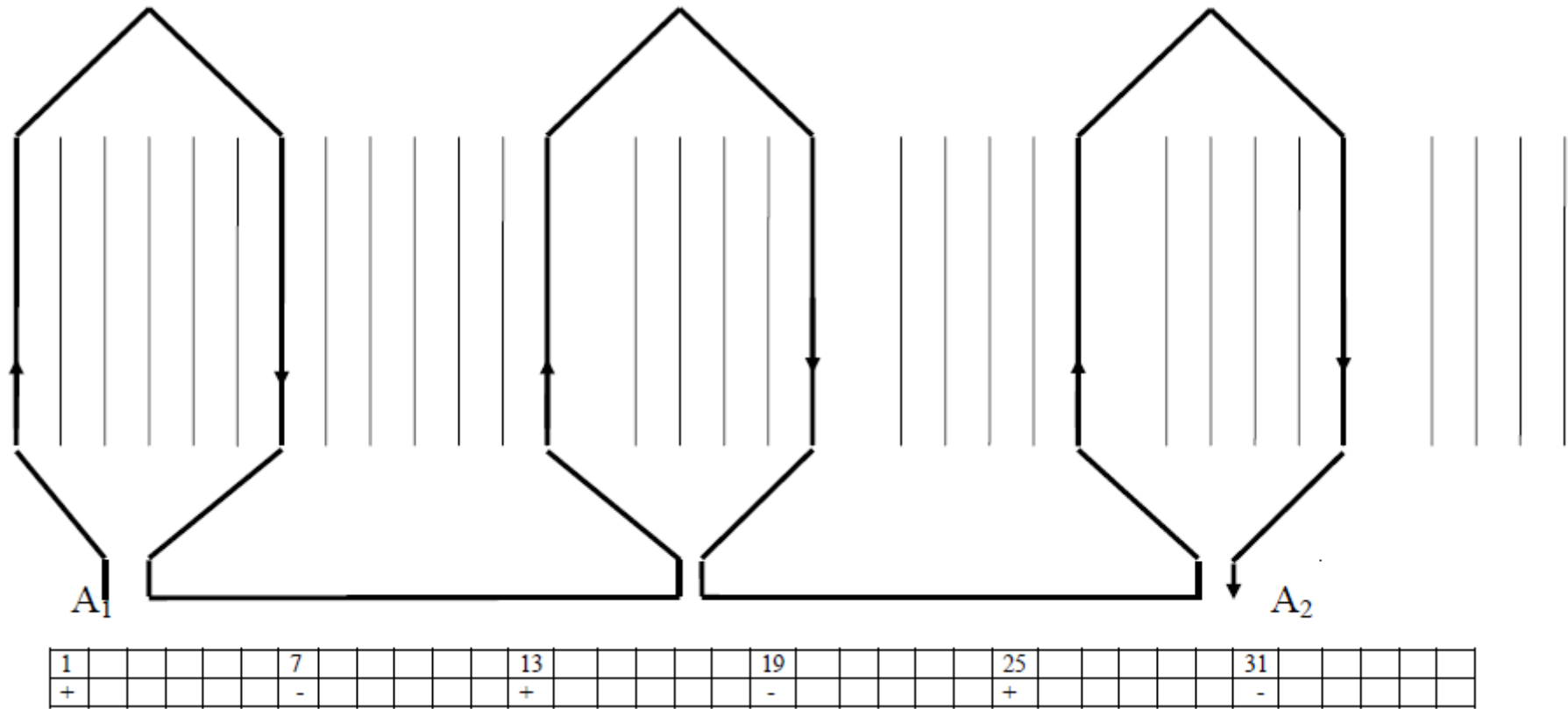


Figure II-11 : Raccordement des bobines de la phase A

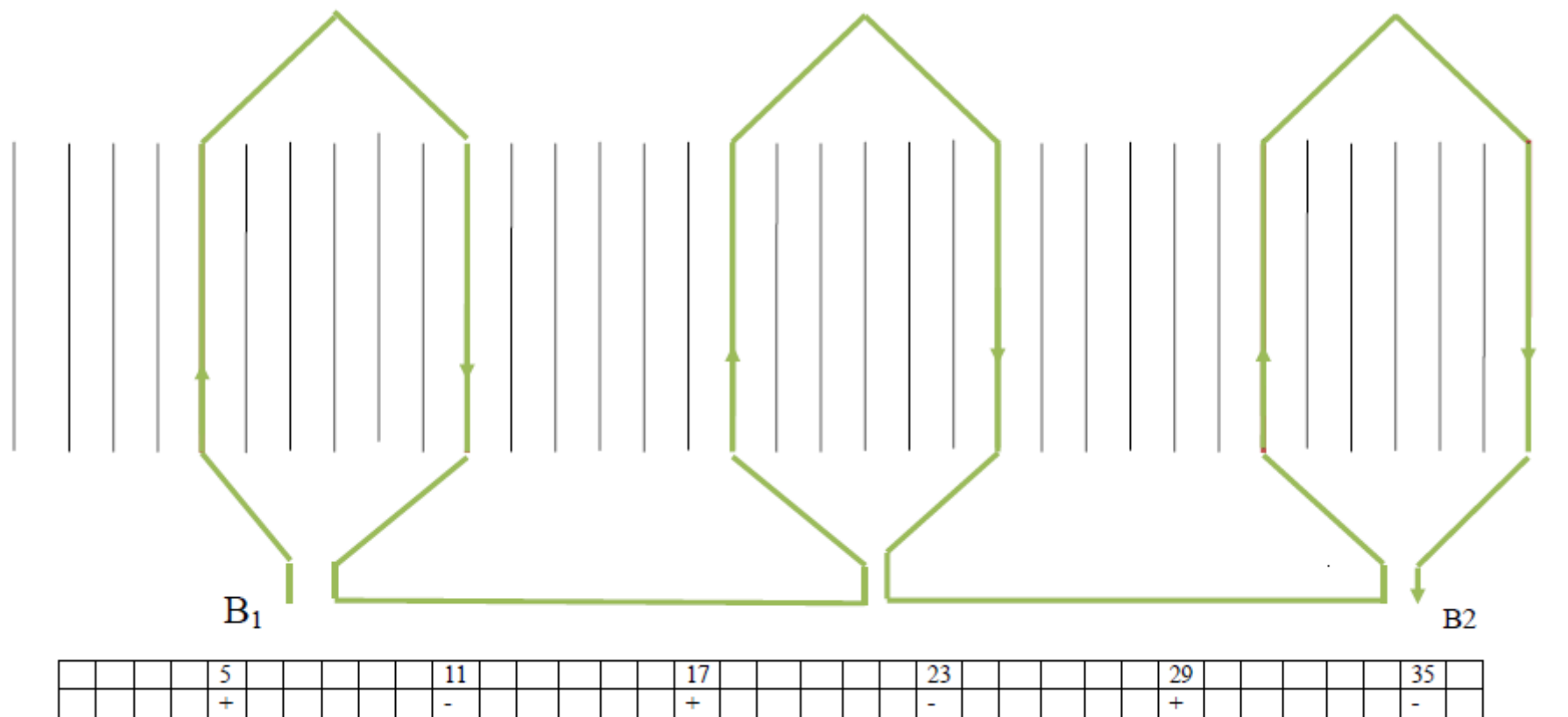


Figure II-12 : Raccordement des bobines de la phase B

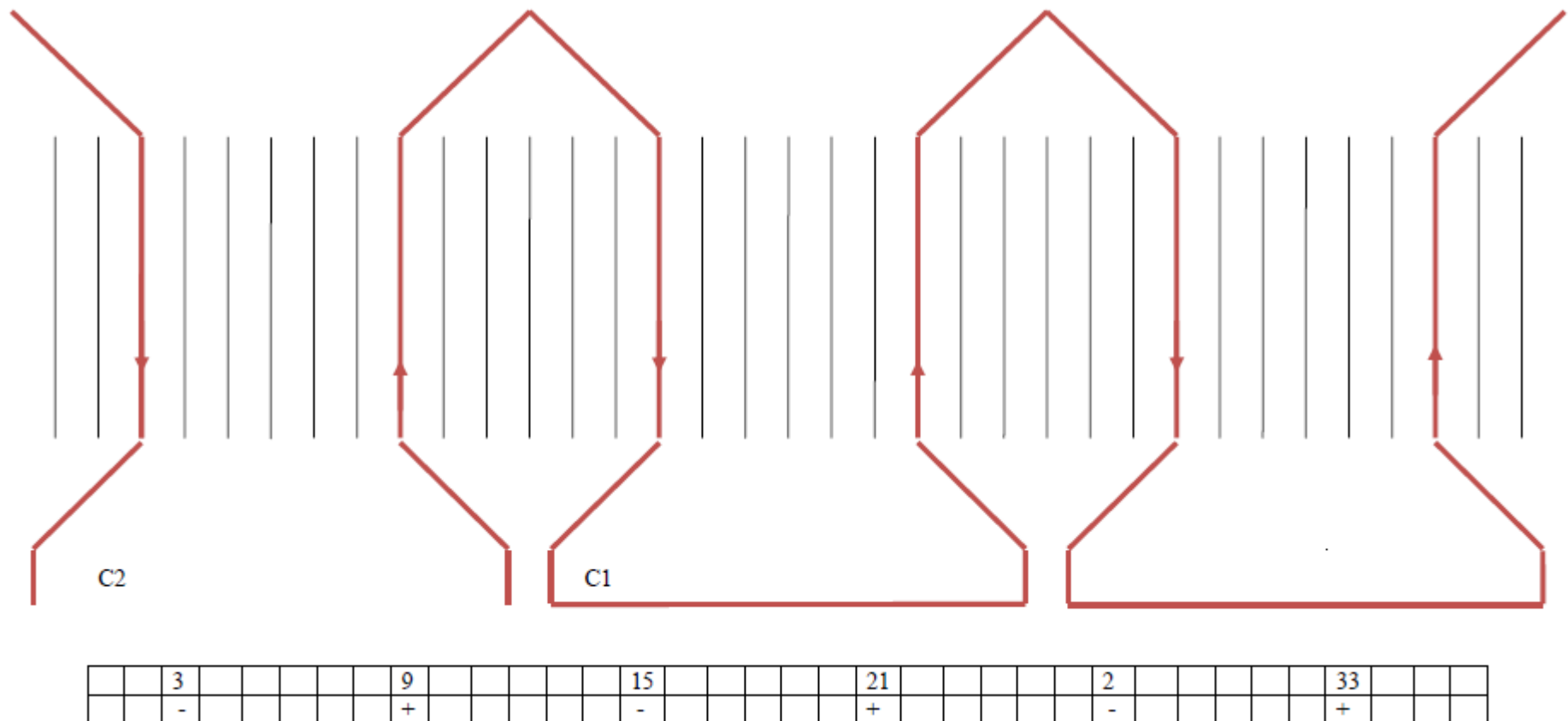


Figure II-13 : Raccordement des bobines de la phase C

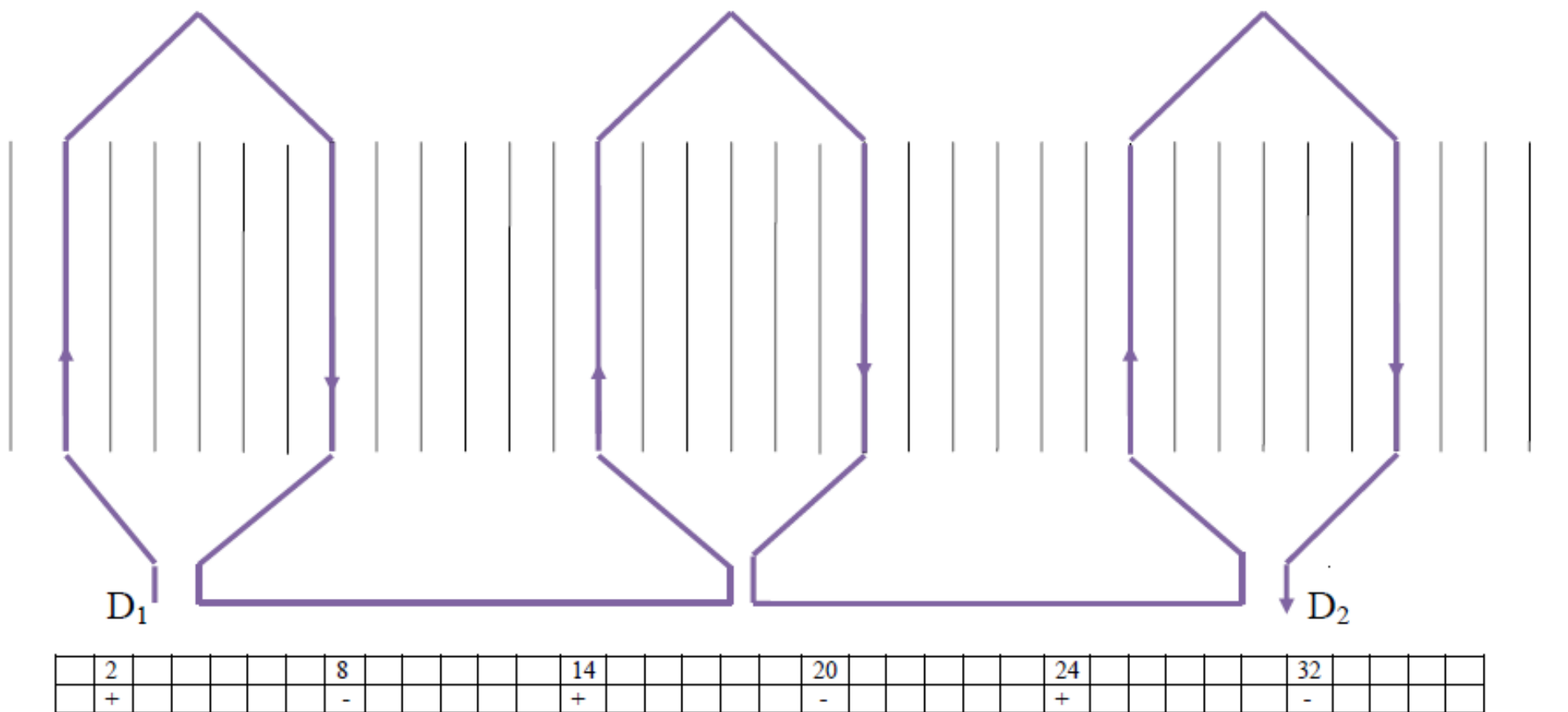


Figure II-14 : Raccordement des bobines de la phase D

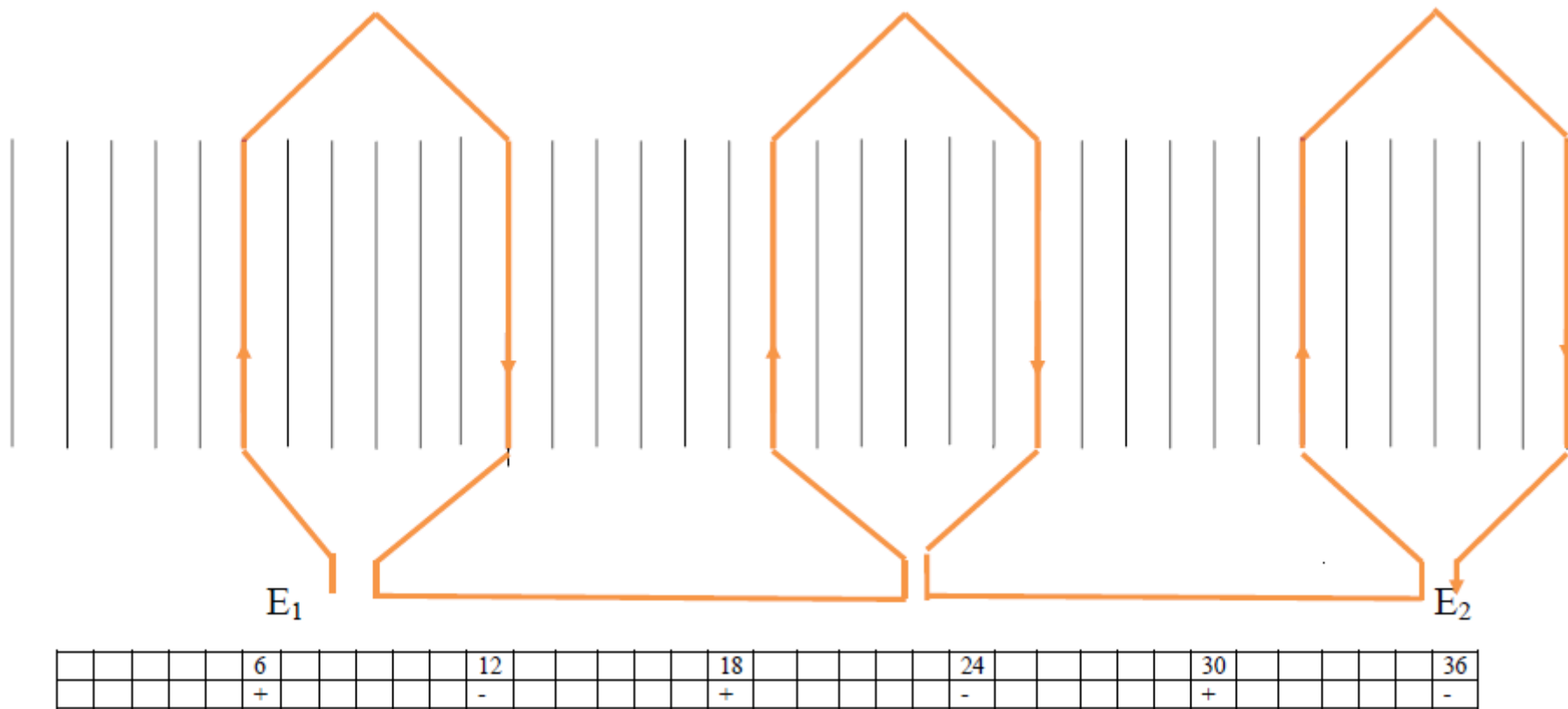


Figure II-15 : Raccordement des bobines de la phase E

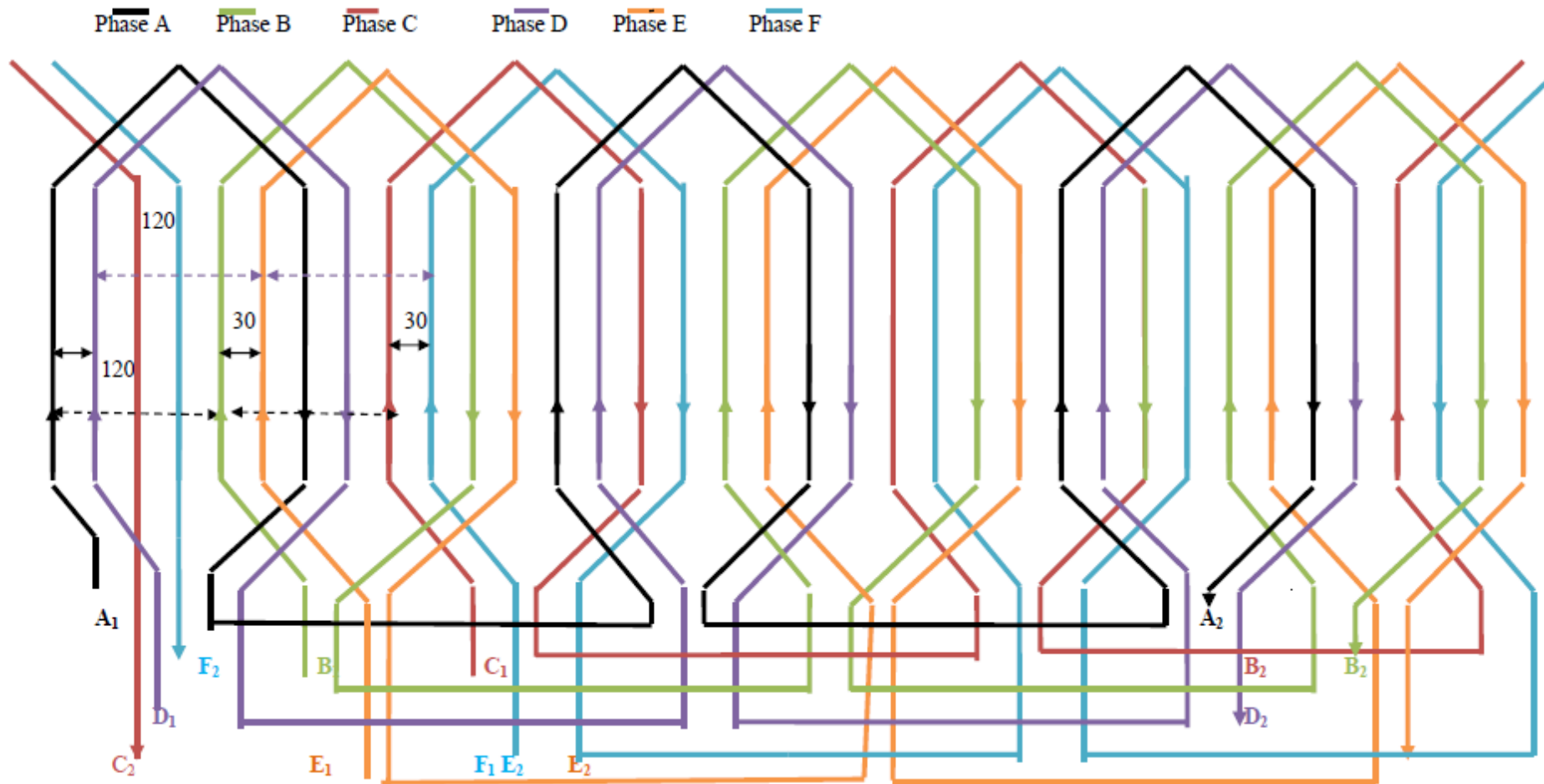


Figure II-17 : Schéma complet de l'enroulement montrant les connexions des phases

L'étoile 1

L'étoile 2

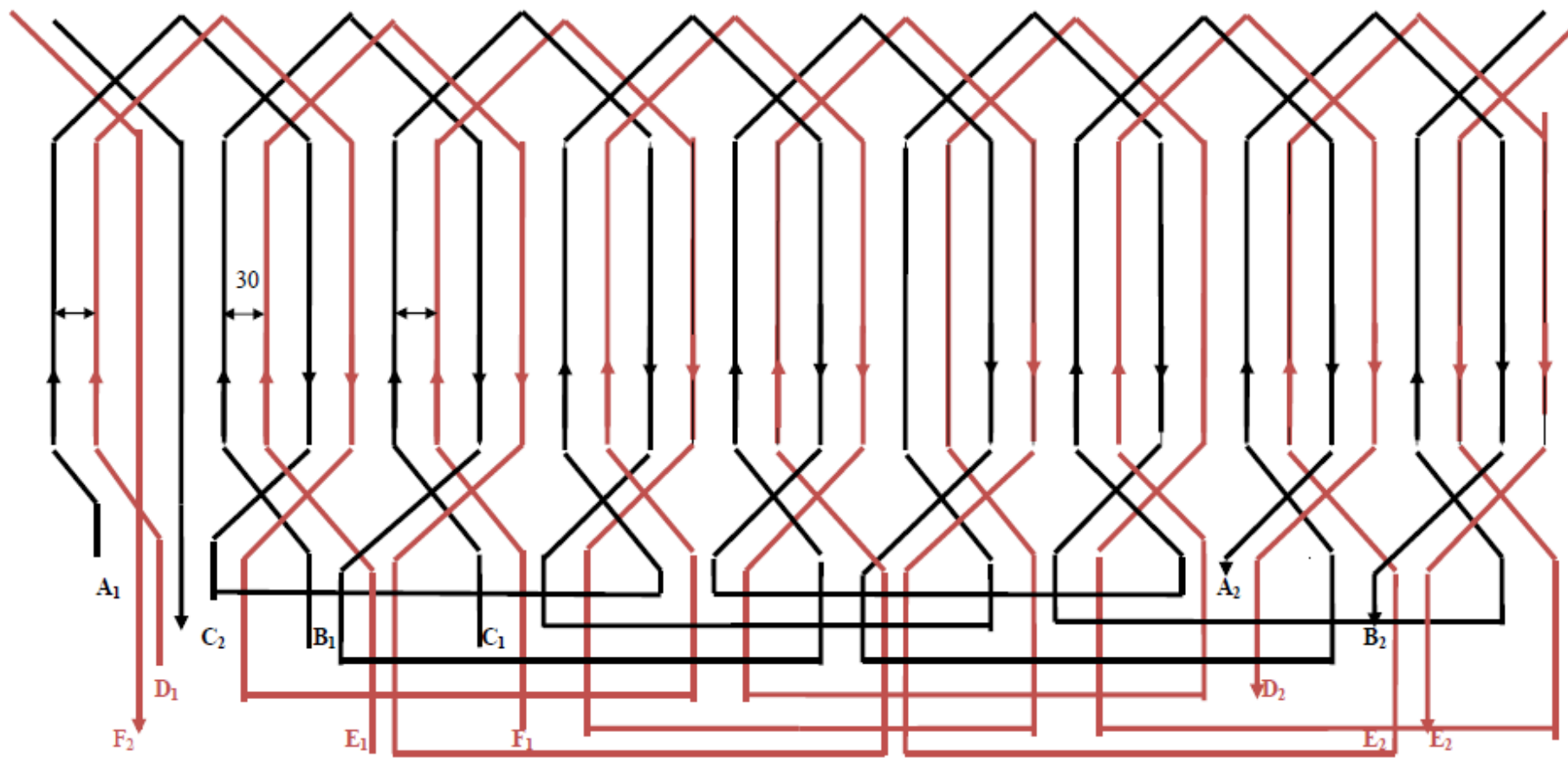


Figure II-18 : Schéma complet de l'enroulement montrant la connexion de l'étoile 1 et l'étoile2

II.14 Conclusion

Dans ce chapitre, on a redimensionné la machine asynchrone à cage simple pour une machine double étoile à tension d'alimentation réduite tout en gardant sa puissance nominale. La réalisation du bobinage et l'indentification paramétriques de cette MASDE est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 03 : La réalisation pratique d'enroulement et identification paramétrique de la MASDE

Réalisation pratique d'enroulement et identification paramétrique de la MASDE

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les différentes étapes pour réaliser le bobinage d'une machine asynchrone double étoile à partir d'une machine triphasée puis identifier les paramètres de la machine réalisée.

III.2 Identification du bobinage

Avant de couper l'extrémité de la bobine, il est nécessaire d'observer le câblage pour aider à identifier les lignes d'entrée et de sortie de l'enroulement, la connexion et le nombre total de bobines par phase, tout cela pour déterminer :

- Le type de bobinage (Imbriquée ou ondulé, simple couche ou double couche) ;
- Pas d'enroulement ;
- Le nombre des spires pour chaque bobine.

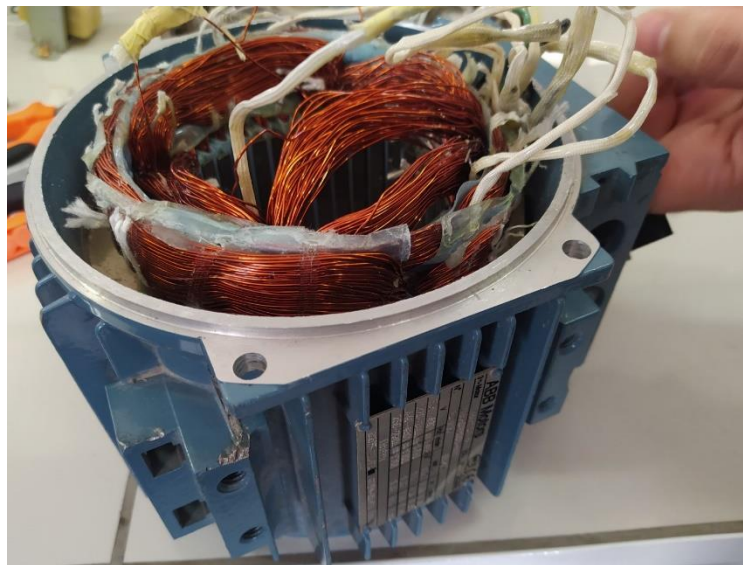


Figure III-1 : Vue de la machine étudiée

III.2.1 Enlèvement du cuivre dans les encoches

On utilise une tige de fer avec un marteau pour couper la partie saillante de la bobine, où on place la tige de fer sur le dessus de bobine et on frappe à l'aide du marteau jusqu'à ce qu'il soit coupé, Ensuite, nous enlevons les morceaux restants avec une pince, il faut veiller à ne pas endommager les encoches.



Figure III-2 : Les étapes pour enlèvement des enroulements

III.2.2 Contrôle et nettoyage du circuit magnétique

Nettoyage et vérification du circuit magnétique, après l'extraction des bobines, il faut donc vérifier leur état et nettoyer toutes les encoches en retirant tous les déchets puis remettre en place les tôles pliées par la tige et le marteau.



Figure III-3 : Le stator après le nettoyage

III.2.3 Mesure des dimensions géométriques de la machine

1. *Le stator :*

- ❖ Diamètre intérieur DS (mm)
- ❖ Longueur du circuit magnétique LS (mm)

2. *Le rotor :*

- ❖ Diamètre extérieur Dr (mm)
- ❖ Longueur du circuit magnétique Lr (mm)

3. *L'encoche :*

- ❖ Largeur inférieure d'encoche $b1$ (mm)
- ❖ Largeur supérieure d'encoche $b2$ (mm)

- ❖ L'ouverture d'encoche bp (mm)
- ❖ La hauteur d'encoche hz (mm)

III.2.4 Comptage du nombre de fils par encoche

Pour compter facilement le nombre de conducteurs par encoche, on mit les dix fils ensemble pour éviter de faire une erreur dans le calcul comme le montre dans la photo suivante :



Figure III-4 : Comptage du nombre des fils

III.2.5 Mesure de diamètre du conducteur

La mesure du diamètre se fera à l'aide d'un micromètre ou d'un calibre dont la précision et au minimum de 1/10 de millimètre.



Figure III-5 : Micromètre (Palmer) pour mesurer le diamètre de cuivre

III.3 Réalisation de la machine asynchrone double étoile

Après avoir fait toutes les études nécessaires pour la transformation de la machine triphasée en une autre double étoile, et après avoir retiré le bobinage de la machine asynchrone triphasée on passe à sa réalisation.

III.3.1 Les matériaux nécessaires à la réalisation

- Fil de cuivre émaillé, diamètre $d = 0.65 \text{ mm}$ (avec vernis) ;
- Papiers isolant thernomide (pour l'isolation des encoches) ;
 - Epaisseur 0.24 mm
- Ficèle de freinage ;
- Gaine de silicone ;

III.3.2 Confection et montage des isolations d'encoche

On doit assurer l'isolation de chaque encoche à l'aide d'un isolant rectangulaire dont la largeur correspond à la dimension de l'encoche et la longueur à la longueur de l'encoche [13].

Ce matériau isolant est bien sûr sélectionné en fonction de ses qualités :

Des diélectriques : Rarement limités par la basse tension.

Mécanique : Car il doit résister au pliage, à l'abrasion, et aux agressions liées à l'empilage des tôles magnétiques, lesquelles peuvent être tranchantes si des bavures subsistent, ou si l'empilage n'est pas parfaitement aligné, ce qui est inévitable.

Sur le plan thermique : Selon la classe d'utilisation de la machine, la durée de vie de l'isolant est très fortement affectée par la température critique atteinte par la classe d'isolation.

Ce papier est utilisé pour isoler entre le stator et les bobines.

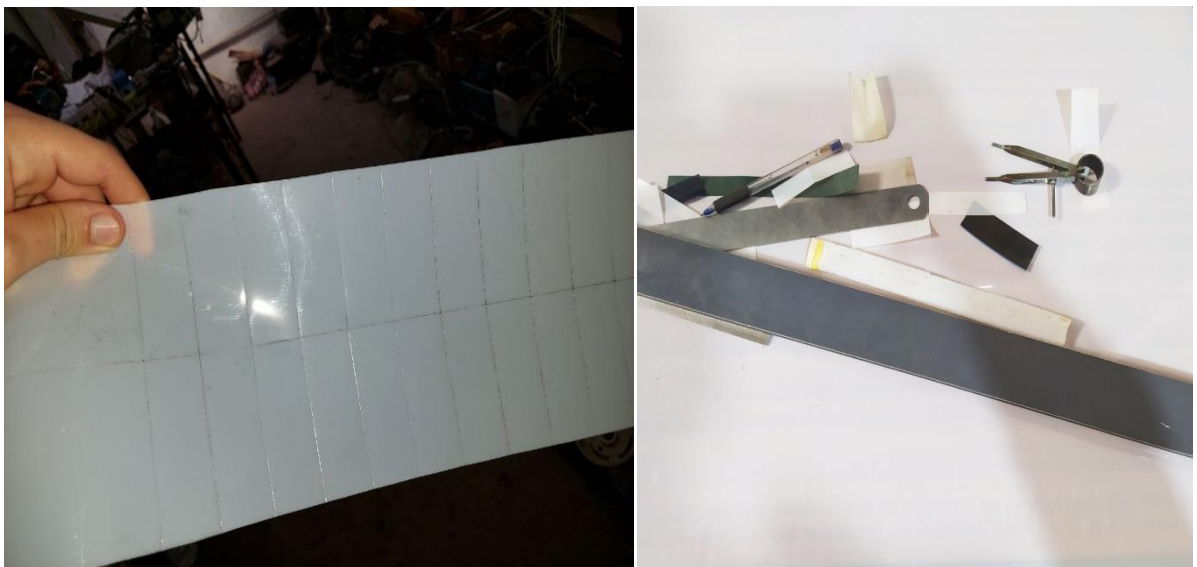


Figure III-6 : Traçage de papier isolant

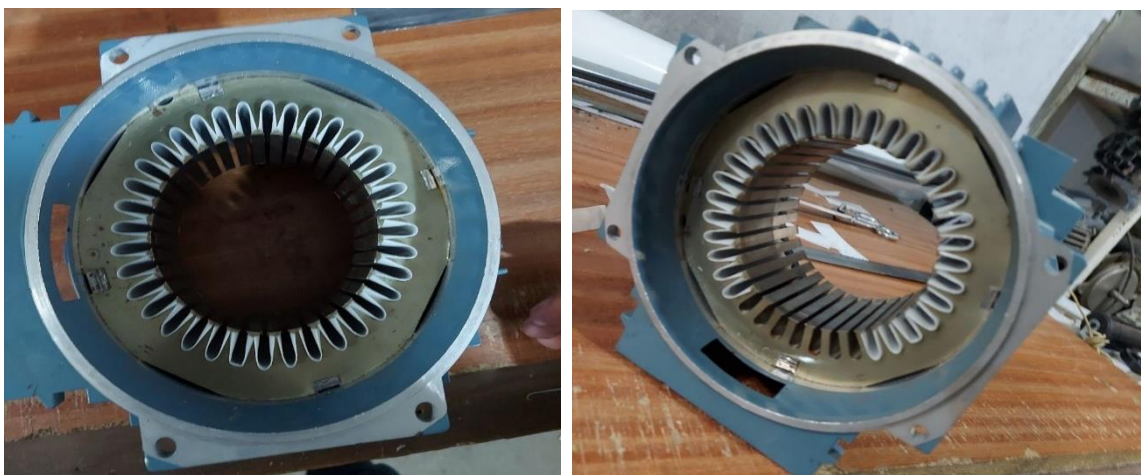


Figure III-7 : Insertion du papier isolant dans les encoches

III.3.3 Création de bobine

On place un fil dans la culasse en respectant le nombre d'encoches vide entre l'entrée et la sortie des bobines. Suivant la sorte de bobinages en série, dans notre exemple il y a 5 encoches vide entre l'entrée et la sortie des bobines il y a aura 3 bobines en série par phase.

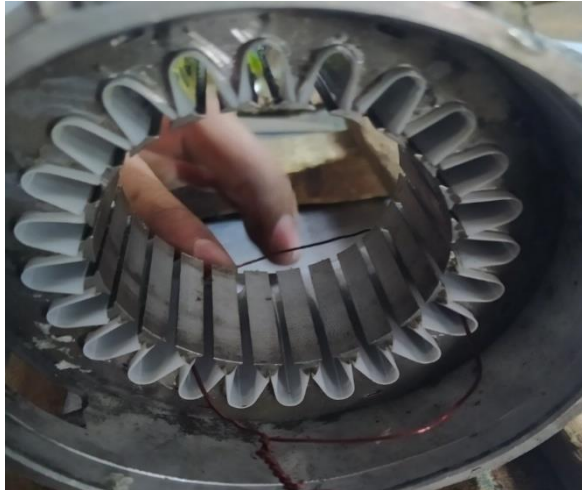


Figure III-8 : Mesure la taille de la bobine

La bobine est enroulée grâce à une machine spéciale. Lors de la fabrication d'une bobine, vous devez respecter les points suivants :

- Nombre de tours par bobine.
- Section de fil ;
- La bobine change en fonction de la position ou du fil de connexion.
- Réserver les longueurs des lignes d'entrée et de sortie.
- Essaye d'aligner les fils autant que possible dans le gabarit pour faciliter l'assemblage ultérieur de la bobine dans l'encoche.
- Fixe les serre-câbles et attache les fils ensemble.



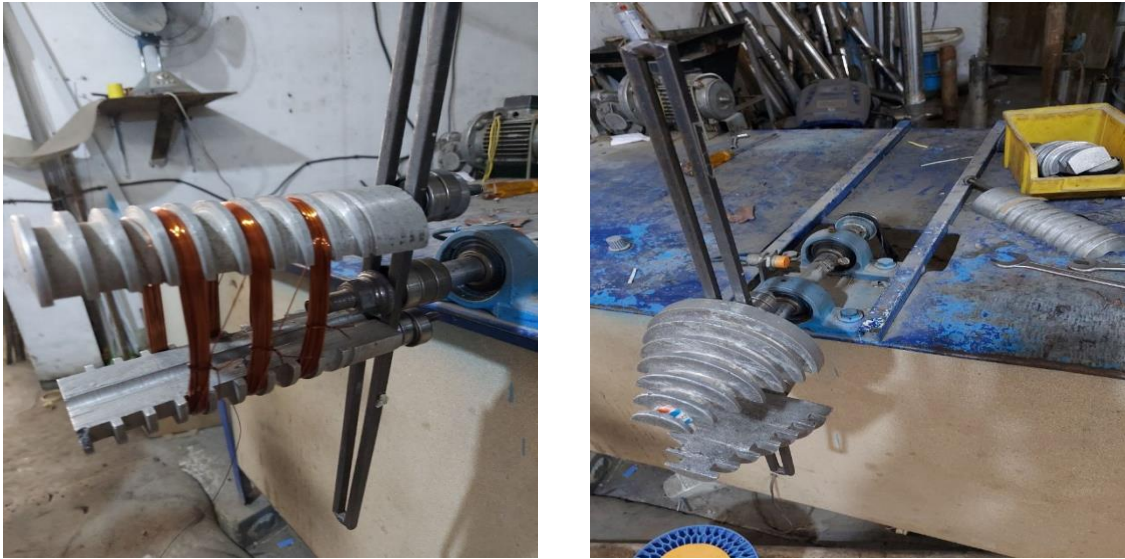


Figure III-9 : Création des bobines pour chaque phase

III.3.4 Montage les bobines pour chaque phase

On commence le montage des bobines pour chaque phase selon le nouvel schéma double étoile en respectant :

- Pas d'enroulement ;
- Classement des phases pour chaque étoile.

III.3.5 Disposition des sections sur le stator de la machine :

Le processus d'insertion consiste à insérer les sections dans les encoches en une seule fois ou plusieurs fois. L'insertion doit se faire avec toutes les précautions nécessaires prises pour éviter tout risque de blessure de l'émail des enroulements lors de l'insertion dans les encoches l'outillages, grâce aux formes soigneusement étudiées, force les bobines à pénétrer progressivement dans les fentes en les ouvrant, tandis que tous les enroulements sont tirés par les têtes de la bobine, du côté correspondant aux liens, lors de cette opération, ces têtes de bobines sont soumises à certaines contraintes, lors de cette opération, ces têtes de bobines sont soumises à certaines contraintes, supportent tout l'effort de traction, de même, les parties droites des bobines glissent en frottant sur le fond d'encoches.

Nous avons utilisé des marqueurs spécifiques (A, B, C, D, E, F...) pour définir les entrées et les sorties de la bobine

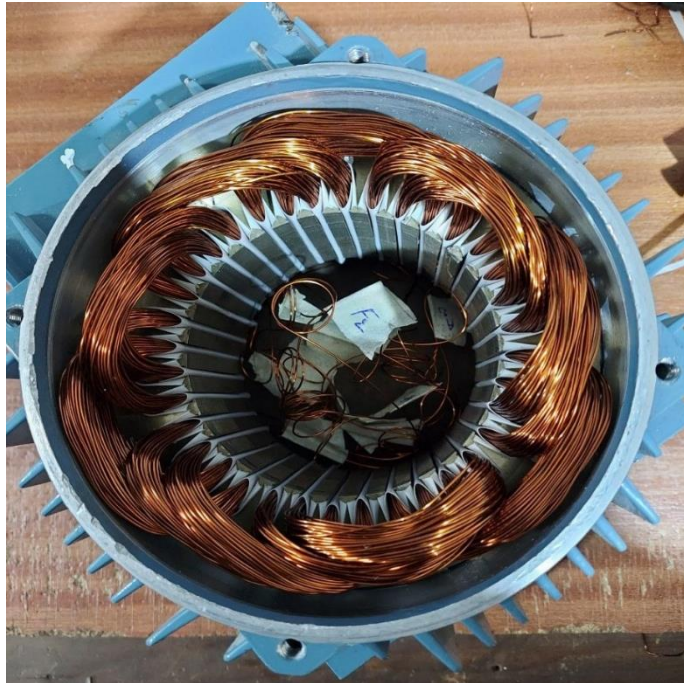


Figure III-10 : Le stator après rebobinage

III.3.6 Isolation entre phase

L'isolation entre phases n'a lieu d'être que dans la région des têtes de bobines, entre bobines, ou entre bobines et connexions de liaison ou d'entrée et sortie, dans façons pour assurer une séparation entre les différentes phases on place des isolations feuilles entre les bobines.



Figure III-11 : Les bobines de stator après l'isolation entre phases

La forme de ces feuilles doit être optimisée pour assurer une séparation complète. Il n'est pas non plus affecté par la forme et le couplage ultérieurs de la tête de rouleau.

III.3.7 Connexion

Le mode de raccordement s'effectue au fer et à l'étain.

- Torsader les fils sur une longueur suffisante suivant la section des fils
- Placer le fer sous le morceau à souder.
- Assurer une fine pellicule d'étain sur la connexion.

III.3.8 Liaison entre bobines

Les bobines de chaque phase sont précisément liées selon le schéma d'enroulement pour former six grandes bobines.

III.3.9 Raccordement bobine et câble de connexion

Pour assurer une bonne liaison électrique, Les entrées et les sorties chaque phase sont connectées et soudées avec un câble de raccordement selon connexion étoile.

III.3.10 Fixations et placement des gaines

Il est nécessaire de placer des gaines dans les connections des fils raccordés (les séries du bobines), avant d'entamer le frettage du bobinage, ensuite on entame le bandage en respectant le sens d'enroulement de la ficelle. Les conducteurs sortant des encoches doivent former un bloc compact et robuste, afin de maintenir les têtes de bobines qui risquent de se déformer sous l'effet de la force centrifuge et les effets électromagnétique qui peuvent se produire à l'intérieur de la machine compact et robuste.

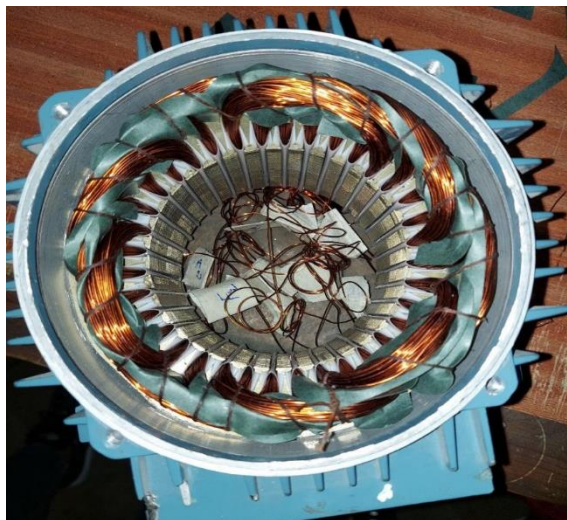


Figure III-12 : La machine après la fixation de bobines

III.3.11 Étape final vernis le bobinage

Après avoir terminé toutes les étapes précédentes liées à réalisation la machine asynchrone double étoile, nous pulvérisons le bobinage du moteur avec vernis pour éviter qu'un court-circuit ne se produise entre les bobines en cas d'erreur dans l'intégrité des fils électrique.



Figure III-13 : Vernis le bobinage

III.3.12 Test de moteur avant utilisation

Avant d'imprégner de nouveaux enroulements, des tests complets doivent être effectués pour obtenir les caractéristiques d'enroulement correctes et une excellente isolation du système.

- Test d'isolement entre phases.
- Test d'isolement entre châssis et phase.
- Test de continuité de bobinage.

III.4 Identification des paramètres du moteur réalisé : [16-20]

Pour faire une étude de comportement, un diagnostic des défauts ou appliquer une commande sur une machine électrique quelconque il est impératif d'identifier ces différents paramètres (telle que les résistances et les inductances statoriques et rotoriques, moment d'inertie, ...). Pour le faire, notre moteur à les caractéristiques suivantes :

$$P_n = 1.1kW, \Omega_n \approx 940tr/min, \text{ montage étoile } Y : I_n = 2.66A$$

Comme toutes les machines à courant alternatif, la MASDE peut être schématisé à l'aide d'un schéma électrique monophasé représenté par les figures ci-dessous :

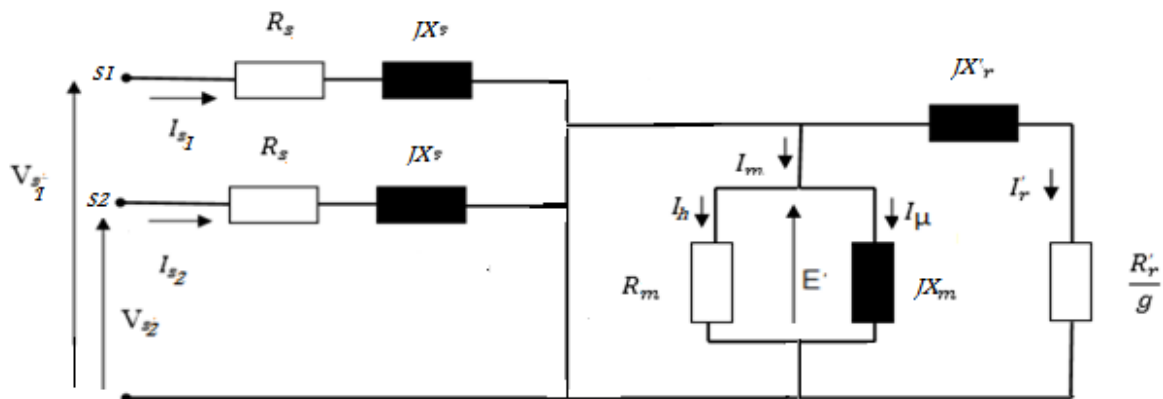


Figure III-14 : Schéma équivalent de la MASDE ramené au stator

Un seul étoile du de MASDE est représenté par le schéma équivalent suivant :

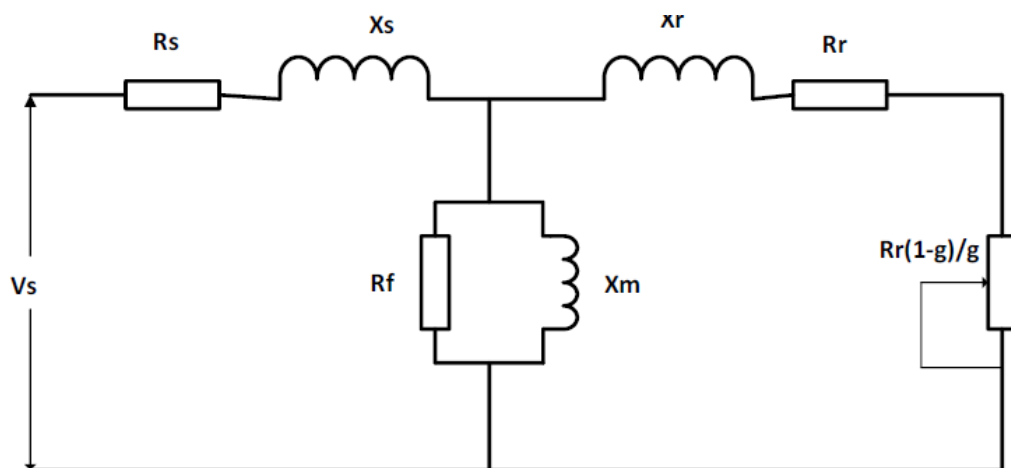


Figure III-15 : Schéma équivalent d'un seul stator

La détermination des paramètres a été sur la base des essais suivants :

- La résistance statorique est mesurée par l'application d'une tension continue stabilisée et le relevé des valeurs des courants.
- R_f et $M = \frac{X_m}{\omega_s}$ sont déterminées par l'essai à vide .
- $L_s = L_r = \frac{X_1}{\omega_s}$ sont déterminées par l'essai à rotor bloqué (essai en court-circuit) .
- J et f_r sont déterminés par l'essai à vide et l'essai de ralentissement.

Nous commençons par la présentation globale du banc expérimental du Labo et nous définissons chaque élément de montage. Notre maquette est composée d'un ordinateur PC équipé par une carte dSPACE DS1104 et une interface d'entrée/sortie. Il est exploité par un logiciel Control-Desk et Matlab/Simulink, deux cartes de commande conçue par nos soins pour assurer l'isolation entre la partie de commande et celle de puissance et adapte les signaux de commande délivrés par l'interface d'entrée/sortie pour attaquer les interrupteurs de deux onduleurs, et un onduleur triphasé SEMIKRON pour alimenter la première étoile et un autre onduleur réalisé par un binôme MCIL05 de promo 2020/2021 avec le moteur asynchrone à cage d'écureuil double étoile réalisé.

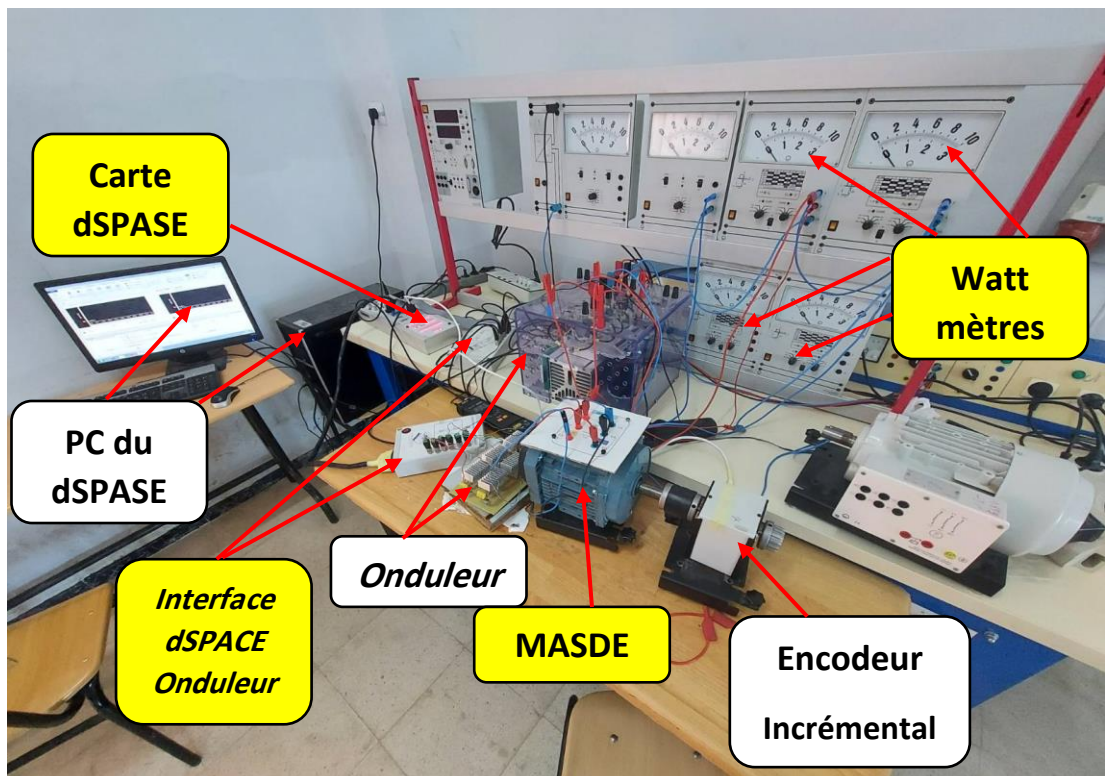


Figure III-16 : Equipement d'essai du laboratoire

III.4.1 Essai volt-ampérométrique (Détermination de R_s)

La mesure de la résistance statorique du moteur est réalisée conformément au montage de la figure ci-dessous. Comme le moteur est branché en étoile la résistance sera déterminée par :

$$R_s = \frac{U}{2 I}$$

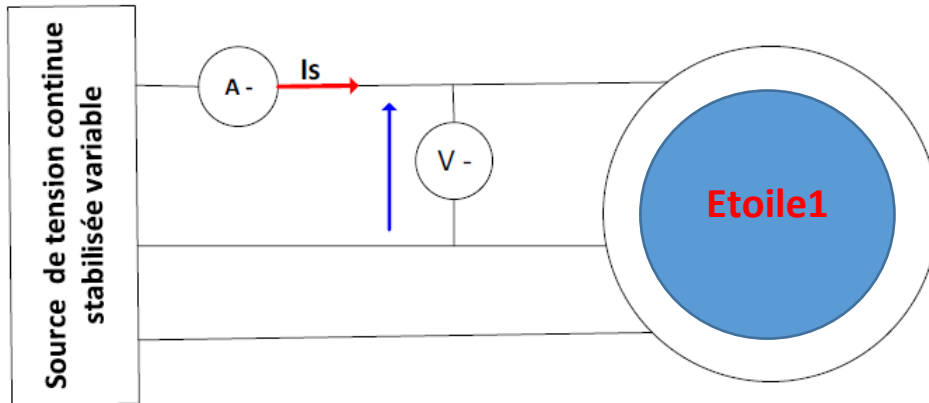


Figure III-17 : Schéma du montage de mesure de la résistance statorique

Il est indispensable de prendre les mesures de cette dernière à chaud pour prendre en considération l'effet de la chaleur sur la valeur de R_s . Par le biais d'un voltmètre branché sur la position continue et un ampèremètre branché sur la position continue, les valeurs prises sont dans le tableau suivant :

Branchement	Udc(V)	Idc(A)	2R(Ω)	
U1---V1	10.1	0.91	11.099	Etoile 01
V1---W1	10.1	0.91	11.099	
U1---W1	10.00	0.90	11.111	
U1---V1	15.1	1.34	11.268	
V1---W1	15.00	1.32	11.363	
U1---W1	15.00	1.33	11.278	
U1'---V1'	10.00	0.89	11.236	Etoile 02
V1'---W1'	10.1	0.89	11.348	
U1'---W1'	10.1	0.91	11.099	
U1'---V1'	15.0	1.33	11.278	
V1'---W1'	15.0	1.32	11.363	
U1'---W1'	15.0	1.32	11.363	
La résistance statorique moyenne R_s			5.6212	

Tableau III-1 : Les mesures de la tension et du courant continu

III.4.2 Essai à vide du moteur asynchrone (détermination de L_s et R_f)

L'essai à vide consiste à faire fonctionner le moteur sans charge et à des tensions différentes. Le glissement est presque nul ce qui donne R/g est l'infinie donc nous aurons à déterminer L_s , L_r et R_f . La puissance active est mesurée par la méthode des deux wattmètres pour chaque étoile qui ont une phase commune de référence avec l'utilisation des tensions sans le neutre car le moteur est considéré comme un système équilibré.

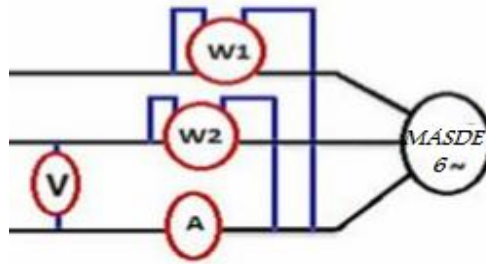


Figure III-18 : Montage de l'essai à vide du moteur

Plusieurs mesures ont été effectuées pour différentes valeurs de la tension avec la mesure de la vitesse angulaire à l'aide de l'encodeur et le dSPACE. Les résultats sont dans le tableau suivant.

U0(V)	I0(A)	P1(W)	P2(W)	P1+P2(W)	
100	0.7	-11	39	28	Etoile 02
130	0.9	-20	65	45	
160	1.2	-30	100	70	
190	1.5	-50	150	100	

Tableau III-2 : Les mesures des essais à vide

L'exploitation des résultats pour déterminer la résistance L_s et R_f

- La puissance réactive est obtenue par $Q_{reac} = \sqrt{(U_0 I_0)^2 - P_0^2}$
- Les pertes joule dans le stator sont : $P_{js} = 3 R_s I_0^2$
- Les pertes mécaniques et fer sont données par $P_{mec} + P_{fer} = P_0 - P_{js}$
- Les pertes mécaniques sont obtenues par la méthode de séparation des pertes. C'est l'ordonné (intersection avec l'axe des pertes) de la tendance de la courbe (Voir la figure ci-dessous).

$$P_{mec} + P_{fer} = f(U_0^2)$$

- La résistance de la branche magnétisante qui représente les pertes fer est donnée par :
- $$R_f = \frac{U_0^2}{P_{fer}}$$
- il est à noter que la valeur R_f est la moyenne du nombre d'essai effectué avec l'écartement de celle s'écartant sur les autres valeurs.

Pjs W	Pm+Pf W	U_0^2 volt ²	Q (Var)	Pmec (W)	Pfer (W)	Rf (Ω)	Ls=Lr Henry
8.263	19.737	10000	117.966	03.00	16.737	597.48	0,269
13.659	31.341	16900	197.590	03.00	28.341	596.31	0,272
24.283	45.717	25600	325.103	03.00	42.717	599.30	0,25
37.943	62.057	36100	483.399	03.00	59.057	611.27	0,237
Les valeurs moyennes obtenues de Rf et Ls et Lr						601.09	0,257

Tableau III-3 : Résultats de calculs de Rf, Ls et Lr

- Le calcul de l'inductance cyclique statorique et rotorique $L_s = L_r$, cette égalité est donnée sur la puissance du moteur qui est de 1.1Kw et la construction de la cage d'écureuil qui est
- $$[14] [15] L_s = L_r = \frac{U_0^2}{Q_{reac} \times 2\pi \times 50}$$
- avec 50 Hz est la fréquence du réseau.

La valeur moyenne de L_s est la moyenne des essais.

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Les pertes mécaniques sont obtenues sur la courbe suivante, elles sont de 03.00 W, Cette courbe est tracée par l'environnement MATLAB :

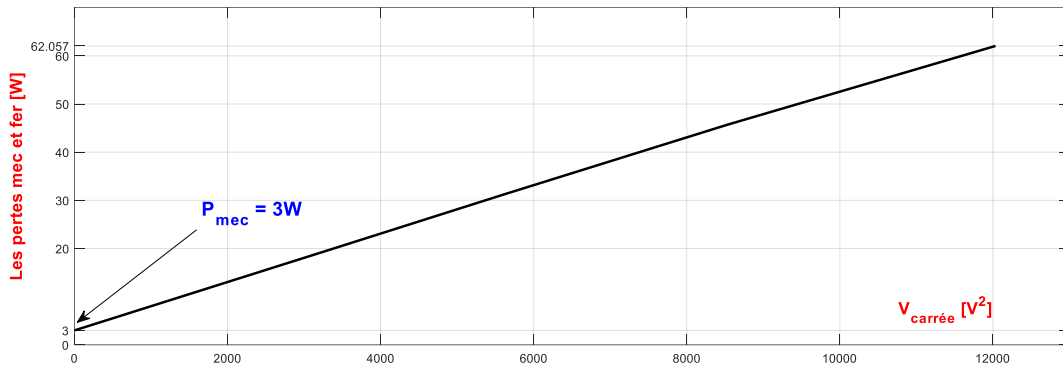


Figure III-19 : Représentation de P_{mec} et P_{fer} en fonction U_0^2

III.4.3 Essai à rotor bloqué du MASDE (Détermination de R_r et M)

Dans cet essai, il a été procédé au blocage du rotor par un frein à poudre et d'alimenter le stator par une tension réduite afin de ne pas dépasser le courant nominal du moteur soit 2.66 A comme indiqué sur la plaque signalétique. En même temps, de faire varier la fréquence d'alimentation par le biais de l'onduleur. Cette façon de faire a été dictée dans l'ouvrage [21]. Les mesures effectuées sont dans le tableau suivant :

Ucc(V)	Icc(A)	P1(W)	P2(W)	P1+P2(W)	Fréquence (Hz)	N°
35	1.1	3	35	38	50	Test1
31.5	1.35	11	40	51	30	
21.5	1.2	12	20	32	15	
62	2	110	10	120	50	Test2
47	2	88	25	113	30	
38	2	70	35	105	15	
76	2.5	170	15	185	50	Test3
58.5	2.5	135	42	177	30	
45.5	2.5	100	50	150	15	

Tableau III-4 : Les mesures de l'essai à rotor bloqué

A partir des mesures, on peut calculer les éléments suivants :

- La résistance rotorique rapportée au stator : $R_r = \frac{P_{scc}}{3 I_{scc}^2} - R_s$ avec R_s déjà déterminée dans l'essai à vide [16].

L'inductance mutuelle cyclique M est obtenue par l'expression :

$$M = \frac{-N_r + \sqrt{N_r^2 + 4L_s^2}}{2}$$
 [16]) où L_s est déterminée à l'essai à vide mais N_r sera obtenue comme suit :

Le calcul N_r en fonction de l'énergie réactive : $N_r = \frac{Q_{scc}}{3\omega_s I_{scc}^2}$ avec $\omega_s = 2f\pi$ [1].

Les résultats des calculs sont dans le tableau suivant :

Fréquence	U _{sc} V	I _{sc} A	P=P1+P2	Qr/cc Var	Nr	M	Rr
50	62	2	120	178.123	0,0472	0.234	4.738
30	47	2	113	117.213	0.0518	0,232	3.795
15	38	2	105	79.391	0,070	0.224	3.128
Valeur moyenne de M et Rr						0.230	3.887

Tableau III-5 : Résultats des calculs de M et de R

III.4.4 Essai de ralentissement du MAS (Détermination de J et f_r)

Dans cette expérience, le moteur est alimenté par la tension nominale indiquée sur sa plaque signalétique à la vitesse nominale. A cette vitesse, on coupe l'alimentation et on relève la vitesse par le biais du *dSPACE* et l'encodeur incrémentale. Par la représentation de cette courbe, on déterminera le moment d'inertie J et le coefficient de frottement f_r avec la constante du temps tirée du graphe comme indiquée sur la figure ci-dessous.

Selon le travail de [16].

- Il faut déterminer la constante de temps mécanique : $\tau = \frac{J}{f_r} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)}$

Après l'acquisition de vitesse, nous avons trouvé les résultats suivants :

$$t_2 = 26s, t_1 = 18s, N_2 = 20rd/s \text{ et } N_1 = 104rd/s.$$

Application numérique : $\tau = 4.8384 s$

- Les pertes mécaniques ont été déterminées dans l'essai à vide. Elles sont de l'ordre de 03 Watt. Comme les $P_{mec} = f_r \Omega^2 \rightarrow f_r = \frac{P_{mec}}{\Omega^2}$

Application numérique : $f_r = 0.0003 Nm \text{ s}/rd$

Le calcul du moment d'inertie est : $J = \tau \cdot f_r = 0.0015 Kg.m^2$

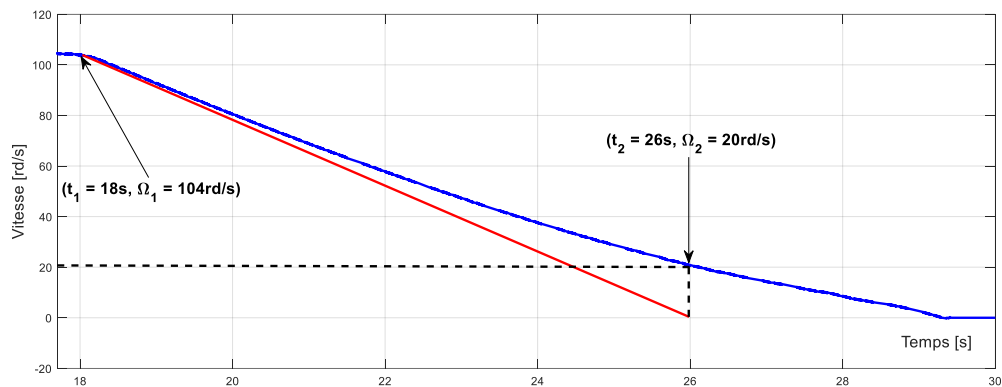


Figure III-20 : L'allure de la vitesse en fonction du temps dans l'essai de ralentissement

III.4.5 Résultats de l'identification des paramètres du moteur asynchrone

Les paramètres identifiés du moteur asynchrone sont résumés dans le tableau suivant :

Désignation	Val eur	Unité
Puissance nominale P_n	1.1	Kw
La vitesse nominale Ω_n	940	tr/min
La tension nominale U_n	110	Volt
Le courant nominale I_n	2.66	Ampères
Nombre de pair de pôle p	3	Un
Résistance statorique R_s	5.621	Ω
Résistance statorique R_r	3.887	Ω
Inductance $L = L_s = L_r$	0,257	Henry
Inductance mutuelle M	0.23	Henry
Moment d'inertie J	0.001	Kg m ²
Coef de frottement f_r	5 0.0003	Nm s/rad

Tableau III-6 : Les paramètres identifiés du MASDE

III.4.6 Validation de l'identification

Pour valider l'identification des paramètres calculés, nous avons utilisé le schéma bloc *Simulink* du moteur asynchrone double étoile comme le montre la figure suivante :

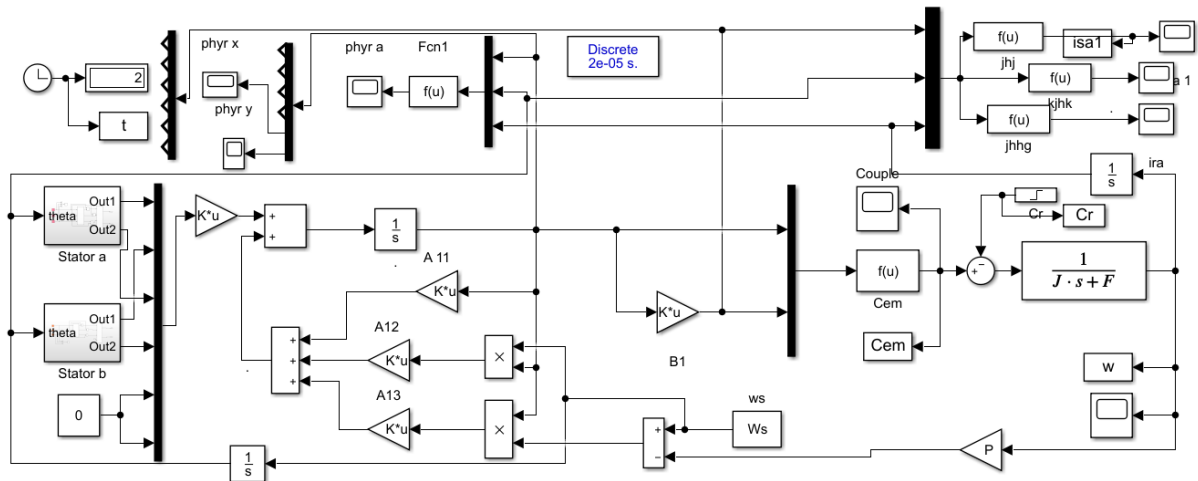


Figure III-21 : Schéma bloc de Simulink du moteur asynchrone double étoile

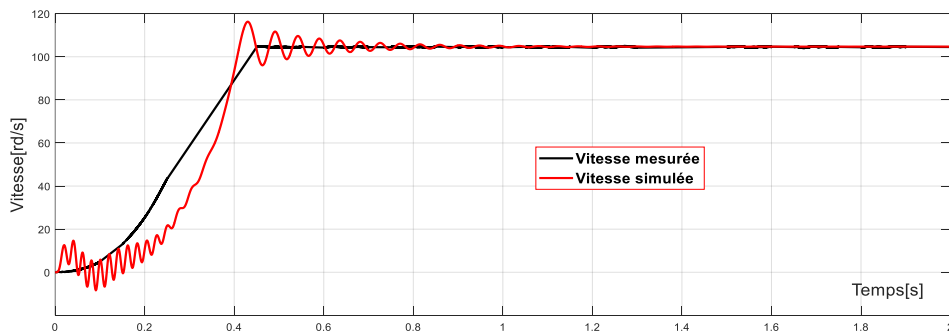


Figure III-22 : Allure des vitesses mesurée et simulée avec les paramètres identifiés

Commentaire : Les deux vitesses évoluent dans le même sens sans écart notable. Ces écarts sont expliqués par l'incertitude des mesures et des hypothèses simplificatrices émises lors de la modélisation du moteur et de l'onduleur. C'est-à-dire des erreurs de modélisations peuvent entraîner de telle erreur.

III.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la réalisation de la machine asynchrone double étoile, afin de pouvoir l'utiliser cette dernière dans la commande, une identification selon les méthodes classiques a été menée au laboratoire pour cerner plus au moins les paramètres du moteur. Ces paramètres ont été validés par un essai de démarrage à vide.

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail, on a transformé une machine triphasée à une machine asynchrone à cage double étoile.

On a choisi un déphasage de 30° degrés entre deux phases homologues des deux étoiles à la base de beaucoup de recherche tout ça pour éviter le maximum des harmoniques. Avec aussi un déphasage de 120° degrés entre les bobines de même stator.

Dans la première étape, on a fait les calculs de nombre de spires et le diamètre de conducteur des bobines à la base de notre machine asynchrone triphasé simple étoile et aussi le nouveau schéma de bobinage tout ça pour que on peut transformer notre machine MAS à une machine MASDE.

Après ça on se trouve dans la partie de réalisation qui est passe par plusieurs étapes. Premièrement enlèvement des bobines et le nettoyage des encoches métallique deuxièmement la partie de réalisation de nouveau schéma de bobinage dernièrement on a fait les essais d'isolation, champ tournant et le test de continuité.

A la fin et dans la dernière étape, nous avons identifié les paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone double étoile par les méthodes classiques. Et nous avons utilisé ces paramètres en simulation pour les valider.

Perspectives

Parmi les suggestions et les perspectives, on peut citer :

- Utilisation des techniques avancées de l'identification paramétrique ;
- Commande vectorielle de la machine réalisée ;
- L'implémentation de la machine dans un système de production d'énergie autonome.

Références bibliographiques

- [1] Doyon, Jean-François, « *Étude et simulation des groupes convertisseurs-machines synchrones à six phases* ». Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure. 2011.
- [2] D. Hadiouche, « *Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile modélisation, alimentation et structure* », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy- I, France, décembre 2001.
- [3] B. SARRAZIN, « *Optimisation d'une chaîne de traction pour véhicule électrique* », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [4] Djaborebbi Amina, « *Étude et commande d'une machine Asynchrone double étoile* », Mémoire Master académique ouargla 26/06/2013.
- [5] MERABET Elkhier « *Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile* », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2008
- [6] HADJOUTI Yassine & HAMBLI Ali, « *Modélisation de la machine asynchrone double étoile en vue du diagnostic du défaut de court-circuit entre spires statoriques* », Mémoire de master, bouira.
- [7] M. KOSTENKO et L. IOTROVSKI, "*Machines Electriques*", Tome2, Technique soviétique, Editions Mir-Moscou 1979.
- [8] Jacques SAINT-MICHEL, « *Bobinage des machines tournantes à courant alternatif* », Techniques de l'ingénieur, 2001.
- [9] D. SATOR-NAMANE, « *Machines à courant alternatif* », Techonosup, ellipses.
- [10] G. SYBILLE et T. WILDI, c *ELECTROTECHNIQUE* » 4ème EDITION, PRESSES UNIVERSITE LAVAL ,2005.
- [11] Z. WU, « *An abstract of dissertation: an investigation of dual stator winding induction machines*», Doctor of philosophy in engineering December 2006.
- [12] R. ABDESSEMED et V. TOMACHEVITCH, « *Les enroulements des machines électriques* », Techno sup, ellipses, 2012.
- [13] Dominique RUCH Guide pratique de rebobinage des moteurs, référence interne B546/1, 2005.

- [14] M. K. e. A. S. e. R. M. R. Andoulsi, « *Commande vectorielle indirecte d'une pompe centrifuge photovoltaïque au fil de soleil*, » Revue des Energies renouvelables CICME'08 Sousse, pp. 163-175, 2008.
- [15] M. D. A. Allah, « *Implantation de la Commande FOC Optimisée d'une Machine asynchrone en vue d'explorer le variateur de fréquence VECTOR 8200 de Lenze* », Mémoire Master, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, 2009.
- [16] B. Kamel, « *Conception de la commande d'une machine asynchrone* », Oran : université des sciences et la technologie d'Oran "Mohamed Boudiaf", 2015.
- [17] S.-H. Kim, *Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors*, Elsevier, 2017.
- [18] R. LAKHDAR, Mémoire, « *Modélisation, identification expérimentale et commande vectorielle d'un moteur asynchrone triphasé à cage* », OUARGLA : UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2015.
- [19] M. Pinard, « *La commande électronique des machines* », France : DUNOD, 2013.
- [20] M. M. e. M. Rafik, « *Identification d'une machine asynchrone à cage* », Mémoire Master : UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2017.
- [21] B. K. Bose, « *Modern Power Electronics and AC Drives* », Prentice Hall, 2002.

Résumé : Les moteurs asynchrones sont utilisés aujourd'hui de manière très large, notamment dans les domaines industriels, en raison de leurs avantages par rapport aux machines continues en termes de simplicité d'installation, de facilité de maintenance et de facilité de démarrage. Dans ce thème , nous présentons l'étude théorique liée à la conception d'un enroulement triphasé et d'un enroulement six phases, après avoir terminé l'étude théorique, nous convertissons une machine asynchrone à cage triphasée en une machine asynchrone à double étoile, et nous sommes intéressé à réaliser cette machine selon la méthodologie de la technologie de bobinage, Des tests ont été effectués à vide et à rotor bloqué pour identifier les paramètres de la machine asynchrone double étoile réalisée.

Mots clés : Machine asynchrone double stator (MASDE), Conception, Enroulement, Identification.

ملخص : تُستخدم المحركات غير المتزامنة على نطاق واسع اليوم ، خاصة في المجالات الصناعية ، نظرًا لمزاياها على الآلات المستمرة من حيث بساطة التركيب وسهولة الصيانة وسهولة الاقلاع. في هذا الموضوع ، نقدم الدراسة النظرية المتعلقة بتصميم ملف ثلاثي الأطوار وملف من ستة أطوار، بعد الانتهاء من الدراسة النظرية ، نقوم بتحويل آلة غير متزامنة على شكل قفص ثلاثي الأطوار إلى آلة غير متزامنة ذات نجمة مزدوجة، تم إجراء اختبارات في انعدام الحمل والدوار المكبح من أجل تحديد عناصر الآلة غير المتزامنة ذات النجم المزدوج.

كلمات مفتاحية : محرك لامتزامن ذو نجم مزدوج، تصميم ، وشيعة، تطابق.

Abstract: Inductions motors are widely used today, especially in industrial fields, due to their advantages over direct current machines in terms of simplicity of installation, simple in maintenance and simple starting. In this theme, we present the theoretical study related to the design of a three-phase windings and six-phase windings, after completing the theoretical study, we convert a three-phase cage asynchronous machine into a double star asynchronous machine, and we are interested in making this machine according to the winding's technology methodology, Tests were carried out with no load and with a locked rotor to determine the parameters of a double star induction machine.

Keywords: Double star induction motor (DSIM), Design, Winding, Identification.