

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière :Electrotechnique.
Option :Energies renouvelables

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:
MASTER

Thème

Etude et analyse spectrale de nouveau type de bobinage d'une machine asynchrone triphasée

Présenté par :
SAYAH IMANE
Soutenu le : 06 Juin 2017

Devant le jury compose de :

Mr. ZOUZOU SALAH EDDINE
Mr. DENDOUGA A.ELHAKIM
Mr. MEGHERBI A.CHAOUKI

Pr
MCA
MCA

Président
Encadreur
Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Energies renouvelables

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Etude et analyse spectrale de nouveau type de bobinage d'une machine asynchrone triphasée

Avis favorable du Président du Jury

Mr.ZOUZOU SALAH EDDINE

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option: **Energie renouvelable**

Thème

Etude et analyse spectrale de nouveau type de bobinage d'une machine asynchrone triphasée

Proposé et dirigé : **Dr. DENDOUGA A.ELHAKIM.**

Signature

RESUMES

Le travail réalisé dans cette thèse concerne l'étude et l'analyse spectrale de nouveau type de bobinage d'une machine AS triphasé. Ce bobinage est très intéressant car il permet d'obtenir une masse de cuivre réduit induisant un gain de place important. Nous rappelons brièvement le fonctionnement d'une machine AS et plus spécifiquement le bobinage de la machine alternative. Nous décrivons ensuite la différente structure de bobinage. Par la suite, Nous cherchons à réduire les harmoniques d'espace de force magnétomotrice (Fmm) créée dans l'entrefer avec une amplitude gonflable.

Les mots clés

L'analyse spectrale, nouveau type, bobinage, machine AS triphasé, masse de cuivre, réduire les harmoniques, force magnétomotrice (Fmm), amplitude gonflable.

ملخص

العمل المنجز في هذه الأطروحة هي دراسة و تحليل الطيفي لنوع جديد من اللفائف لماكينة غير متزامن ثلاثية المراحل هذا النوع من اللفائف يسمح لنا إلى خفض وزن النحاس الذي أدى إلى احتلاله مكانة كبيرة في الصناعة. نشير باختصار إلى دراسة الماكينة غير متزامن و بالخصوص اللفائف للماكينات ذات الإشارات المتناوبة. نعالج مختلف بنيات اللفائف. بعد ذلك نحن نسعى للحد من التوافقيات من مساحة قوة محرك مغناطيسية التي تم إنشاؤها في فجوة الهواء مع ضمان طويلة مناسبة.

Remerciement

En premier lieu, je tiens à remercier Mr : DENDOUGA A.ELHAKIM, mon directeur de mémoire et je lui exprime toute ma reconnaissance pour sa confiance en mon travail et les nombreux conseils qu'il m'a prodigués.

J'adresse mes sincères remerciements à professeur MIMOUNE MOUHAMED SOURI. Mes remerciements vont également à tous mes collègues du département d'électrotechnique.

Nos remerciements vont aux membres de jury Pr. ZOUZOU SALAH EDDINE et Dr MEGHERBI A.CHAOUKI qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Je remercie également toute personne qui a contribué de prêt ou de loi à l'accomplissement de ce travail particulièrement :

MES PARENTS, SIHAM MOUSSI, ILYAS TELIDJA

Dédicace

*Je dédie ce modeste mémoire de fin d'étude à :
Mes très cher parent pour leur sacrifice et qui non
jamais cesse de m'encouragement que dieu me garde,*

Me très chère sœur : HADIL.

Et mes très chers frères : CHEAIB, MOUHAMED

SIRADJ, IYAD.

A ma famille : OMAR, WAFI, ZAZA.

Tous mes amies : Sabrina, Amal, Sara, Wafa.

A tous mes collègues du département d'électrotechnique

Tous ceux qui me sont chers

A tous ceux qui connaissance SAYAH IMANE.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I :Généralité sur les machines asynchrones et leur bobinage	
I.1 Introduction.....	5
I.2 Présentation de la machine asynchrone.....	5
I .2.1 Historique	5
I.2.2 Symbole.....	5
I.2.3 Constitution de la machine asynchrone	6
I.2.3.1 Le stator.....	7
I.2.3.2 Le rotor.....	7
I .2.3.3 Rotor à bagues (bobiné)	8
I .2.3.4 Entrefer.....	8
I.2.4 Principe de fonctionnement.....	8
1.2.5 Schéma électrique équivalent	10
I.2.6 Bilan de puissance	12
I.3 Couplage de la plaque à bornes	12
I.4 Branchement du moteur sur le réseau triphasé	13
I.5 Les avantage et les inconvénients du moteur asynchrone	13
I.6 Le bobinage et les enroulements triphasés des machines tournantes à courant alternatif	14
I.6.1 Force magnétomotrice (Fmm) d'un stator triphasé bipolaire.....	14
I.6.2 La répartition des bobines	15
I.6.2.1. Le raccourcissement des bobines.....	17
I.7 Fmm triphasée résultante, champ tournant bipolaire	19
I.8 Conclusion	21
Chapitre II:Différentes types de bobinage	
II.1 Introduction	23
II.2 Rappel sur les paramètres des enroulements des machines à courant alternatif	23
II.3 Représentation des enroulements à courant alternatif	24
II. 3.1 Bobines concentriques reliées en série	24
II. 3.2 Bobines identiques reliées en série.....	24
II.4 Schémas de bobinage.....	25
II.5 Aperçu sur les enroulements des machines électriques	27
II.6 Schéma de bobinage linéaire	35

II.6.1 Exemple de calcul des paramètres d'enroulement triphasé	35
II.6.2 Calcul des paramètres d'enroulement	36
II.7 conclusion.....	37
Chapitre III:Etude comparative entre les différents types de bobinage (par F.m.m)	
III.1 Introduction	39
III.2 Force magnétomotrice des enroulements à courant alternatif.....	39
III.3 Bobine concentrique à pas diamétral.....	40
III.3.1 Interprétation des résultats	40
III.3.2 Interprétation des résultats	40
III.4 Enroulement triphasé à une couche avec pas diamétral	43
III.4.1 Interprétation des résultats	40
III.4.2 Interprétation des résultats	40
III.5 Enroulement triphasé à deux couches avec un pas raccourci	49
III.5.1 Interprétation des résultats	50
III.6 Analyse spectrale de nouveau type d'enroulements du moteur asynchrone à cage.....	53
III.7 Description du moteur à induction utilisé.....	54
III.8 Calcul des paramètres d'enroulements.....	54
III.9 Enroulement à une couche	55
III.9.1 Les résultats	58
III.9.2 Interprétation des résultats	59
III.10 Enroulement à deux couche.....	58
III.10.2 Les résultats	58
III.10.1.2 Interprétation des résultats.....	59
III.10 Enroulement à une_ deux couches.....	60
III.10.1 Les résultats	60
III.10.2 Interprétation des résultats	40
III.11 La comparaison entre les trois types d'enroulement.....	62
III.9.3.1 Les résultats	63
III.12 Conclusion.....	62
Annexe A.	71
Bibliographie	76

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les machines asynchrones et leur bobinage.

Fig.I.1 Symbole générale d'une machine asynchrone triphasé a) moteur b) générateur.....	6
Fig.I.2 Les éléments constitutive de la machine asynchrone.	6
Fig.I.3 Le stator bobiné avec des enroulement à une couche.....	7
Fig.I.4 Rotor à cage d'écureuil.	8
Fig.I.5 Rotor à bagues (bobiné).	8
Fig.I.6 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.	9
Fig.I.7 Caractéristique couple- glissement du moteur.	10
Fig.I.8 Schéma électrique équivalent simplifié de la machine.	11
Fig.I.9 Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique.....	11
Fig.I.10 Bilan de puissance de la machine asynchrone.....	12
Fig.I.11 La plaque à borne.....	12
Fig.I.12 couplage des moteurs.....	13
Fig.I.13 a) Fmm d'une phase en fonction de l'angle (θ) b) Bobine diamétrale	15
Fig.I.14 Fmm d'une phase en fonction de l'angle (θ).....	16
Fig.I.15 Fmm d'une Bobine s avec un pas raccourci en fonction de l'angle (θ).....	17
Fig.I.16 Fmm résultante d'enroulement à une couche $q=3, p=1$ et son spectre d'harmonique.....	20

Chapitre II: Différentes types de bobinage.

Fig.II.1 Bobines concentriques.	24
Fig.II.2 Bobines identiques.	24
Fig.II.3 Schémas de bobinages.	26
Fig.II.2 Les enroulements des machines électriques.	27
Fig.II.4 Les types d'enroulements à une couche.	28
Fig.II.5 Etoile des phases.	29
Fig.II.6 Enroulements triphasés à une couche par pole conséquent..... $Z=12 ; 2p=2 ; q=2 ; \tau p=6$	29
Fig.II.7 Enroulements triphasés à deux couches.	30
Fig.II.8 Enroulements triphasés à deux couches $Z=18 ; 2p=2 ; q=3 ; y=8$	30

Fig.II.9 Enroulements triphasés à une_ deux couches.....	31
Fig.II.10 Enroulement à deux couches.....	32
Fig.II.10.1 Groupe de bobines à une deux couches.....	32
Fig.II.11 Placement de la première phase.....	32
Fig.II.12 Placement de la seconde phase.....	33
Fig.II.13 Enroulement triphasé à une- deux couches place en trois étapes.....	33
Fig.II.14 Enroulements triphasés à plusieurs vitesses.....	33
Fig.II.15 Enroulements ondulés triphasés.....	34
Fig.II.16 Enroulement à $q=2, \tau = 6, p=2$	35
Fig.II.17 Les dimensionnements des encoches du stator et rotor.....	35
Chapitre III :Etude comparative entre de différentes types de bobinage (par F.m.m).	
Fig.III.1 Champ magnétique crée par une seule bobine.....	39
Fig.III.2 Fmm et le spectre d'harmonique pour une machine à ($p = 1$). $N_a= 10$ spires THD= (47.3050%).....	41
Fig.III.3 Fmm et le spectre d'harmonique pour une machine à ($p = 2$), $N_a= 10$ spires THD= (46.1572%).....	43
Fig.III.4 Fmm et le spectre d'harmonique pour une machine à ($p = 1$), $Z=18, q=3, N_a= 30$ spires.....	45
Fig.III.5 Courants triphasés.....	46
Fig.III.6 L'onde Fmm résultante d'enroulement à une couche $q=3, p=1, \tau_p = 9,$ THD=10.7058%.....	48
Fig.III.7 L'onde Fmm résultante d'enroulement à deux couches avec un pas de raccourcissement, $q=3, p=1, \tau_p=9, y=8, THD = 9.4948\%$	51
Fig.III.8 Enroulement à une couche $Z=36, q=3, m=3, p=4, \tau_p = 9, THD=9.8106\%$	57
Fig.III.9 Enroulement avec deux couches $Z=36, q=3, m=3, p=4, \tau_p = 9, y=7, THD=8.3769\%$	59
Fig.III.10 Enroulement une_ deux couches $Z=36, q=3, m=3, p=4, \tau_p = 9, y=8,$ THD=8.64079%.....	61

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité sur les machines asynchrones et leur bobinage.

Tableau.I.1 Evolution du coefficient de la série de Fourier pour les harmoniques d'espace 1, 5, 7, 11 et 13 en fonction du nombre m d'encoches par pôle et par phase. 17

Tableau.I.2 Evolution du coefficient de la série de Fourier pour les harmoniques d'espace 1, 5,7, 11 et 13 en fonction du nombre q d'encoches par pôle et par phase et du pas relatif β 19

Chapitre II : Différentes types de bobinage.

Tab.III.1 Données nominales orientées du prototype du moteur à induction.....35

Chapitre III :Etude comparative entre de différentes types de bobinage (par F.m.m).

Tableau.III.1Données nominales orientées du prototype du moteur à induction.....54

Tableau.III.2 La comparaison entre les différents types d'enroulements.....62

Introduction générale

L'existence des harmoniques d'espace dans l'entrefer nuit considérablement au travail efficace des machines électriques alternatives. L'étude et la connaissance du bobinage de ces machines ont permis, dès le début du XX^{ème} siècle, de rendre le plus sinusoïdal possible les ondes présentes dans l'entrefer grâce, notamment, à la réduction du pas d'enroulement ou encore à la distribution des bobines d'une même phase. Le bobinage des machines alternatives n'a guère évolué depuis de nombreuses décennies.

On a vu apparaître des machines asynchrones dont le bobinage est inhabituel. En effet, certaines machines à cages d'écureuil présentent la particularité de posséder un bobinage dit « une_deux couche » : des bobines hybrides sont enroulées autour de chaque encoche statorique, l'un occupe toute l'encoche et l'autre n'est occupé qu'une demi d'encoche. Dans l'industrie électrotechnique, l'un des problèmes principaux pour la fabrication des machines électriques reste le taux élevé de travail manuel, surtout la mise en encoches des enroulements. La mise en encoches automatique des enroulements à une couche, dans le domaine des puissances allant jusqu'à 10 kW, a été résolue depuis quelques décennies grâce à la proposition de différents systèmes automatisés permettant soit le bobinage de l'enroulement directement dans les encoches statoriques, soit par attraction électromagnétique des bobines, préalablement conçues dans les encoches. Cependant, celle des enroulements à deux couches reste toujours posée. Le problème repose sur deux difficultés essentielles :

- Un nombre d'étapes important pour le placement de tous les groupes formant l'enroulement, théoriquement il est de $6p$, contrairement à l'enroulement à une couche où celui-ci est de 3.
- La nécessité de placer $6p(\tau-y)$ isolants entre les faisceaux d'une même encoche appartenant à différentes phases.

Ce type de bobinage possède des avantages tels que la facilité de mise en œuvre. L'enroulement obtenu est symétrique et le nombre maximum de branches parallèles qu'on peut réaliser est de $a_{\max}=p$.

C'est dans ce cadre de bobinage que s'insère notre étude, on fait une comparaison entre les enroulements habituelle avec l'enroulement une_deux couches. L'étude de ces enroulements montre qu'un bobinage réparti avec ou sans raccourcissement de pas permet d'obtenir des ondes Fmm proche de sinusoïdales dans l'entrefer à cause des harmoniques quel que soit leurs amplitudes, donc il faut chercher la réduction d'harmoniques de l'espace par contre l'amplitude de Fmm fondamentale qu'elle faut avoir une amplitude gonflable pour

assurer les performances électriques et mécaniques des machines et tous les systèmes électriques.

Dans ce contexte, on se propose, dans ce travail de mémoire une étude de comparaison entre différents types de bobinage d'un moteur asynchrone à cage en se basant sur l'analyse spectrale de la Fmm produite par chaque type. Pour ce faire, le travail est réparti en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à la présentation d'une généralité sur la machine asynchrone triphasée. Le second chapitre traite les différents types d'enroulements. Le dernier chapitre représente l'analyse spectrale de nouveau type de bobinage. Le travail est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I :

**Généralité sur les machines asynchrones et
leur bobinage**

I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, le fonctionnement d'un moteur asynchrone est rappelé : son principe, sa constitution et son intérêt. Afin de bien comprendre la création du champ tournant (Force magnétomotrice) des différents enroulements, la distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer est déformée à cause des harmoniques, son formule calculer par le coefficient de bobinage, et le courant qui parcourt l'enroulement. La décomposition de Fourier de l'onde (Fmm) est permet l'ordre de tous harmoniques d'espace.

I.2 Présentation de la machine asynchrone

I.2.1 Historique

Historiquement le dix-neuvième siècle fût l'époque des grandes découvertes en Electrotechnique dont les bases fondamentales ont été établies (1820-1830) par des hommes de science parmi lesquels on peut citer, OERSTED, AMPERE, BIOT, SAVART, LA PLACE, OHM, FARADAY. Plus tard en (1873) MAXWELL formalisa les lois de l'électromagnétisme moderne dans son ouvrage fameux ;"Treatise on Eelectricity and Magnétisme". Mais ce n'est qu'à partir de (1870) que l'électrotechnique industrielle s'affirma notamment grâce à la production d'énergie électrique par les génératrices à courant continu (dynamos) de gramme et de siemens. Ensuite, dans les années (1880), furent conçus les alternateurs et les transformateurs polyphasés. Les premiers devaient concurrencer et détrôner les dynamos pour la production de l'électricité, enfin les travaux du yougoslave TESLA et de l'italien FERRARIS complétèrent les systèmes a courants alternatifs polyphasés par la conception et la construction des machines d'induction ou asynchrones en (1888) [2].

En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891 [3].

I.2.2Symbole

La machine asynchrone peut être représentée par son symbole normalisé générale qui précise si elle fonctionne en moteur à cage d'écureuil ou à rotor bobiné (Figure. I.1.a) ou en générateur (Figure. I.2.b).Le symbole peut être apporté des précisions sur la nature de la machine [2].

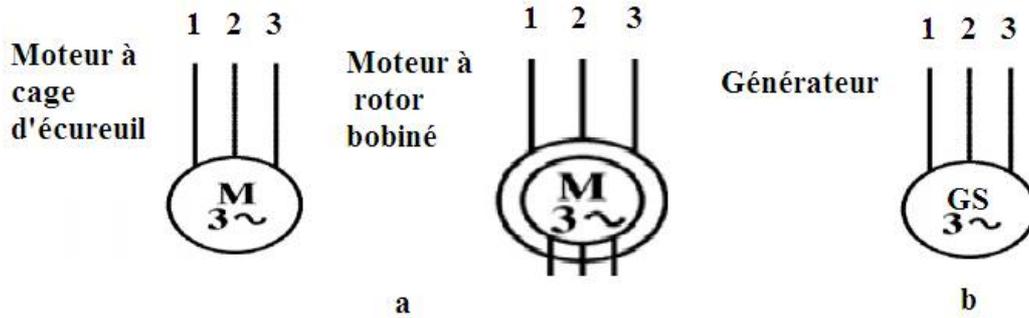
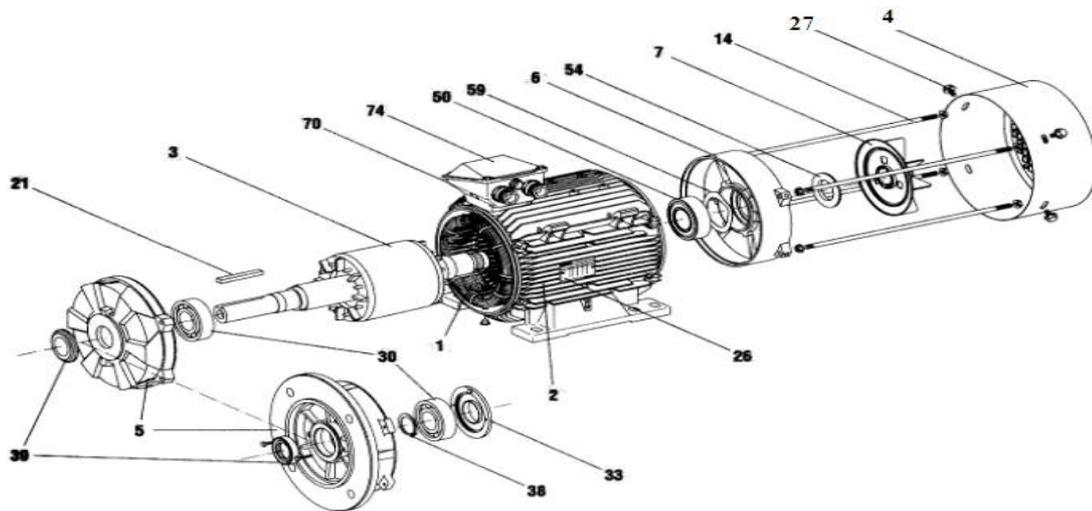


Fig.I.1 Symbole générale d'une machine asynchrone triphasé

a) moteur b) générateur [3].

I.2.3 Constitution de la machine asynchrone

Les machines asynchrones sont formées de plusieurs éléments dont les deux principaux sont le stator et le rotor séparés par un entrefer d'épaisseur constante très mince (Fig.I.2). Le stator correspond généralement à la partie fixe du moteur alors que le rotor est celle qui est en rotation [1].



1 : Stator bobiné	2 : Carter	3:Rotor	5:Flasque côté accouplement	6:Flasque arrière
7: Ventilateur	13: Capot de ventilation	14: Tiges de montage	21: Clavette	26: Plaque signalétique
27: Vis de fixation du capot	30: Roulement côté accouplement	33: Chapeau intérieur côté accouplement	38: Ci clips de roulement côté accouplement	39: Joint côté accouplement
50: Roulement arrière	54: Joint arrière	59: Rondelle de pré charge	70: Corps de boîte à bornes	74: Couvercle de boîte à bornes

Fig.I.2 Les éléments constitutive de la machine asynchrone.

I.2.3.1 Le stator

Il s'agit de la partie du moteur formé par le circuit magnétique et le bobinage qui est alimenté par la source électrique. Le circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches. Elles permettent le passage des conducteurs qui constituent l'enroulement statorique polyphasé à p paires de pôles. Dans la suite du mémoire, le bobinage statorique est triphasé dans la (Figure.I.3) [1].

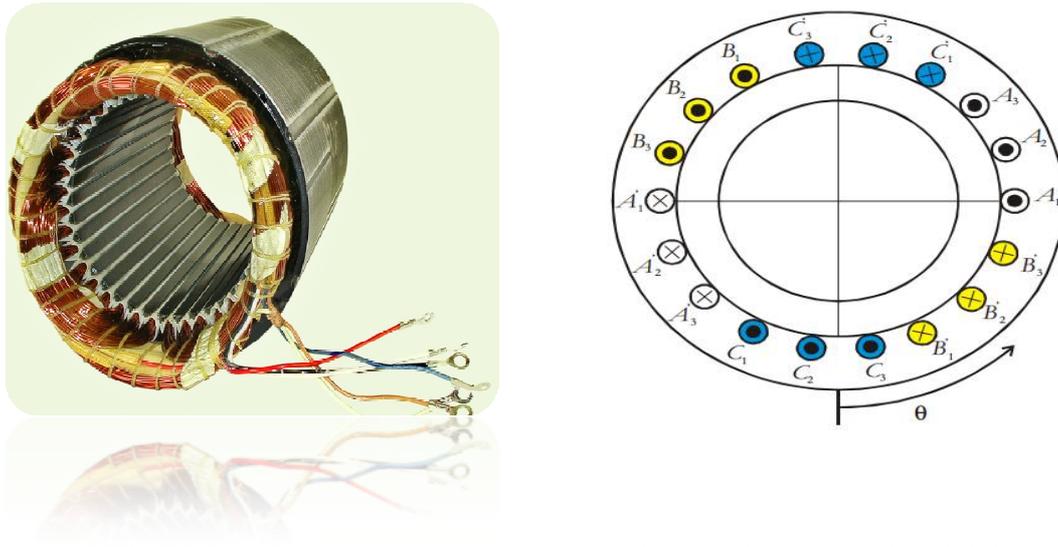


Fig.I.3 Le stator bobiné avec des enroulement à une couche [3][4][5].

I.2.3.2 Le rotor

Il comporte également un empilage de disques de tôles dans lesquelles sont toujours découpées des encoches. Sauf cas particuliers, l'enroulement rotorique est en court-circuit. Il existe deux familles de rotor : les rotors bobinés et les rotors à cage. Le rotor à cage est simplement constitué de barres en cuivre ou en aluminium logées dans des encoches rotoriques. Ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités par un anneau de court-circuit (Fig.I.4). Le bobinage du rotor forme une cage d'écureuil, d'où le nom de moteur à cage [1].



Fig.I.4 Rotor à cage d'écureuil [3][2].

I .2.3.3 Rotor à bagues (bobiné)

Ce rotor à pôle lisse (Fig.I.5) comporte dans ces rainures un enroulement identique à celui du stator, les trois phases sont branchées en étoile ce qui permet d'insérer un rhéostat dans leur circuit, ce rhéostat qui est mise en marche normale et permet d'assurer des meilleures conditions de démarrage. Signalons que, si le nombre des pôles du rotor est obligatoirement le même que celui de stator, le nombre de phases peut être différent. Cependant, il n'est pas intéressant pour un moteur à bague d'augmenter le nombre des phases du rotor car il faudrait augmenter le nombre des bagues et des balais [3].

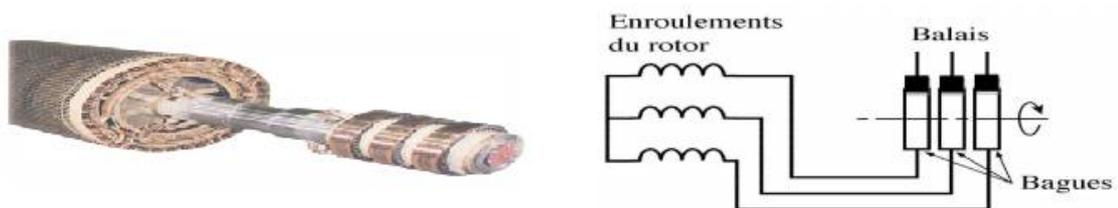


Fig.I.5 Rotor à bagues (bobiné) [2][3].

I .2.3.4 Entrefer

L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor [2].

I.2.4 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des moteurs asynchrones est basé sur la production d'un champ tournant qui produit par trois bobinages fixes géométriquement décalés de 120° , et parcourus par des courants statoriques alternatifs présentant le même décalage électrique,

les trois champs alternatifs qu'ils produisent se composent pour former un champ tournant d'amplitude constante comme il est présenté dans (figure I.6).

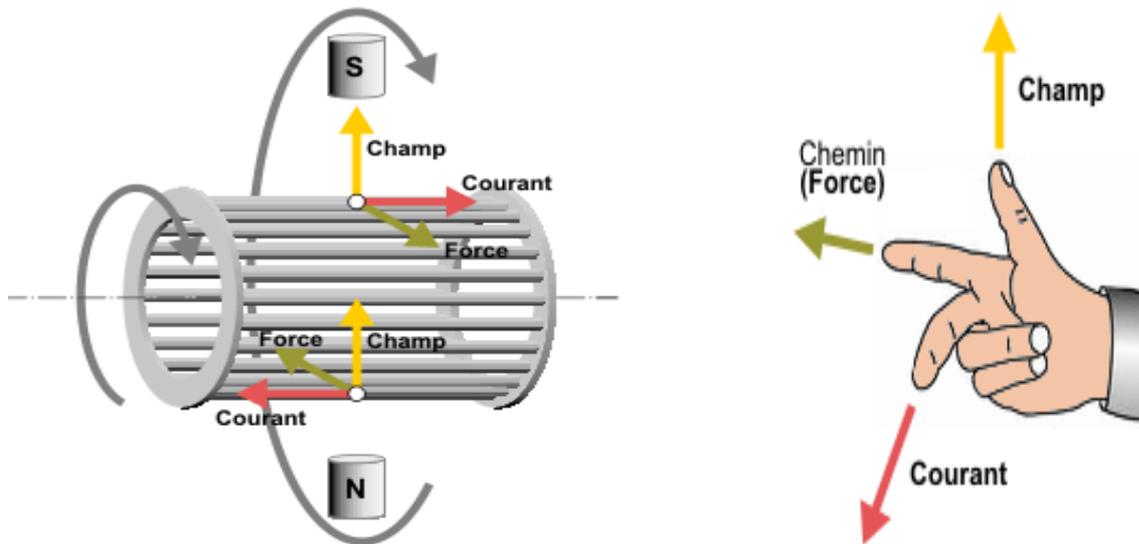


Fig.I.6 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [3].

Les courants statoriques de pulsation ωs créent un flux tournant à la vitesse dite de synchronisme $\Omega s = \frac{\omega s}{p}$ où p est le nombre de paires de pôles du moteur. Ce flux traverse le bobinage rotorique et y induit des forces électromotrices (Fem). Ces Fem produisent des courants car le bobinage du rotor est en court-circuit. L'action du flux tournant sur les courants qu'il a lui-même induits crée le couple. Ce moteur est souvent appelé machine d'induction. Si le rotor tourne à la vitesse de synchronisme Ωs , soit aussi rapidement que le flux tournant, le flux à travers chaque bobine rotorique est constant. Les Fem induites n'existent plus au rotor donc plus de courant ni de couple. Il faut donc que Ωr vitesse de rotation du rotor différent de Ωs vitesse de synchronisme pour qu'il y ait un couple d'où le nom de machine asynchrone. Le fonctionnement du moteur est caractérisé par l'écart relatif entre ces deux vitesses : il s'agit du glissement g défini par :

$$g = \frac{\Omega s - \Omega r}{\Omega s} \quad (\text{I-1})$$

On montre que la pulsation des courants rotoriques est $g\omega s$. De plus, quel que soit g , les flux dus aux courants statoriques et rotoriques tournent à la même vitesse, ωs par rapport au stator. En pratique, ils se composent pour créer dans l'entrefer le flux tournant réel.

L'interaction entre le stator et le rotor crée un couple. L'allure de la courbe couple vitesse ou encore couple glissement car la vitesse du rotor dépend directement du glissement

est donnée (Fig.I.7) pour un fonctionnement à fréquence et tension fixes. Au synchronisme $g = 0$ le couple est nul. Au démarrage $g = 1$ il vaut C_d et il est maximum pour g_{max} . La zone de fonctionnement normal de la machine pour une alimentation à tension et fréquence fixes est comprise entre $g = 0$ et $g = g_n = g_{max}$. g_n est le glissement nominal du moteur donné par le constructeur. Il est généralement inférieur à 5% pour les moteurs de petites et moyennes puissances [1].

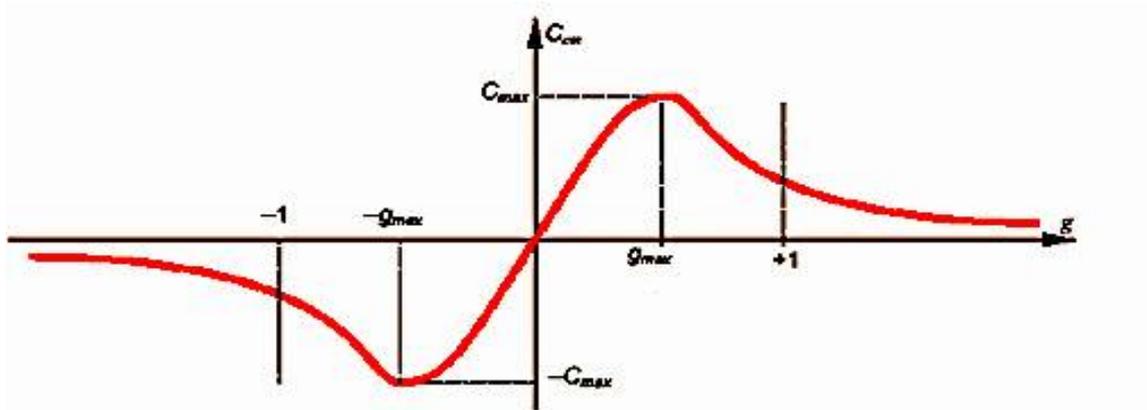


Fig.I.7 Caractéristique couple- glissement du moteur [3].

1.2.5 Schéma électrique équivalent

On peut considérer la machine asynchrone comme un transformateur à champ tournant. En résumé, les grandeurs électriques relatives au primaire et au secondaire peuvent s'écrire toujours relativement à un enroulement.

Pour tenir compte des défauts, les éléments suivants sont rajoutés :

- la résistance R_1 et l'inductance de fuite L_s du stator.
- la résistance R_m et l'inductance « magnétisante » L_m .
- la résistance R_2 et l'inductance de fuite L_r du rotor.

Ce qui donne le schéma ci-dessous [2].

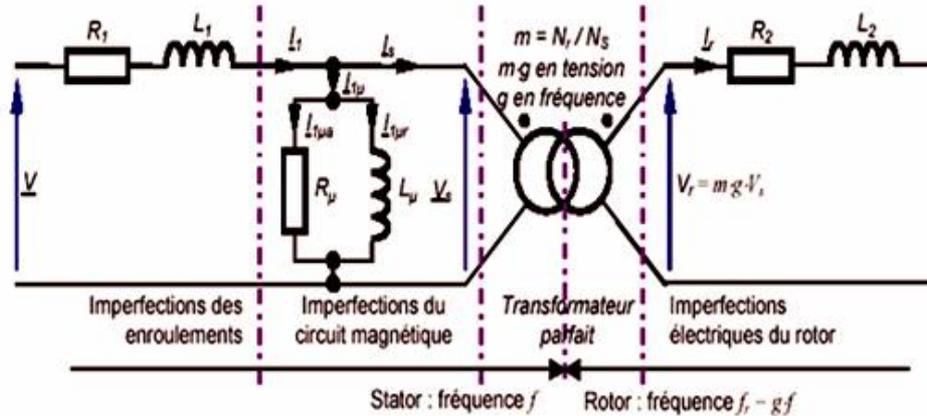


Fig.I.8 Schéma électrique équivalent simplifié de la machine [3].

La (figure I.9) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est l'angle réel multiplié par le nombre p de paires de pôles par phase). Le sens des enroulements de phase est conventionnellement repère par un point(\bullet); un courant positif entrant par ce point crée un flux Φ compte positivement selon l'orientation de l'axe de l'enroulement [3].

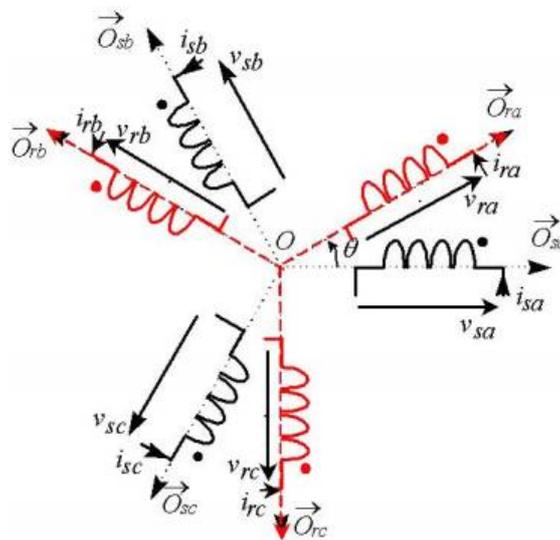


Fig.I.9 Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique [6].

I.2.6 Bilan de puissance

La machine absorbe une puissance active P_{abs} . Une partie de cette puissance est dissipée en pertes Joule au stator p_{JS} et en pertes dans le fer du stator p_{fS} . Le reste traverse l'entrefer : c'est la puissance transmise au rotor P_{tr} . De nouveau, une partie de la puissance transmise est perdue en pertes joule au rotor p_{JR} et pertes dans le fer du rotor p_{fR} : on obtient la puissance mécanique. Il ne reste plus qu'à soustraire les pertes mécaniques p_{mec} pour avoir la puissance utile du moteur P_u . La (Figure.I.10) montre ce transfert de puissance de l'entrée à la sortie du moteur [1].

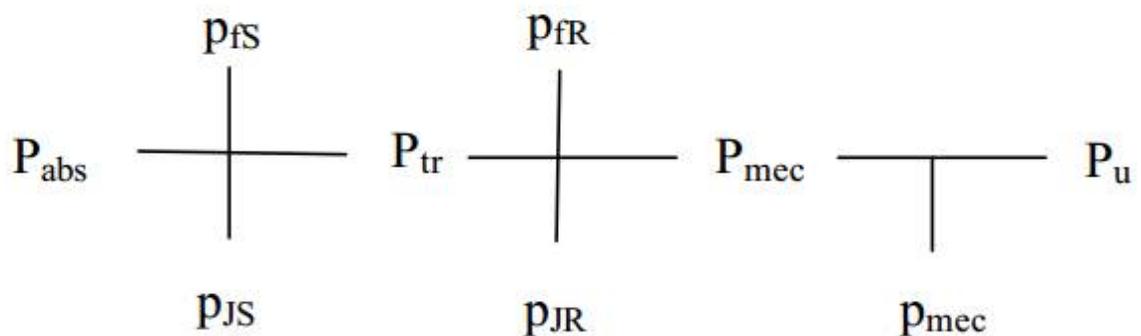


Fig.I.10 Bilan de puissance de la machine asynchrone.

I.3 Couplage de la plaque à bornes

Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située sur le dessus de moteur. On dispose ainsi de six connexions, un pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon la figure ci-contre.

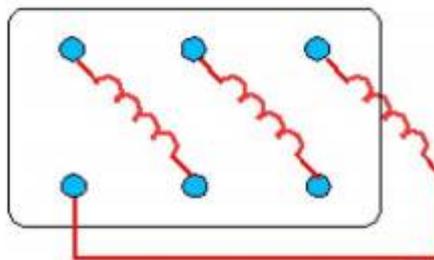


Fig.I.11 La plaque à borne [2].

I.4 Branchement du moteur sur le réseau triphasé

Il n'est pas toujours possible de brancher un moteur asynchrone en étoile ou en triangle. Avec le branchement étoile, la tension à la borne de chacune des bobines est 220V. Dans le montage en triangle, chacune des bobines est alimentée en tension nominale de réseau (380V).

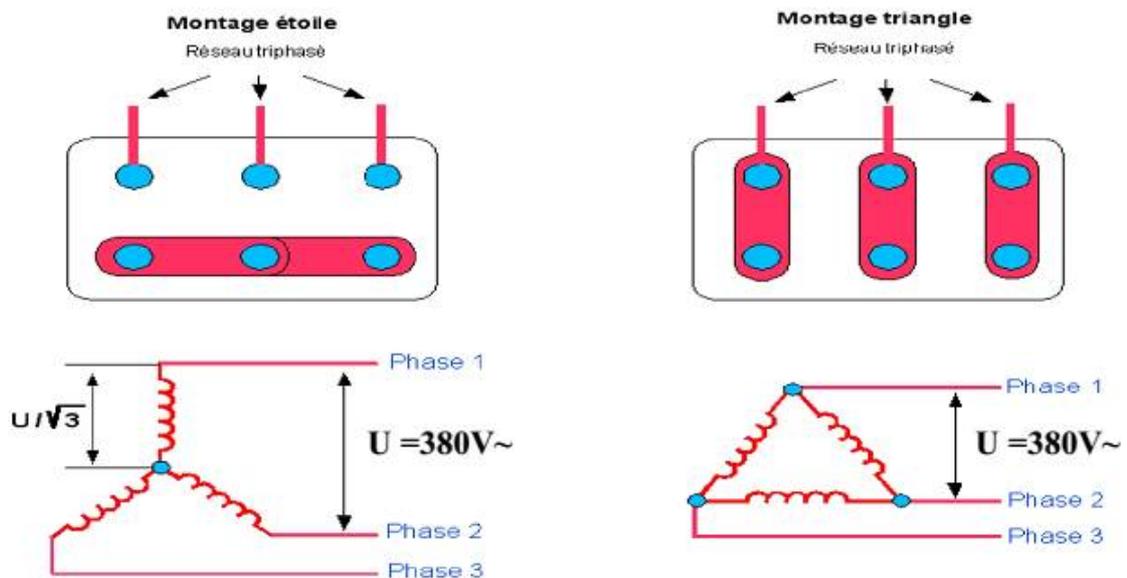


Fig.I.12 couplage des moteurs [2].

I.5 Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement et son coût, son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications [1].

I.6 Le bobinage et les enroulements triphasés des machines tournantes à courant alternatif

I.6.1 Force magnétomotrice (Fmm) d'un stator triphasé bipolaire

Considérons le circuit magnétique d'une machine bipolaire ayant pour fixer les idées, 18 encoches au stator et un rotor lisse. L'entrefer est supposé très faible devant le pas polaire :

$$e \ll \pi R$$

R étant le rayon moyen de l'entrefer ; l'ouverture d'encoche, du même ordre de grandeur que l'entrefer, est faible devant le pas dentaire de telle sorte que ces ouvertures ne perturbent pas localement le champ.

Examinons tout d'abord le cas d'une seule spire logée dans deux encoches diamétralement opposées, soit dans notre cas les encoches 1 et 10 par exemple. La première encoche contient les conducteurs allés et la seconde les conducteurs retour. Les têtes de bobines ne sont pas représentées. Cette bobine parcourue par un courant i (sortant du plan de la feuille pour le point et entrant pour la croix). Le bobinage triphasé est obtenu en mettant deux autres bobines décalées dans l'espace respectivement de 120° et 240° , elle crée un champ magnétique qui se développe : en majeure partie, dans le circuit magnétique en traversant l'entrefer, et qui constitue le flux utile, accessoirement dans les encoches où se trouvent les conducteurs rectilignes d'aller et de retour du courant, ainsi que dans l'air, de part et d'autre du fer autour des connexions frontales appelées têtes de bobine; ces trajets aériens correspondent aux flux de fuite. Le champ principal qui se développe autour de l'entrefer présente la même répartition spatiale dans n'importe quelle coupe du circuit magnétique par un plan perpendiculaire à l'axe, tout au moins hors des parties proches des extrémités. Les lignes d'induction traversent l'entrefer radialement lorsque le fer n'est pas saturé, ce que nous supposerons dans un premier temps, étant entendu, en outre, que les effets perturbateurs des ouvertures d'encoche ne sont pas pris en compte [1][7][8]. La courbe Fmm de l'induction correspondante est alors de forme pratiquement rectangulaire (Figure I.13) :

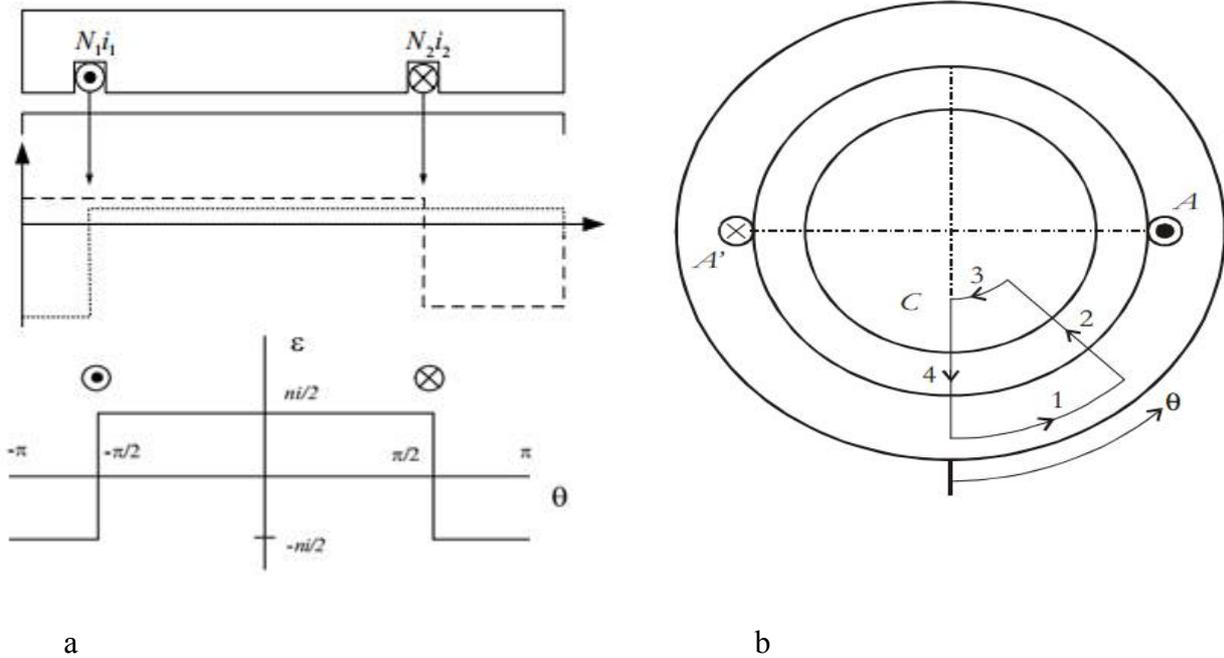


Fig.I.13 a) Fmm d'une phase en fonction de l'angle (θ) b) Bobine diamétrale.

La décomposition en série de Fourier de la Fmm donnée à la (Fig.I.13) ne comporte que des harmoniques impaires et, en prenant une origine des angles convenable, que des termes en cosinus d'où :

$$F_{mm} = i * (A_1 * \cos\theta + A_3 * \cos3\theta + \dots + A_h * \cos v\theta) \quad (I-2)$$

$$A_{2k+1} = \frac{4*n}{2*p*(2k+1)} * (-1)^k \quad (I-3)$$

On a: $v = 2 * K + 1$

On crée une onde pulsante : c'est une onde stationnaire avec une amplitude non constante. La Fmm est rectangulaire. Pour se rapprocher un peu plus d'une Fmm sinusoïdale, on va répartir les bobines le long de l'entrefer [1].

I.6.2 La répartition des bobines

Sur la (Fig.I.14), les conducteurs allés ou retour de chaque phase peuvent occuper un débattement angulaire de 45° . On va le découper en q encoches par pôle et par phase ($q = 3$) sur la (Fig.I.14). Chaque encoche de la phase comporte q/m spires.

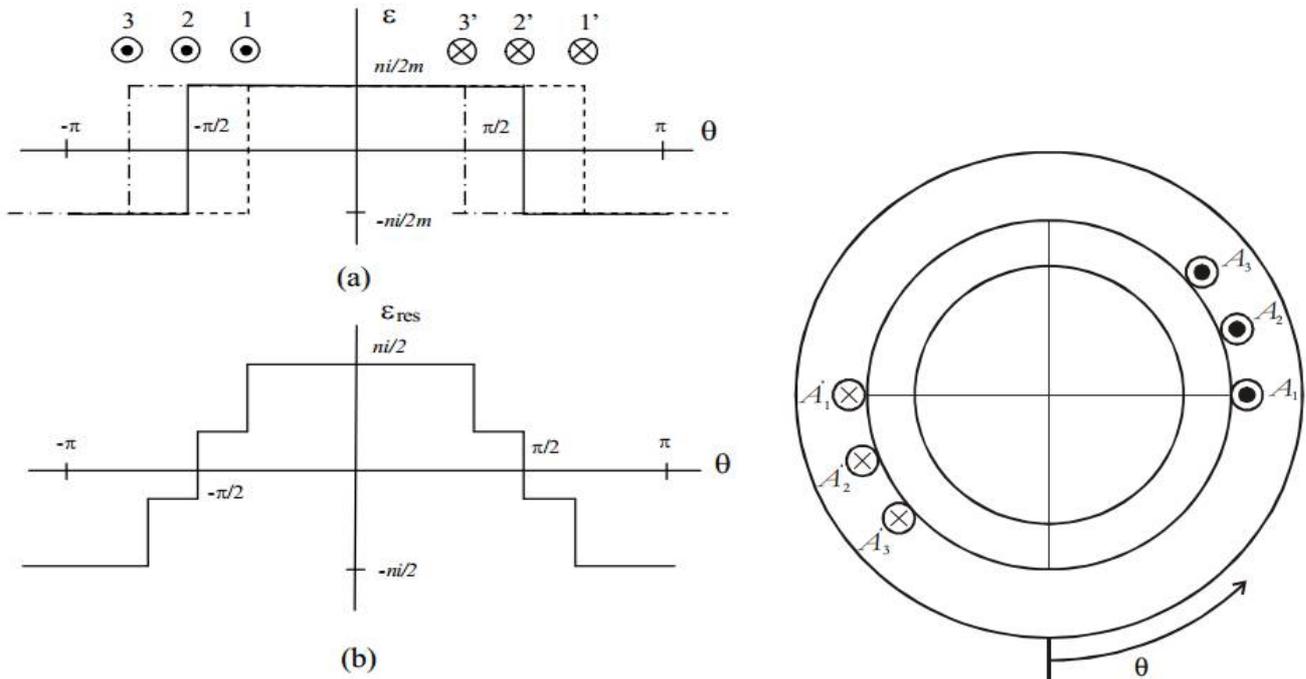


Fig.I.14 Fmm d'une phase en fonction de l'angle (θ).

Pour le fondamental et les divers harmoniques, le coefficient de distribution k_{dv} est le rapport entre ce que donne le bobinage réel et ce que donnerait le bobinage si tous les conducteurs d'une phase pour une paire de pôles étaient regroupés dans deux encoches

$$K_{dv} = \frac{\sin\left(\frac{v \cdot \pi}{6}\right)}{q \sin\left(\frac{v \cdot \pi}{6q}\right)} \quad (I-4)$$

La décomposition en série de Fourier est identique à celle obtenue pour une bobine diamétrale au facteur multiplicatif k_{dv} près (relation I.2) avec $v = 2k + 1$ et :

$$A_{2k+1} = \frac{4 \cdot n}{2 \cdot p \cdot (2k+1)} * (-1)^k * k_{dv}(2 * k + 1) \quad (I-5)$$

Le Tableau.I.1 donne les valeurs de A_v pour différents nombres d'encoches par pôle et par phase. Il montre que dès que q est supérieur à 1, tous les coefficients sont inférieurs à 1. La Fmm a une valeur efficace inférieure à celle que donnerait $q = 1$.

Q	1	2	3	4	$\rightarrow \infty$
A ₁	1.000	0.966	0.960	0.958	0.955
A ₅	0.200	0.052	0.043	0.041	0.038
A ₇	0.143	0.037	0.025	0.023	0.019
A ₁₁	0.091	0.088	0.016	0.011	0.008
A ₁₃	0.077	0.074	0.017	0.010	0.006

Tableau.I.1 Evolution du coefficient de la série de Fourier pour les harmoniques d'espace 1,5,7, 11 et 13 en fonction du nombre m d'encoches par pôle et par phase.

L'augmentation de q réduit donc le taux des divers harmoniques et la forme de la Fmm créée par chaque phase plus voisine de la sinusoïde.

I.6.2.1. Le raccourcissement des bobines

Jusqu'à maintenant, les bobines étaient diamétrales : leur ouverture était de 180°. On parle de pas diamétral pour ces bobines. Utiliser un pas raccourci signifie que l'ouverture des bobines est inférieure à 180° : il vaut 180°*β où β est le pas relatif. Pour q = 2 et un raccourcissement d'un pas, β = 5/6 (Fig.I.15).

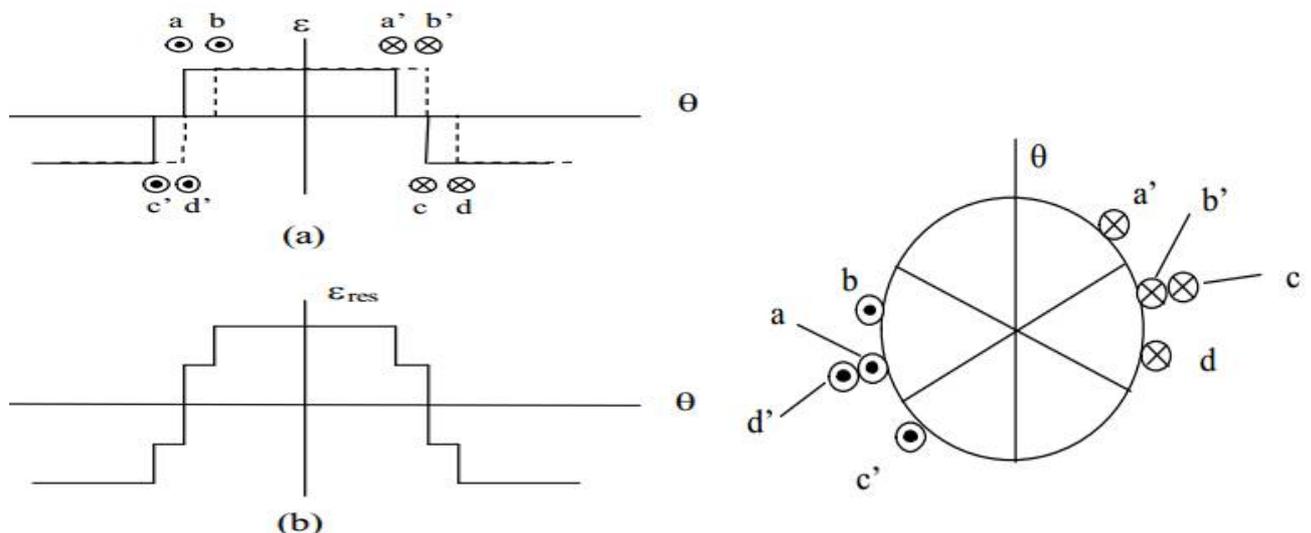


Fig.I.15 Fmm d'une Bobines avec un pas raccourci en fonction de l'angle (θ).

Pour le fondamental et les divers harmoniques, le coefficient de raccourcissement **Kr** :

$$K_r = \sin \frac{\pi y}{2 \tau p} \tag{I.6}$$

I.6.2.2 Le coefficient de bobinage kb

Il s'agit du produit du coefficient de distribution par le coefficient de raccourcissement :

$$K_{bv} = K_{dv} \cdot K_{rv} \tag{I.7}$$

La décomposition en série de Fourier est identique à celle obtenue pour une bobine diamétrale au facteur multiplicatif k_{bv} près (relation I.2) avec $v = 2k + 1$ et :

$$A_{2k+1} = \frac{4 \cdot n}{2 \times p \times (2k+1)} * (-1)^k * k_{bv}(2 * k + 1) \tag{I.8}$$

Le Tableau I-2 indique la valeur de A_v . Il montre que le raccourcissement du pas d'enroulement permet de réduire les harmoniques.

β pas relatif	rang de l'harmonique				
	5	7	9	11	13
q=1					
$3/3$	1.000	0.020	0.143	0.091	0.077
$2/3$	0.866	0.173	0.124	0.079	0.866
q=2					
$6/6$	0.966	0.052	0.037	0.088	0.074
$5/6$	0.933	0.013	0.010	0.085	0.072
$4/6$	0.837	0.045	0.032	0.076	0.065
q=3					
$9/9$	0.960	0.044	0.025	0.016	0.017
$8/9$	0.945	0.028	0.009	0.006	0.011
$7/9$	0.902	0.008	0.019	0.012	0.003

6/9	0.831	0.038	0.022	0.014	0.014
q=4					
12/12	0.958	0.041	-0.023	0.011	0.010
11/12	0.949	0.033	0.014	0.001	0.001
10/12	0.925	0.011	0.006	0.011	0.009
9/12	0.885	0.016	0.021	0.004	0.004
q=5					
15/15	0.957	0.040	0.021	0.010	0.008
14/15	0.951	0.035	0.016	0.004	0.002
13/15	13/15	0.936	0.020	0.002	0.007
12/15	0.910	0.000	0.013	0.009	0.005

Tableau.I.2 Evolution du coefficient de la série de Fourier pour les harmoniques d'espace 1, 5,7, 11 et 13 en fonction du nombre q d'encoches par pôle et par phase et du pas relatif β .

A partir du tableau, on fixe le coefficient de bobinage $\beta > \frac{2}{3}$ pour ne pas trop réduire l'amplitude de la Fmm fondamentale. L'optimum se trouve autour de $\beta = 4/5$, valeur qui annule l'harmonique d'espace 5.

I.7 Fmm triphasée résultante, champ tournant bipolaire

Près et parcouru par des courants triphasés équilibrés (trois courants identiques au déphasage de $2\pi/3$ près). On suppose que les courants sont sinusoïdaux. Par contre chaque phase crée dans l'entrefer une Fmm à répartition non sinusoïdale : il apparaît alors des harmoniques d'espace (Fig.I.16) représente Fmm d'un bobinage statorique à une couche.

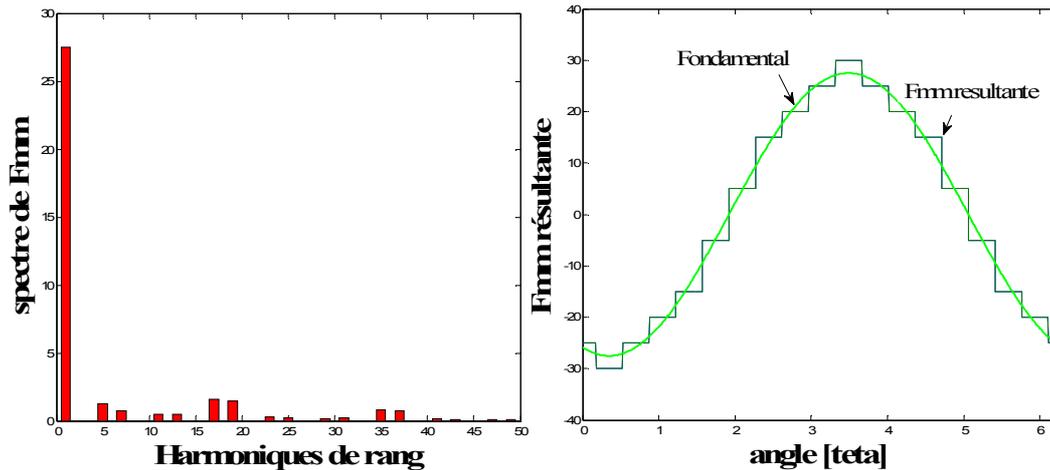


Fig.I.16 Fmm résultante d'enroulement à une couche $q=3$, $p=1$ et son spectre d'harmonique.

La formule de Fmm résultante est :

$$F_{mm} = F_{mm1} + F_{mm2} + F_{mm3} \quad (I.9)$$

$$F_{mm} = \frac{3}{2} \cdot A_1 \cdot I \cdot \cos(\omega s \cdot t - \theta) + \frac{3}{2} \cdot A_5 \cdot I \cdot \cos(\omega s \cdot t + 5 \cdot \theta) + \frac{3}{2} \cdot A_7 \cdot I \cdot \cos(\omega s \cdot t + 7 \cdot \theta) \dots + \frac{3}{2} \cdot A_v \cdot I \cdot \cos(\omega s \cdot t - v \cdot \theta) \quad (I.10)$$

La Fmm triphasé bipolaire résultante est la somme des Fmm dues :

- Aux harmoniques d'espace de rang $v = 3k + 1$ créant des ondes à répartition sinusoïdale tournant dans le sens direct à la vitesse $\omega s/v$.
- Aux harmoniques d'espace de rang $v = 3k - 1$ créant des ondes à répartition sinusoïdale tournant dans le sens inverse à la vitesse $\omega s/v$.
- Les harmoniques multiples de trois ont une contribution nulle.

Le bobinage fournit donc une Fmm comportant :

- $1/5 \cdot k_b 5$ d'harmoniques d'espace de rang 5.
- $1/7 \cdot k_b 7$ d'harmoniques d'espace de rang 7.
- $1/v \cdot k_b v$ d'harmoniques d'espace de rang v (v impair et non multiple de 3) [1].

Pour évaluer le pourcentage de ces harmoniques, on calcule le THD(%) (Taux d'harmonique)

$$\text{THD}(\%) = \text{Distorsion totale} = 100 * \frac{\text{valeur efficace de l'ensemble des harmoniques}}{\text{valeur efficace du fondamental}} \quad (\text{I.11})$$

I.8 Conclusion :

Les machines triphasée asynchrone à courant alternatif, elles sont constituées différent types d'un bobinage statorique qui on voit dans le chapitre suivante. L'étude de ces enroulements montre qu'un bobinage réparti avec ou sans raccourcissement de pas permet d'obtenir des ondes de Fmm trapézoïdale dans l'entrefer à cause l'ouverture d'encoche et le contenu harmonique.

Chapitre II :

Différentes types de bobinage

II.1 Introduction

Les stators des moteurs asynchrones sont réalisés dans l'industrie par différents types d'enroulements. Ils sont constitués des enroulements bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique dont l'objectif est de créer un champ tournant. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine et canalisées le flux magnétique, Ce chapitre traite les différents types d'enroulement et son calcul de paramètres.

II.2 Rappel sur les paramètres des enroulements des machines à courant alternatif

L'enroulement dans toutes les machines électriques est la pièce maîtresse nécessaire pour la création de champ électromagnétique. Tout enroulement électrique est défini par les paramètres suivants :

Z : nombre d'encoches

p : nombre de paires de pôles.

m : nombre de phases.

q : nombre d'encoches par pôle et par phase et défini par :

$$q = \frac{Z}{2p \times m} \quad (\text{II.1})$$

La caractéristique essentielle de tout enroulement à courant alternatif est le nombre d'encoches qu'occupe une phase sous chaque pôle, celui-ci détermine le nombre de bobine dans un groupe. Une autre caractéristique de l'enroulement est le pas polaire τ_p défini comme il est la distance entre deux lignes neutres consécutives on l'appelle aussi pas d'une section.

$$\tau_p = \frac{Z}{2p} \quad (\text{II.2})$$

Le pas de l'enroulement y ; c'est le nombre d'encoches par section. il peut être :

$$y < m \times q = Z / (2p) : \text{Pour un pas raccourci.} \quad (\text{II.2.1})$$

$$y = m \times q = Z / (2p) : \text{Pour un pas diamétral.} \quad (\text{II.2.2})$$

$$y > m \times q = Z / (2p) : \text{Pour un pas allongé.} \quad (\text{II.2.3})$$

$$\text{Le pas relatif : } \beta = \frac{y}{\tau} \quad (\text{II.3})$$

En fonction du nombre de pôles $2p$, il est recommandé d'avoir les valeurs suivantes :

Pour $2p = 2$ $\beta \approx 0.67$.

Pour $2p \geq 4$ $\beta \approx 0.83$ [9].

II.3 Représentation des enroulements à courant alternatif

Un enroulement est exécuté dans des encoches présentées sur la surface intérieure du stator. Tous les enroulements électriques sont constitués de groupes de bobines. Le groupe de bobine peut être composé par :

II. 3.1 Bobines concentriques reliées en série

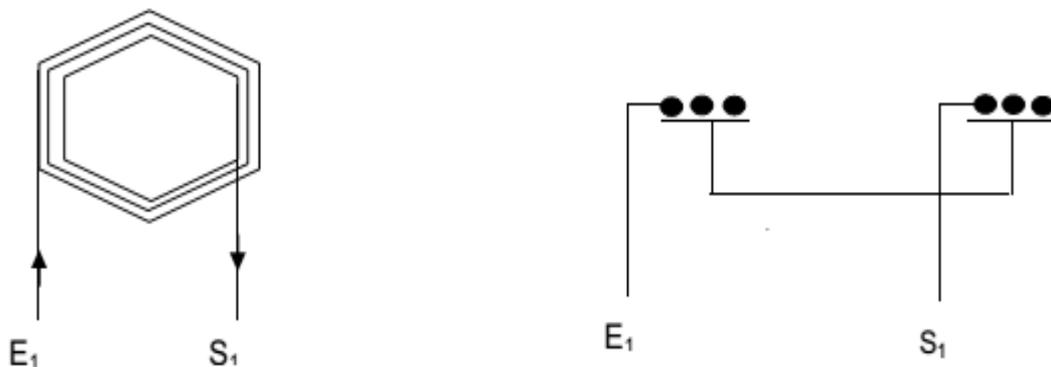


Fig.II.1 Bobines concentriques.

II. 3.2 Bobines identiques reliées en série

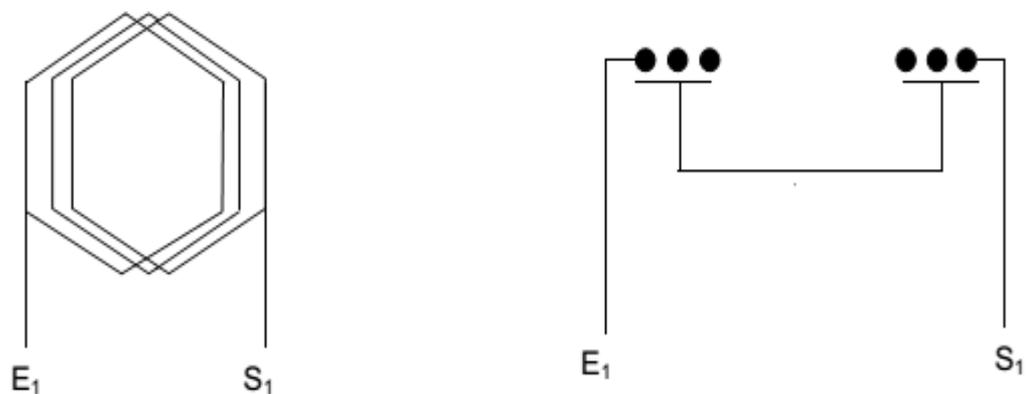


Fig.II.2 Bobines identiques [2].

II.4 Schémas de bobinage

Revenons à la répartition en escalier de l'induction dans l'entrefer. Il est évident qu'elle ne dépend que de la répartition des conducteurs dans les encoches et du nombre d'encoches. En particulier, elle n'est en rien influencée par la manière dont sont réalisées les connexions frontales.

Ainsi, les cinq schémas de bobinage de la (Fig.II.3) :

- Bobinage imbriqué diamétrale à pôle conséquents (Fig.II.3.a).
- Bobinage concentrique à pôle conséquents (Fig.II.3.b).
- Bobinage concentrique à pôle non conséquents (Fig.II.3.c).
- Bobinage imbriqué diamétrale à pôle non conséquents (Fig.II.3.d).
- Bobinage imbriqué raccourci à pôle non conséquents (Fig.II.3.e).

Comme on peut le voir, ces schémas ne diffèrent que par la répartition et la longueur des têtes de bobines. Ces dernières n'affectent que :

- La masse du cuivre utilisé, et donc directement le coût.
 - Les chutes ohmiques et le flux de fuite des connexions frontales, donc le rendement.
 - Le refroidissement de ces connexions, qui est souvent un critère important.
- Enfin, La facilité de mise en œuvre de manière industrielle ainsi que la facilité d'isolation.

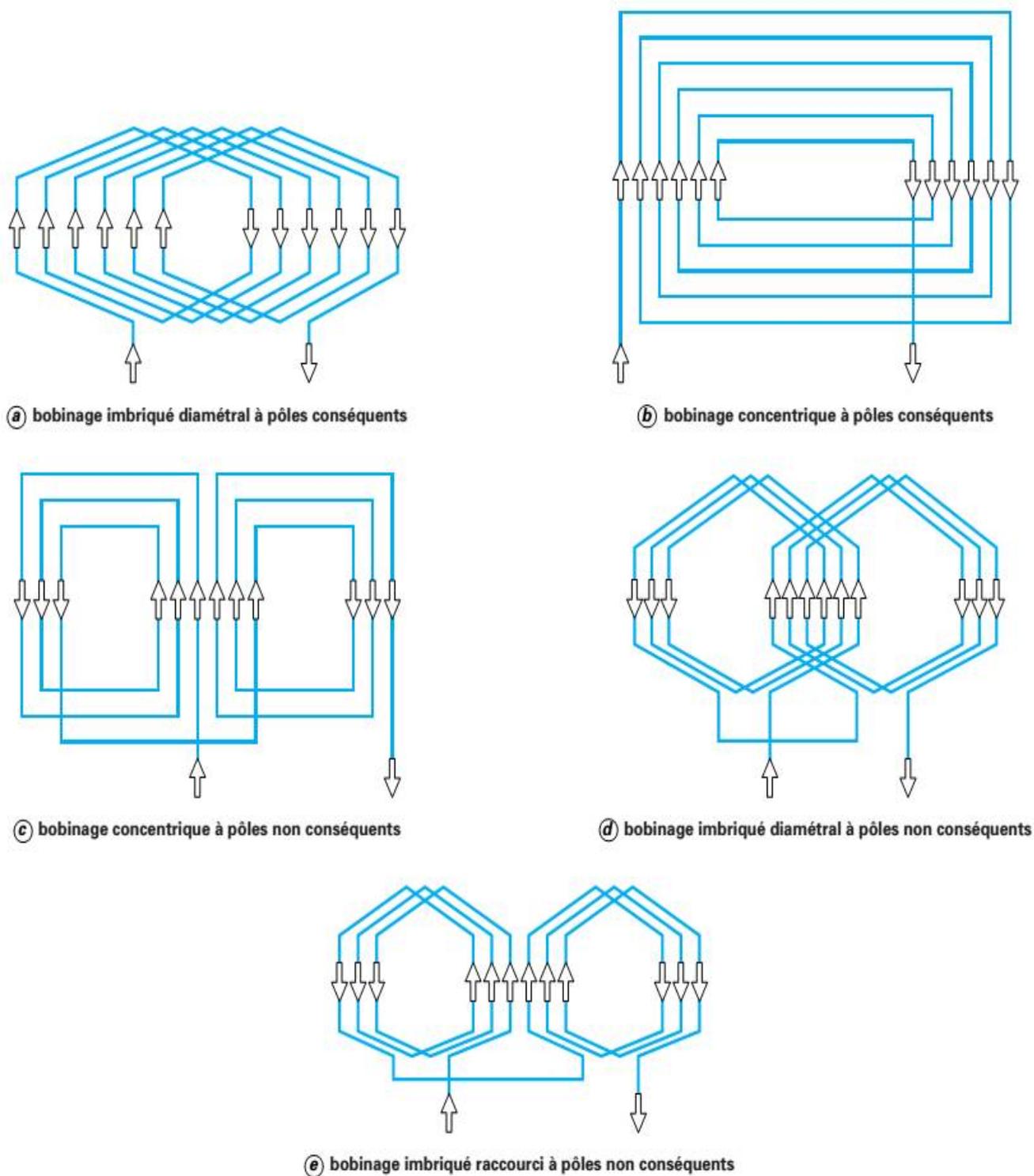


Fig.II.3 Schémas de bobinages [8].

II.5 Aperçu sur les enroulements des machines électriques

Dans l'industrie électrotechnique, l'un des problèmes majeurs dans la fabrication des machines électriques reste principalement la mise en encoches des enroulements. Le taux élevé de claquage des conducteurs, l'isolation à la masse et entre phases de la machine sont soumis à un nombre significatif de chocs et d'autres actions mécaniques. Celles-ci vont évoluer dans le cas où la machine fonctionne dans des conditions d'humidité, de vibrations, de surtensions de commutation, de forces dynamiques de démarrage et d'inversion. Les enroulements de machines électriques diffèrent par leurs sources d'alimentation à courant alternatif ou à courant continu. De même qu'ils diffèrent par les modes de conversion en machines tournantes ou statiques (transformateurs). Ils peuvent être répartis suivant le schéma ci-dessous.

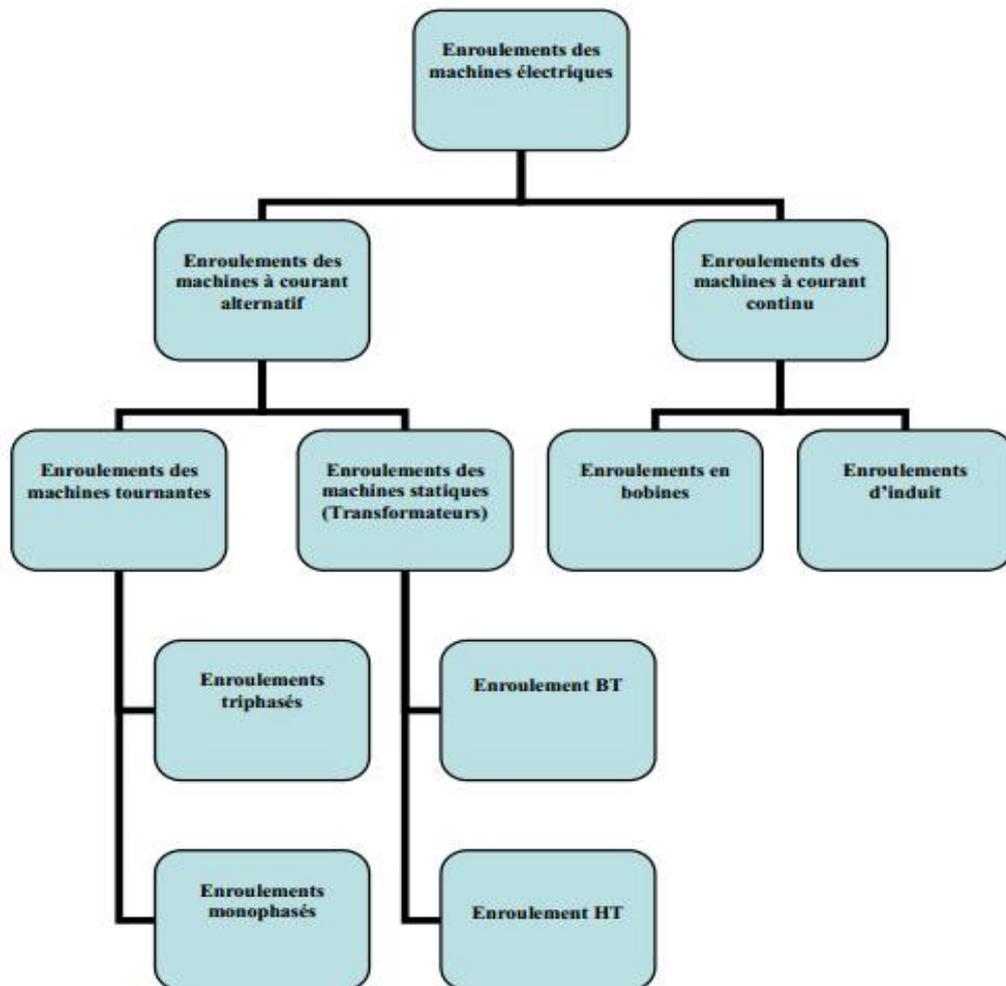


Fig.II.2 Les enroulements des machines électriques.

Les enroulements à une couche constituent le premier type d'enroulements triphasés. Ils peuvent être subdivisés en enroulements par pôle conséquent et par pôle comme le montre le schéma ci-dessous.

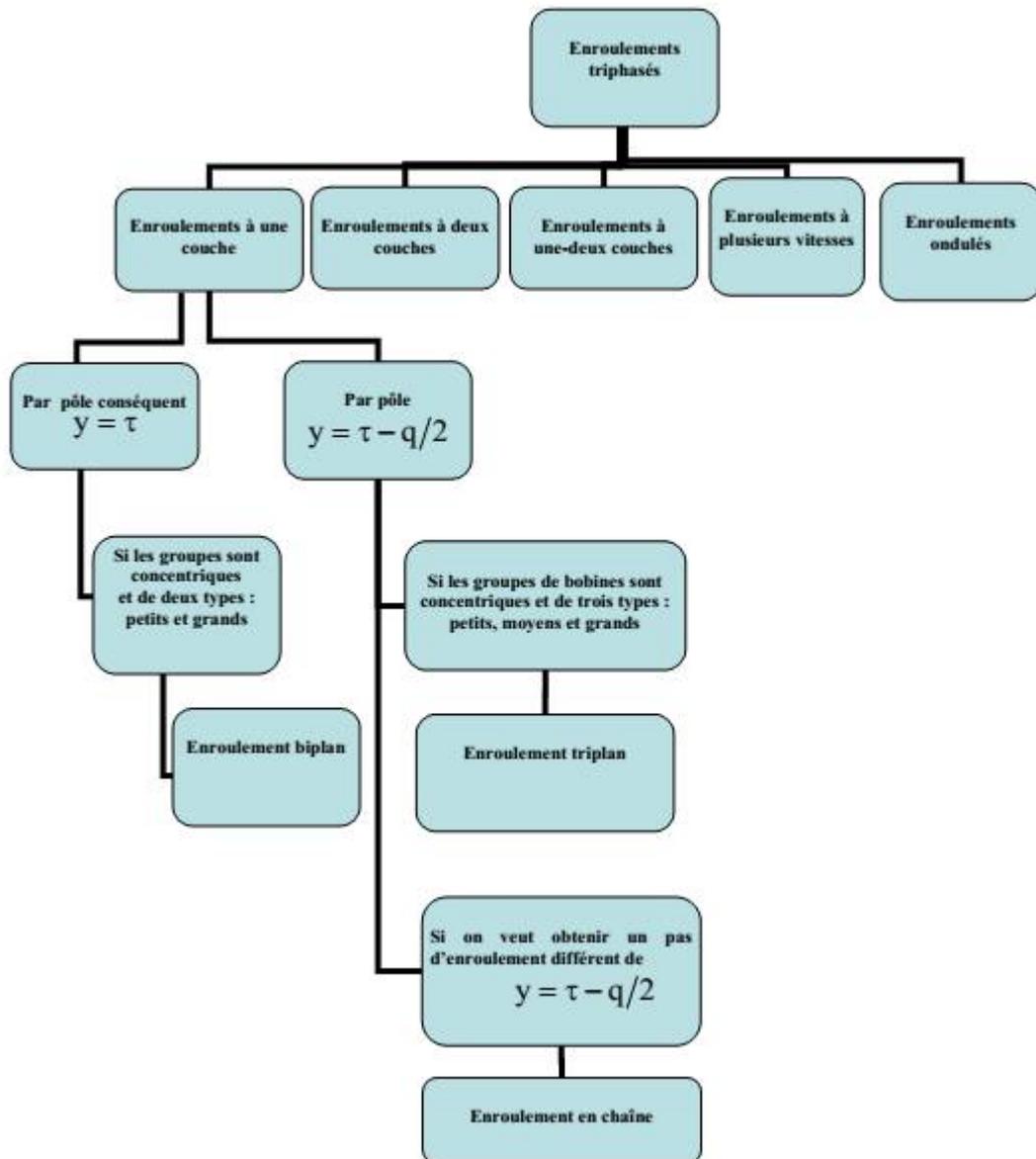


Fig.II.4 Les types d'enroulements à une couche.

L'utilisation de ces enroulements est destinée particulièrement aux machines de faibles puissances (à petits diamètres intérieurs statoriques) (Fig.II.6), et aux machines de grandes puissances quand le nombre de pôles est élevé.

Dans les systèmes triphasés, On distingue six types d'enroulements à une couche :

- Enroulement à une couche par pôle conséquent.

- Enroulement à une couche par pôle.
- Enroulement à une couche biplan.
- Enroulement à une couche triplan.
- Enroulement à une couche à q fractionnaire.
- Enroulement à une couche en chaîne.

Pour concevoir tout enroulement, il faut tout simplement faire appel au nombre d'encoches par pôle et par phase q et à l'étoile des phases, (Fig.II.5).

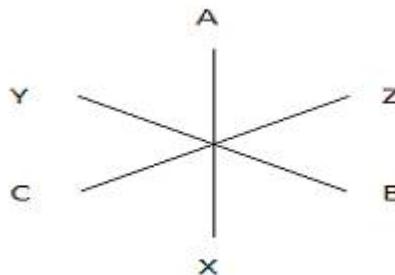


Fig.II.5 Etoile des phases.

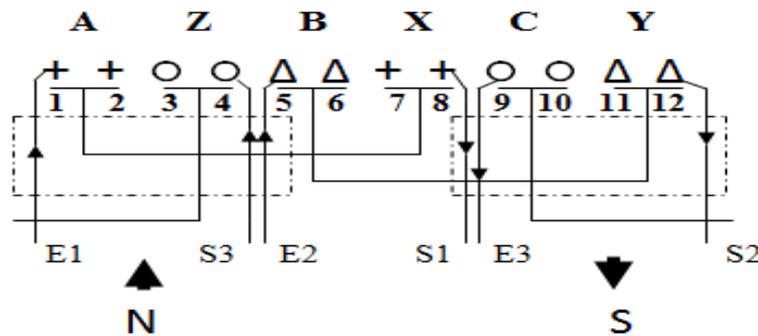


Fig.II.6 Enroulements triphasés à une couche par pôle conséquent.

$$Z=12 ; 2p=2 ; q=2 ; \tau p=6.$$

Le second type est représenté par les enroulements à deux couches destinées aux machines électriques de moyennes et grandes puissances,(Fig.II.7).

Ce type d'enroulement est réalisé à pas raccourci en section par pôle (Fig.II.8). Le nombre de possibilités de raccourcissement est égal à q.

Il possède plusieurs avantages dont principalement :

- La possibilité d'éliminer les harmoniques supérieures.
- une économie en cuivre (diminution de la longueur moyenne de la bobine).

L'inconvénient principal de ce type d'enroulement est la présence de faisceaux appartenant à différentes phases dans la même encoche, ce qui nécessite le renforcement de l'isolation entre eux [9].

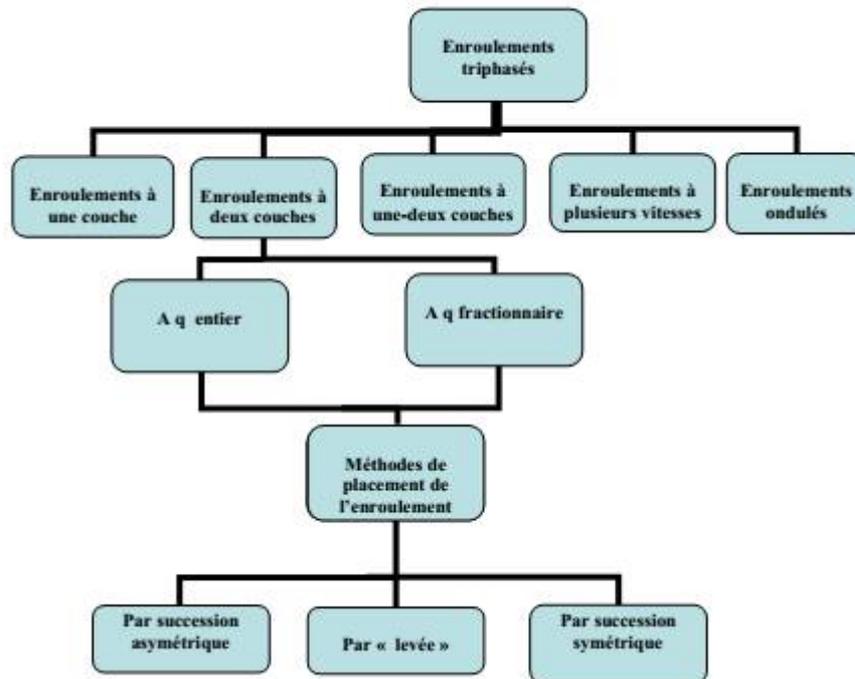


Fig.II.7 Enroulements triphasés à deux couches.

Un schéma simple représente l'enroulement à deux couches :

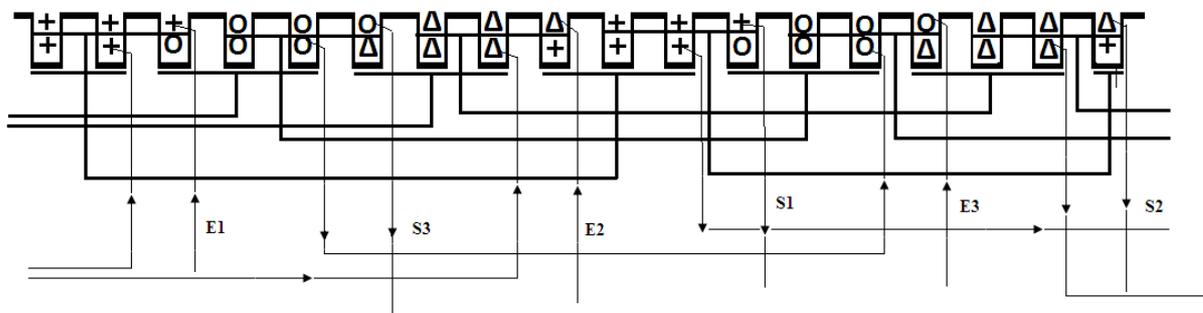


Fig.II.8 Enroulements triphasés à deux couches

$$Z=18 ; 2p=2 ; q=3 ; y=8.$$

Les enroulements à une_ deux couches constituent le troisième type d'enroulement. Par leurs propriétés électromagnétiques, ils ne diffèrent pas des enroulements à deux couches. Cependant, ils s'adaptent mieux au processus automatique de mise en encoche, (Fig.I.9).

Dans le cas d'un placement manuel, une presse centrifuge est nécessaire pour le traitement des parties frontales. En effet, ce type d'enroulement donne naissance à des «gonflements» (épaississements) au niveau des parties frontales et ces dernières ne sont pas uniformes par rapport à la circonférence du stator. En outre la présence des grandes bobines rend la manipulation des têtes de bobines très délicate et peut même affecter l'état de l'isolant. Un enroulement à une_ deux couches est un enroulement constitué de groupes concentriques constitués de petites bobines dont les faisceaux n'occupent que la moitié de l'encoche et des grandes bobines dont les faisceaux occupent toute l'encoche. La réalisation d'un tel enroulement n'est possible que si $q > 2$. Le nombre de possibilités de réalisation d'un enroulement à une_ deux couches pour de mêmes paramètres est de $N = q - 2$.

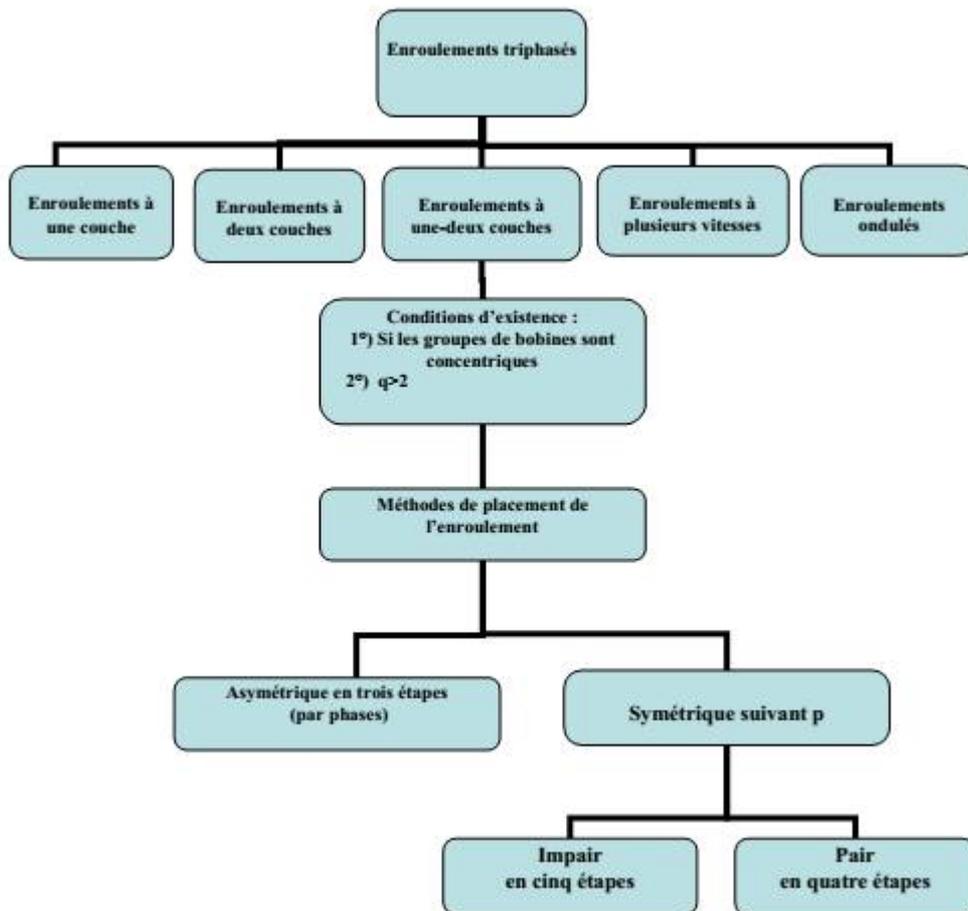


Fig.II.9 Enroulements triphasés à une_ deux couches.

Nouveau type d'enroulement à une_ deux couches (ou hybride) permettant le placement mécanisé avec un nombre d'étapes moins important. Pour mieux définir cet enroulement, considérant celui à deux couches ayant un nombre d'encoches statoriques : $Z = 36$, $2p = 4$ et $y = 8$ (Fig.II.10) :

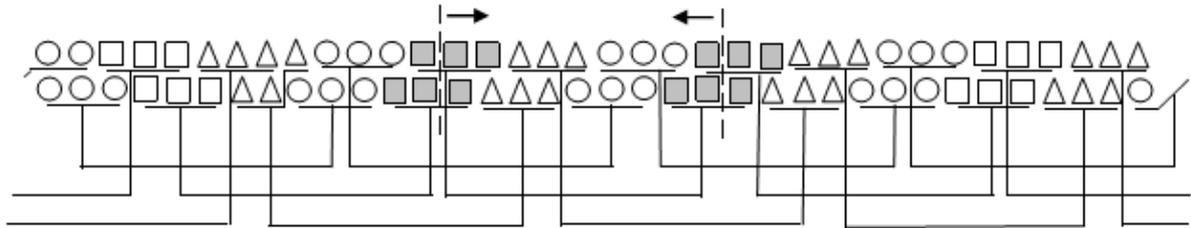


Fig.II.10 Enroulement à deux couches.

Traçons deux traits fictifs départageant les pôles fictifs instantanés en deux parties égales. On remarque qu'on peut concevoir pour ce même enroulement un nouveau groupe de bobines concentriques constitué d'une grande bobine occupant toute l'encoche et une deuxième petite dont les faisceaux n'occupent que la moitié des encoches (Fig.II.10) :

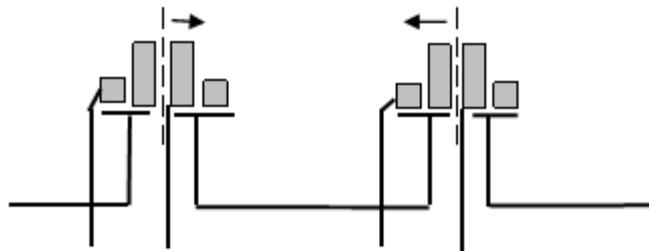


Fig.II.10.1 Groupe de bobines à une deux couches.

Actuellement, la méthode la plus utilisée pour le placement automatique de ce type d'enroulement est celle du placement par phase en trois étapes. La première étape (Fig.II.11) :

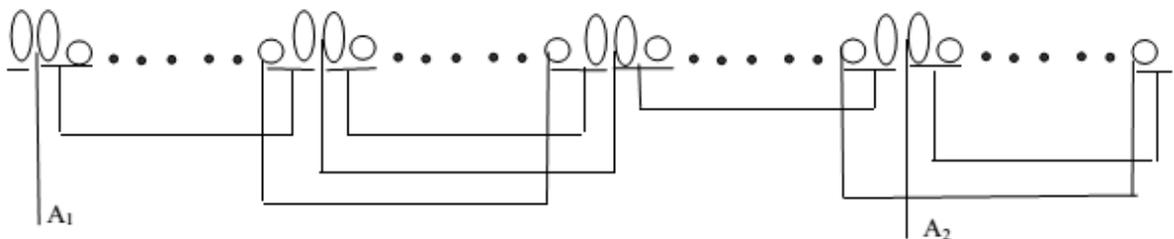


Fig.II.11 Placement de la première phase.

La seconde étape (Fig.II.12) :

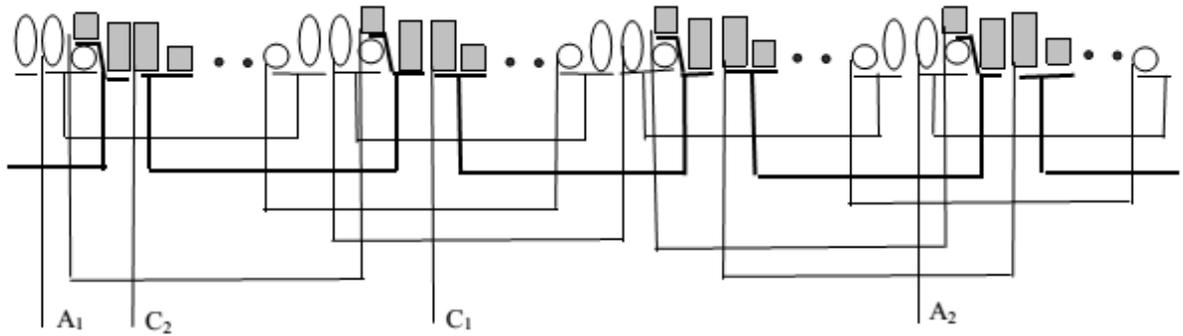


Fig.II.12 Placement de la seconde phase.

La troisième étape (Fig.II.13) :

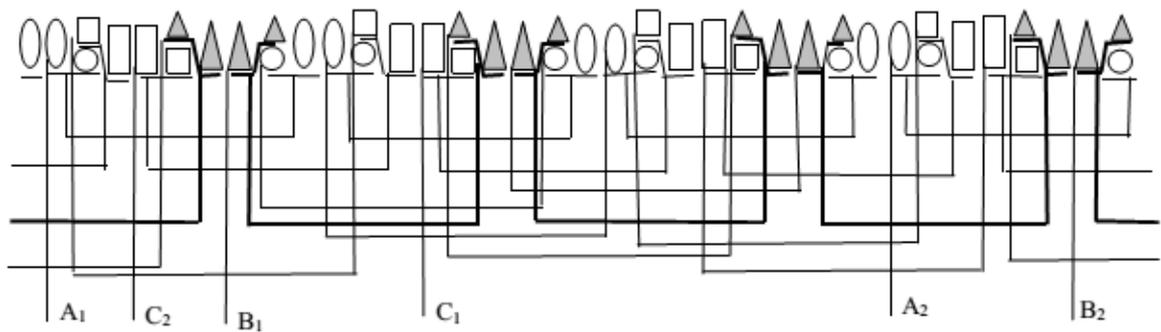


Fig.II.13 Enroulement triphasé à une- deux couches place en trois étapes [10].

Les enroulements à plusieurs vitesses représentent le quatrième type d'enroulement des systèmes triphasés. Ils sont utilisés dans les machines électriques nécessitant deux, trois ou quatre vitesses de rotation, (Fig.II.14).

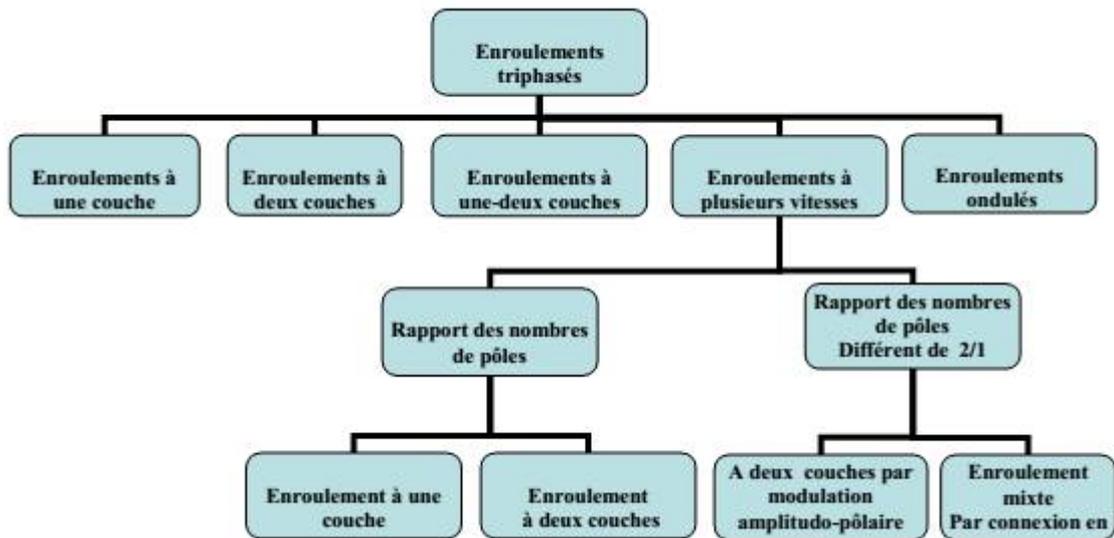


Fig.II.14 Enroulements triphasés à plusieurs vitesses.

Les enroulements ondulés triphasés représentent le cinquième type d'enroulement des systèmes triphasés, (Fig.II.15). Dans les machines électriques de grandes puissances, en particulier dans les turboalternateurs, la tension nécessaire de l'enroulement statorique est obtenue pour un nombre de spires dans la bobine $W_b = 1$ à cause des grandeurs du flux magnétique et du nombre important de bobines, Dans les enroulements à deux couches à nombre de pôles important, on obtient un nombre conséquent de liaisons (ponts) de bobines ou groupes de bobines. De ce fait, la réalisation des enroulements à l'aide de conducteurs en méplat de section importante avec des groupes composés seulement d'une seule bobine (coefficient de distribution $k_d = 1$) mène à une dépense supplémentaire de cuivre. L'utilisation des enroulements ondulés basés sur le principe de l'enroulement à courant continu permet d'obtenir de manière automatique la connexion des groupes composant la phase sans la nécessité de recourir aux ponts.

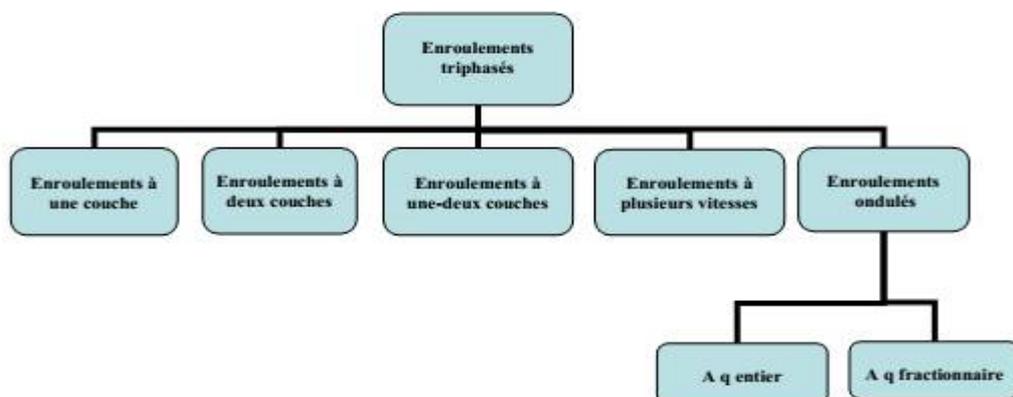


Fig.II.15 Enroulements ondulés triphasés.

II.6 Schéma de bobinage linéaire

Plusieurs paramètres sont importants en vue de représenter un enroulement :

q : Le nombre d'encoches par pôle et par phase. il y a 6pm encoches avec p le nombre de paires de pôles et m le nombre des phases.

τ_p : Le pas polaire: $q \cdot m$ distance mesurée à la périphérie de l'entrefer et séparant les axes de deux pôles magnétiques successifs de polarité différente (Fig.II.16):

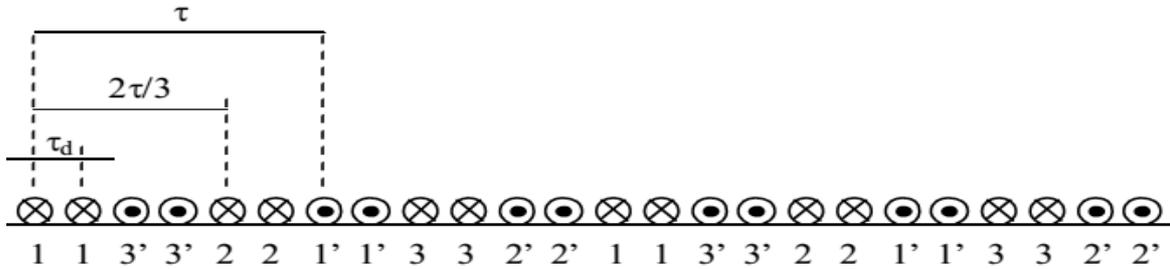


Fig.II.16 Enroulement à $q=2, \tau = 6, p=2$ [11].

II.6.1 Exemple de calcul des paramètres d'enroulement triphasé

Un moteur est à induction à quatre pôles couplé au triangle avec 36 encoches statorique et 28 bars dans le rotor. Sur la (Fig.II.17). Détails du stator et la géométrie des bars du rotor sont. Les données nominales dans la plaque signalétique sont :

U (V)	I (A)	P (W)	n (tr/min)	$\cos\rho$	η	f (Hz)
400	8	4000	1430	>0,8	>0,8	50

Tab.III.1 Données nominales orientées du prototype du moteur à induction [13].

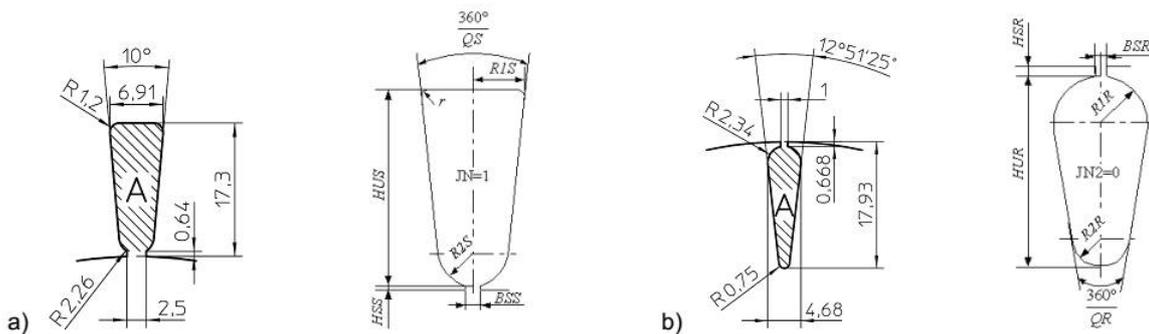


Fig.II.17 Les dimensionnements des encoches du stator et rotor [13].

II.6.2 Calcul des paramètres d'enroulement

Le calcul des paramètres d'enroulement commence par le calcul de nombre d'encoche du stator par pôle par :

$$q_p = \frac{q}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \quad (\text{II.4})$$

Le nombre d'encoche du stator par pôle et par phase est nécessaire :

$$q = \frac{q}{2p_m} = \frac{36}{4.3} = 3$$

α : angle mécanique entre les encoche de stator peut être facilement calculée par :

$$\alpha_m = \frac{360^\circ}{q} = 10^\circ \quad (\text{II.5})$$

Et aussi l'angle électrique compte tenu du nombre de p paires de pôle par :

$$\alpha = P \frac{360^\circ}{Z} = 2 \frac{360^\circ}{36} = 20^\circ \quad (\text{II.6})$$

τ_p : Le pas polaire

$$\tau_p = q_m = 9 \quad (\text{II.7})$$

La section d'encoche du stator au peut être calculé par :

$$A_u = (R_{1s} + -R_{2s})(H_{us} - R_{2s}) + \frac{\pi R_{2s}^2}{2} = 90.32 \text{mm} \quad (\text{II.8})$$

La tension induite E_1 soit environ 96% de la tension nominale et $\emptyset = 6,25 \cdot 10$ (Vs), le nombre de spires N par phase peut être calculé:

$$N = \frac{E_a}{4.44.f.\Phi.K_b} = 288 \text{ spires} \quad (\text{II.9})$$

f est la fréquence, k_b le facteur de bobinage et a le nombre de branches parallèles dans l'enroulement. Le nombre de conducteurs par phase Z :

$$z = 2.N = 2.288 = 576 \text{ spires} \quad (\text{II.10})$$

Le nombre de conducteurs par encoche z_u peut être déterminé Par (II.11) compte tenu du nombre de phases m :

$$z_u = \frac{m.z}{Z} = \frac{2.576}{36} = 48 \text{ conducteurs} \quad (\text{II.11})$$

II.7 conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les types d'enroulements du moteur asynchrone et leurs avantages et inconvénients. Ensuite, une rappelle sur le calcul des paramètres nécessaires de bobinage. Afin de bien comprendre l'intérêt des différents enroulements, on peut passer pour connaître la création du champ tournant dans différents enroulements et le détail des harmoniques d'espace qui sont mis en lumière.

Chapitre III:

**Etude comparative entre de
différentes types de bobinage (par
F.m.m)**

III.1 Introduction

Ce chapitre traite une étude de différents types d'enroulements statoriques d'une machine asynchrone triphasé. En commençant cette étude par une introduction sur les éléments de base de bobinage. En suite une étude basée sur l'analyse spectrale de force magnétomotrice résultante à savoir toutes les harmoniques de l'espace, On y calcule la force magnétomotrice (Fmm) triphasée résultante. On s'est intéressé à réduire les harmoniques d'espace de Fmm des d'efférent enroulements, On a ainsi été capable d'éliminer certains harmoniques d'espace. Enfin, on fait une comparaison entre les trois types d'enroulements à partir de :

- Le taux d'harmoniques THD.
- Le coefficient d'enroulement k_b .
- Le pas relatif.
- L'amplitude de Fmm fondamentale.
- Les nombres d'étape important pour le placement de tous les groupes formant l'enroulement.

III.2 Force magnétomotrice des enroulements à courant alternatif

Dans les moteurs électriques, principalement le but des enroulements de courant alternatif est de produire une onde Fmm tournante se compose principalement du composante sinusoïdale fondamentale [15] [16]. Le champ magnétique de l'enroulement est déterminé par sa force (Fmm) qui dépend de l'aménagement de l'enroulement et des courants qui le parcourent, la machine est créé un champ magnétique tournant par une célibataire bobine concentrée avec (Fig.III.1) [17]-[20].

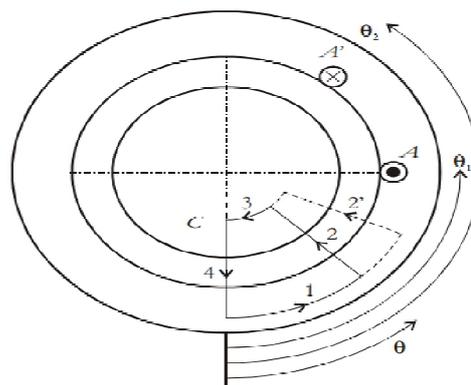


Fig.III.1 Champ magnétique créée par une seule bobine.

En supposant une longueur d'entrefer uniforme, c'est-à-dire négliger l'existence des encoches dans le stator et du rotor, ainsi qu'en supposant un fer infiniment perméable, la loi de circuit d'Ampère :

$$\oint H. dl = \int J. ds \quad (III-1)$$

On obtient une forme beaucoup plus simple :

$$H(\theta).g + H(0).g = i.n(\theta) \quad (III-2)$$

$H(\theta)$: champ magnétique dans l'entrefer à la position décrite par angle θ , g : la longueur de l'entrefer, $i.n(\theta)$: Force magnétomotrice (Fmm) [21].

La force magnétomotrice (Fmm) pourrait être définie de la manière suivante :

$$n(\theta).i = \begin{cases} Nn.i & \theta_1 < \theta \leq \theta_2 \\ 0 & \text{pour les autres } \theta \end{cases} \quad (III-3)$$

En employant la seconde loi du magnétisme, la loi de Gauss :

$$\oint B. ds = 0 \quad (III-4)$$

Et analysant uniquement les processus électromagnétiques dans l'entrefer, suit :

$$\mu_0 \oint H. ds = 0 \quad (III-5)$$

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} H.r. d\theta. dz = 0 \quad (III-6)$$

En supposant que H ne dépend pas de la coordonnée axiale, l'expression ci-dessus est égale à :

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} H. d\theta = 0 \quad (III-7)$$

De (III-2) et (III-7) suit :

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[H(0) + \frac{i}{g} n(\theta) \right] d\theta = 0 \quad (III-8)$$

$$H(0) + \frac{i}{2\pi g} \int_0^{2\pi} n(\theta). d\theta = 0 \quad (III-9)$$

$$H(\theta) = -\frac{i}{g} \langle n(\theta) \rangle \quad (III-10)$$

De (III.10) et (III.2) suit

$$H(\theta)g = [n(\theta) - \langle n(\theta) \rangle].i \quad (III-11)$$

Comme $H(\theta).g$ est Fmm par définition, la dernière expression pourrait être écrite comme :

$$Fmm = [n(\theta) - \langle n(\theta) \rangle].i = N(\theta).i \quad (III-12)$$

$$[n(\theta) - \langle n(\theta) \rangle] = N(\theta) \quad (III-13)$$

III.3 Bobine concentrique à pas diamétral

Pour une bobine à pas totale, dans une machine à deux pôles ($p = 1$), pour la (Fig.III.2) la fonction de Fmm est [22] [23]:

$$Na(\theta).i = \begin{cases} \frac{Nn}{2}.i & \frac{\pi}{2} < \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ -\frac{Nn}{2}.i & \text{pour les autres } \theta \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

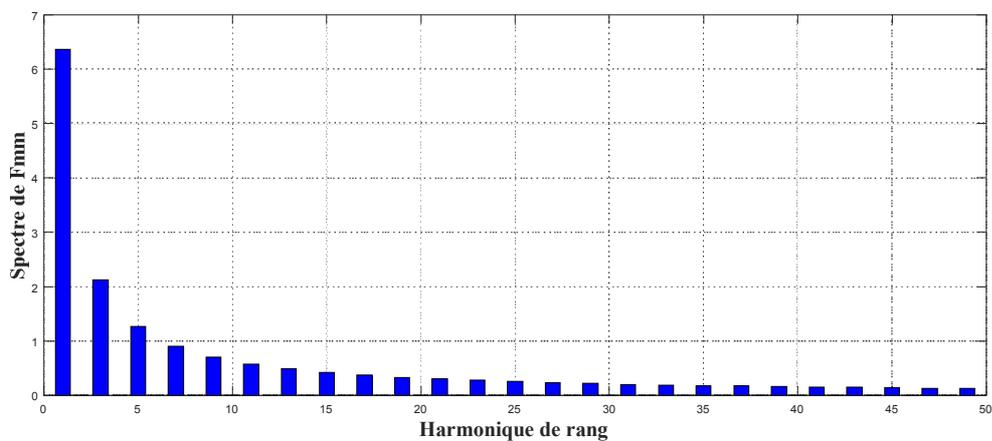
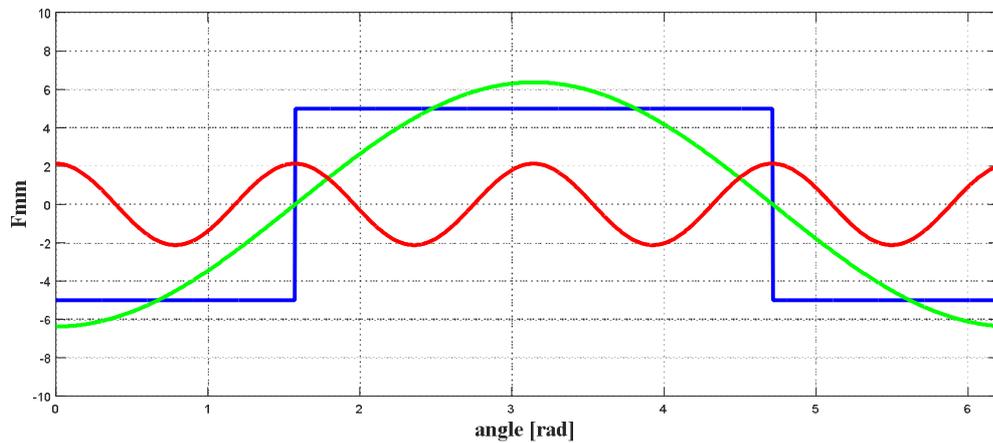
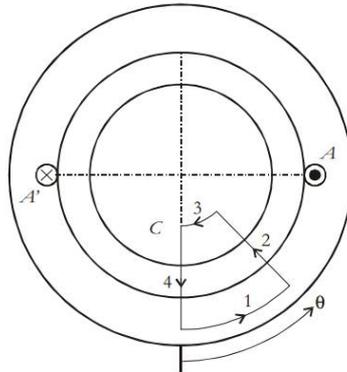


Fig.III.2 Fmm et le spectre d'harmonique pour une machine à ($p = 1$). $Na= 10$ spires
 THD= (47.3050%).

III.3.1 Interprétation des résultats

La Fig.III.2 représente la Fmm ainsi que deux des harmoniques spatiales les plus importantes et son spectre d'harmonique d'une seule bobine avec un pas diamétrale, De toute évidence, L'amplitude de l'harmonique spatiale fondamentale est de 6,37, les harmoniques spatiales plus étranges sont présentes dans le spectre d'harmonique (les impaires harmoniques : 3^{ème}, 5^{ème}, 7^{ème}, 9^{ème}), ils sont la conséquence directe de la forme carré de l'enroulement de phase.

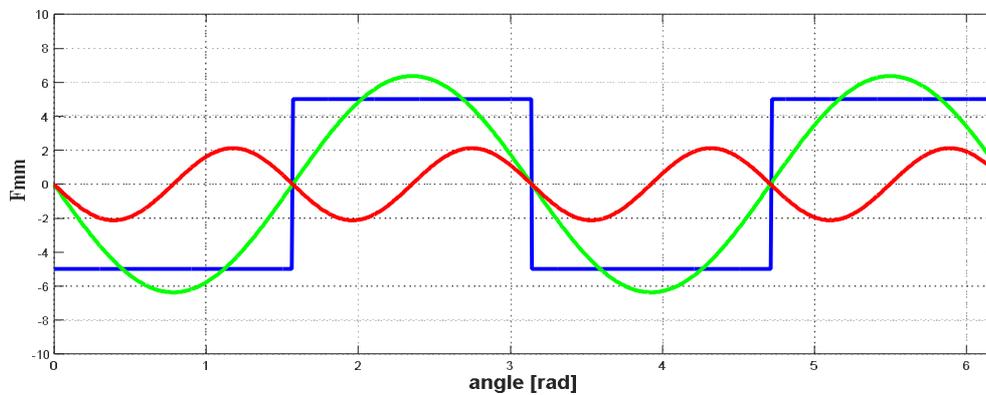
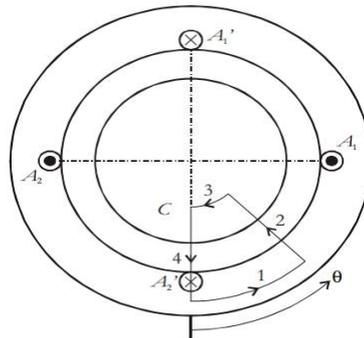
Fmm fondamentale $\frac{4}{\pi}$ supérieure à l'amplitude de la Fmm de forme carré, de sorte que l'amplitude de l'onde Fmm fondamentale est :

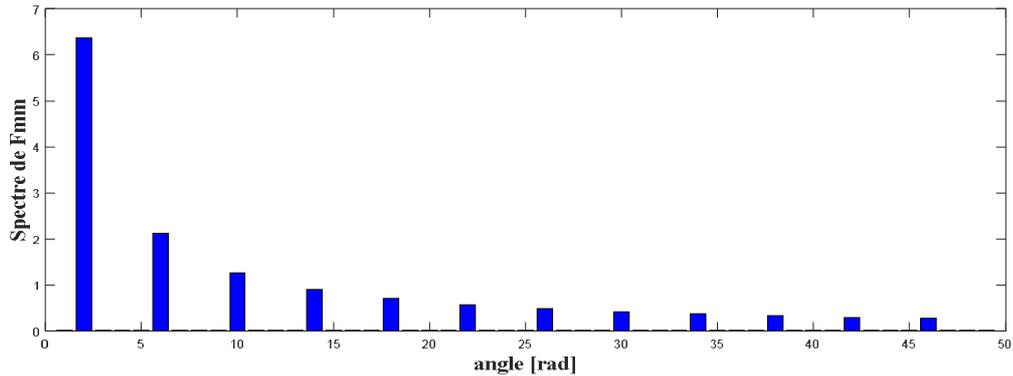
$$FmmA_{max1}(\theta) = \frac{4}{\pi} \frac{Nn}{2} I\sqrt{2} \tag{III-15}$$

$I\sqrt{2}$ est la valeur efficace du courant alternatif. Harmonique spatial supérieur d'ordre v a des temps dev plus petite amplitude que celle fondamentale :

$$FmmA_{maxv}(\theta) = \frac{4}{\pi} \frac{1}{v} \frac{Nn}{2} I\sqrt{2} \tag{III-16}$$

La figure.III.3 montre une machine à quatre pôles, $p = 2$. Deux bobines avec un pas diamétral





**Fig.III.3 Fmm et le spectre d'harmonique pour une machine à (p = 2), Na= 10 spires
THD= (46.1572%).**

III.3.2 Interprétation des résultats

Maintenant le taux d'harmonique est réduit (46.1572%), l'harmonique fondamentale est l'harmonique de deuxième ordre (p), la troisième harmonique est l'harmonique de 5^{ème} ordre (3p), le 7^{ème} ordre (4p)...etc.

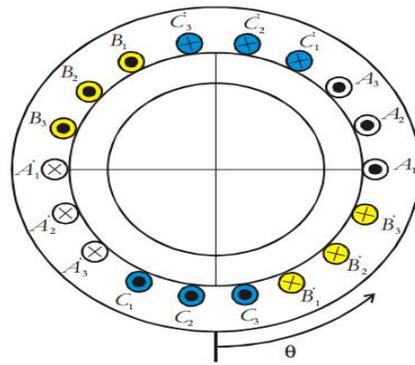
L'amplitude de l'onde fondamentale de Fmm est maintenant :

$$FmmAmax1(\theta) = \frac{4}{\pi} \frac{1}{v} \frac{Nn}{2p} I\sqrt{2} \quad (III-17)$$

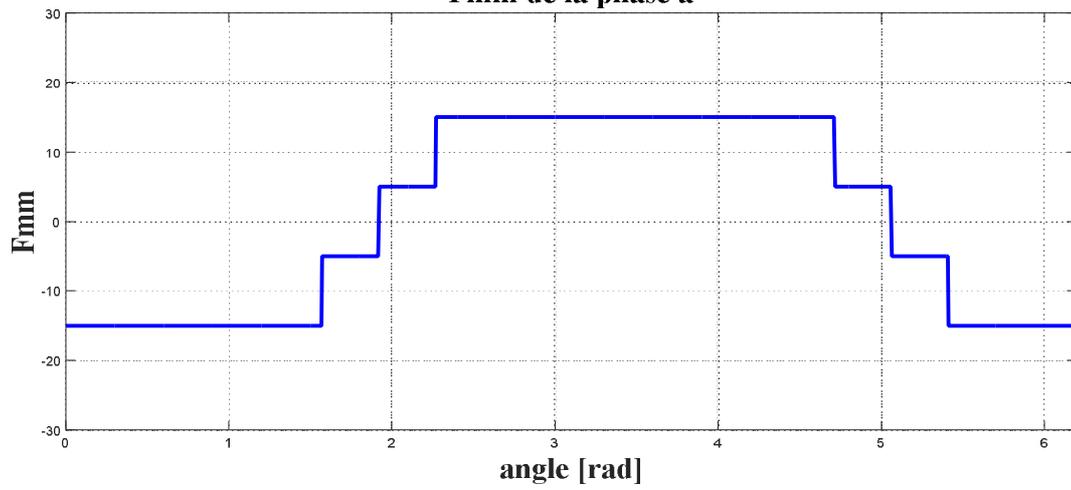
III.4 Enroulement triphasé à une couche avec pas diamétral

L'analyse de Fourier a montré que Fmm produite par une ou plusieurs bobines à pas diamétral constitue une composante harmonique fondamentale ainsi qu'une série d'harmoniques. Dans la conception des enroulements AC, des efforts sérieux sont faits pour distribuer les bobines constituant les enroulements afin de minimiser les composants harmoniques d'ordre supérieur et de produire l'onde Fmm gonflable qui se compose principalement de la composante sinusoïdale fondamentale.

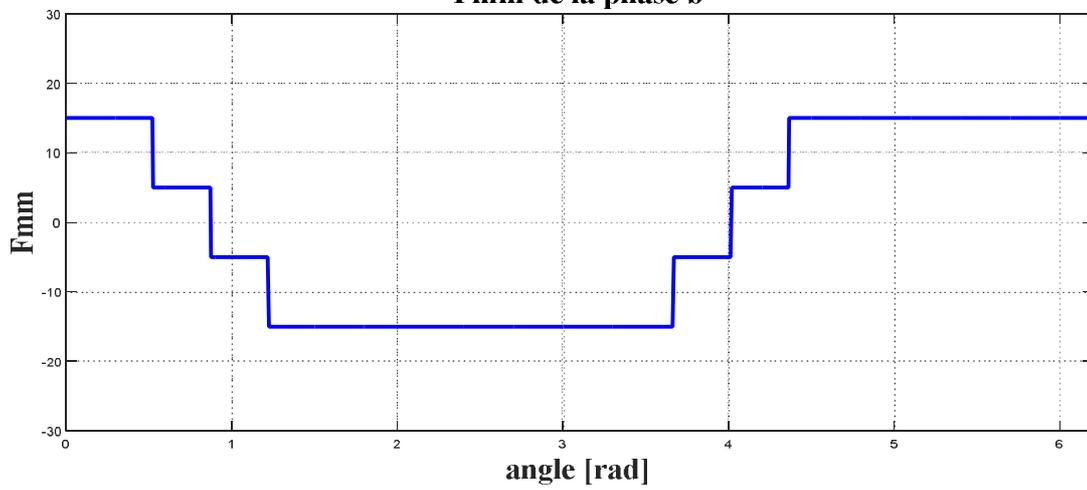
La machine triphasée comporte trois enroulements distribués sur le stator. Les enroulements de phase sont identiques mais ils sont décalés dans l'espace pour des degrés mécaniques de $\frac{2\pi}{3}$, une machine à deux pôles dont le stator à des encoches Z= 18. Cela signifie que l'enroulement d'une phase occupe six encoches, trois sous l'un et trois sous l'autre pole la(Fig.III.4).

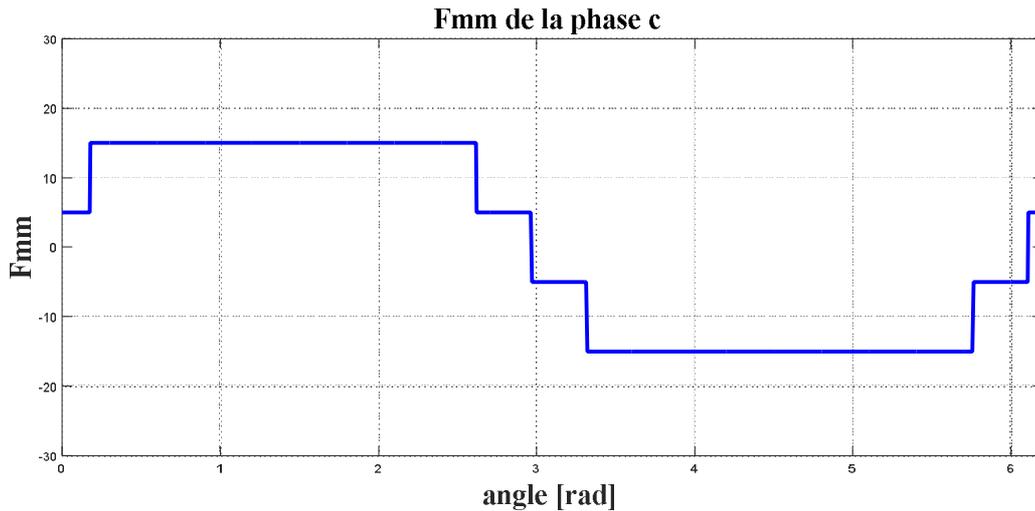


Fmm de la phase a



Fmm de la phase b





**Fig.III.4 Fmm de chaque phase d'une machine (p = 1), Z=18, q=3
Na=30 spires.**

III.4.1 Interprétation des résultats

La fig.III.4 représente Fmm du bobinage à pas diamétral de trois phase a, b et c. Comme il est clair les enroulements de phases sont identiques mais ils sont décalés dans l'espace pour des degrés mécaniques de $\frac{2\pi}{3}$.

Le facteur de distribution d'enroulement K_d définit simplement par :

$$K_{d1} = \frac{F_{mmA_{max1}}}{F_{mmA1A1'_{maxv}} + F_{mmA2A2'_{maxv}} + \dots + F_{mmA_nA_n_{maxv}}} = \frac{F_{mmA_{max1}}}{n \cdot F_{mmb_{max1}}} \quad (III-18)$$

Pour l'harmonique de l'espace fondamental, $v = 1$:

$$K_{d1} = \frac{F_{mmA_{max1}}}{3 \cdot F_{mmbobine_{max1}}} = \frac{18.3344}{3 \cdot 6.3662} = 0.96$$

De même, pour la cinquième harmonique de l'espace, $v = 5$:

$$K_{d5} = \frac{F_{mmA_{max5}}}{3 \cdot F_{mmbobine_{max5}}} = \frac{0.8418}{3 \cdot 1.2731} = 0.22$$

A partir d'autre expression analytique bien connue pour le facteur de distribution :

$$K_{dv} = \frac{\sin(v \cdot q \cdot \frac{\alpha}{2})}{q \sin(v \cdot \frac{\alpha}{2})} = \frac{\sin(v \cdot \frac{\pi}{2m})}{q \sin(v \cdot \frac{\pi}{2mq})} \quad (III - 19)$$

m est le nombre de phases, q est le nombre d'encoches par pôle et par phase et α est un angle électrique, $\alpha = p \cdot \alpha_m = p \cdot \frac{2\pi}{Z}$. Pour l'enroulement de phase analysé :

$$K_{d1} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2 \cdot 3})}{3 \sin(v \cdot \frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 3})} = 0.9598$$

$$K_{d5} = \frac{\sin(5\frac{\pi}{2.3})}{3\sin(5\frac{\pi}{2.3.3})} = 0.2176$$

On constate que la distribution de l'enroulement pour $q=3$ assure une réduction substantielle des harmoniques de Fmm. Pour obtenir l'onde Fmm résultante de la (Fig.III.4), il faut prendre la valeur instantanée des courants de phase. À un instant de temps, disons $t_1= 5ms$ la (Fig.III.5), le courant de phase i_a a une valeur $i_a = 1A$ tandis que d'autres courants sont $i_b = i_c = -0.5A$. L'onde Fmm résultante pourrait être obtenue en multipliant les fonctions d'enroulement de phase par des valeurs instantanées adéquates des courants de phase :

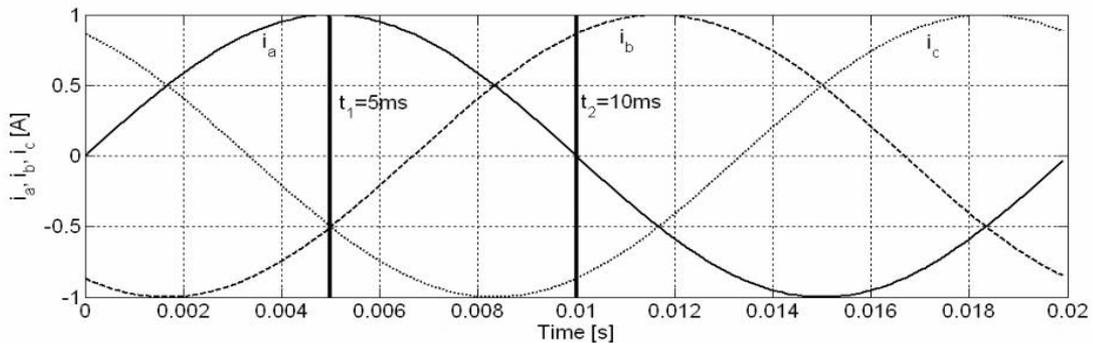


Fig.III.5 Courants triphasés.

$$F_{mmS_t1} = 5ms = N_a \cdot i_a + N_b \cdot i_b + N_c \cdot i_c \quad (III-20)$$

$$F_{mmS_t1} = 5ms = N_a - 0.5 \cdot N_b - 0.5 \cdot N_c \quad (III-21)$$

De même, pour tous les autres instants de temps, $t_2 = 10 ms$:

$$F_{mmS_t2} = 10ms = N_a \cdot i_a + N_b \cdot i_b + N_c \cdot i_c \quad (III-22)$$

$$F_{mmS_t2} = 10ms = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (N_b - N_c) \quad (III-23)$$

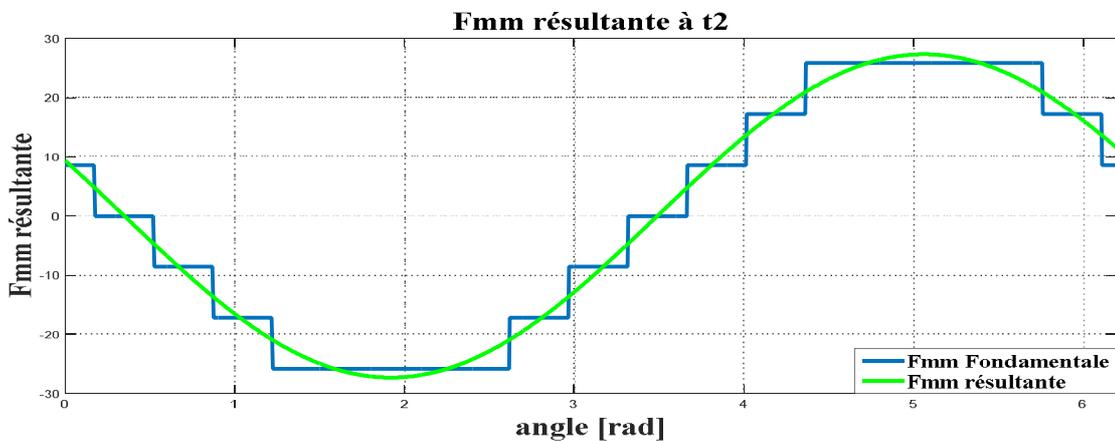
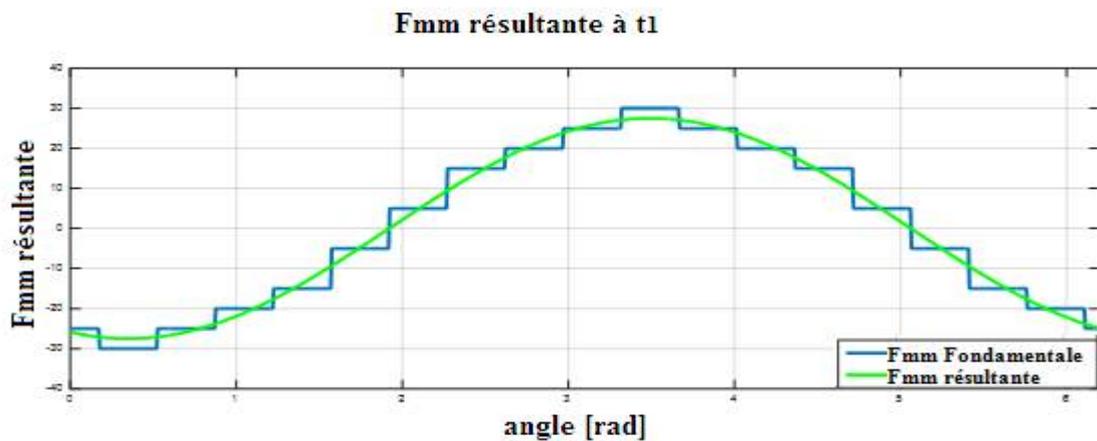
Fmm résultantes à ces deux instants sont représentés sur la Fig.III.6, de toute évidence, les valeurs maximales des Fmm résultantes sont décalées dans l'espace, c'est-à-dire que l'onde Fmm résultante n'est pas répartie dans l'espace, elle est en rotation. La vitesse de rotation peut être facilement trouvée à partir des considérations suivantes : à $t_1 = 5ms$, la valeur maximale du Fmm en rotation est en position décrite par les axes de l'enroulement de phase a, c'est-à-dire $\theta_{t1} = 200^\circ$. À $t_2 = 10 ms$, la valeur maximale du Fmm tournant est à la position $\theta_{t2} = 290^\circ$. La vitesse de Fmm tournante, c'est-à-dire la vitesse synchrone, est :

$$n_s = \frac{\text{angle}}{\text{heur}} = \frac{290^\circ - 200^\circ}{t_2 - t_1} = \frac{90^\circ}{\frac{T}{4} [S]} = \frac{\frac{\pi}{2} [\text{rad}]}{\frac{T}{4} [S]} = \frac{4 \cdot \pi}{2T} = 2\pi f \frac{\text{rad}}{s} = f \frac{2\pi [\text{rad}]}{\frac{1}{60} \text{min}} \quad (III-24)$$

Plus généralement, dans le cas de la machine avec p paires, la vitesse synchrone est p fois plus petite :

$$n_s = \frac{2\pi f \text{ rad}}{p \text{ s}} = \frac{60f \text{ rad}}{p \text{ min}} \quad (\text{III-25})$$

Par conséquent, l'onde Fmm résultante tourne avec une vitesse synchrone, ayant des formes d'ondes différentes dans chaque instant de temps différent. Le spectre d'harmonique de Fmm présentées dans la (Fig.III.6).



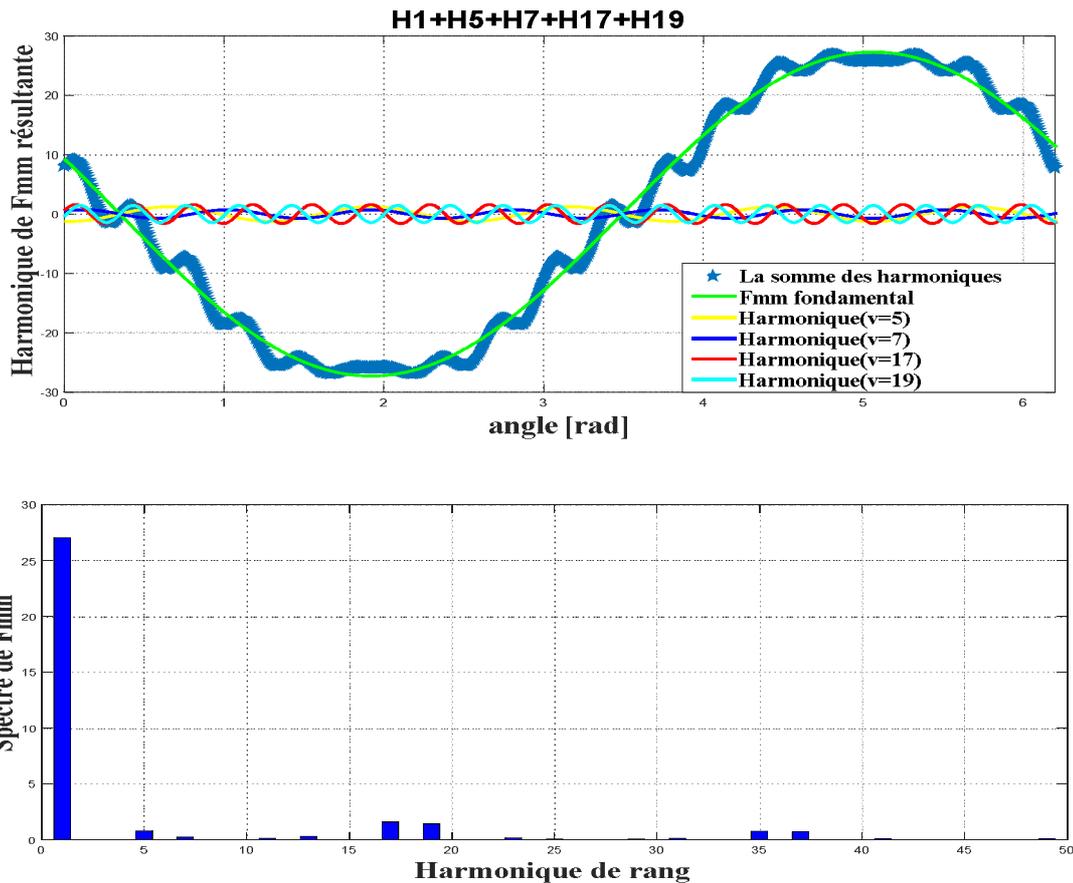


Fig.III.6L l'onde Fmm résultante d'enroulement à une couche et son spectre harmonique ainsi les harmoniques remarquables : $q=3$, $p=1$, $\tau p = 9$, THD=10.7058%

III.4.2 Interprétation des résultats

A partir de la figure, on constate que l'onde Fmm rotative résultante contient des harmonique de l'espace impair à des valeurs prise que négligeable qui est multipliée par trois, les harmoniques spatiales plus remarquables sont les 5^{ème}, 7^{ème} qui sont la conséquence directe de la forme trapézoïdale de la Fmm d'enroulement de phase. Dans le cas analysé, il s'agit des harmoniques spatiales 17^{ème} et 19^{ème}, 35^{ème}, 37^{ème}. Ils sont la conséquence directe de la nature discrète de l'enroulement, c'est-à-dire le placement de conducteur dans les encoches.

La Fmm présente une forme trapézoïdale plus proche de la sinusoïde qu'avant car le nombre d'encoches par pole et par phase sera $q=3$, le taux d'harmonique sera réduit (10.7058%) ainsi que l'amplitude de l'harmonique spatiale fondamentale sera de 27.3048.

On conclue que les harmoniques sont réduites quand le nombre d'encoches par pole et par phase augmente ainsi que l'amplitude de Fmm est augmenté.

L' amplitude de Fmm résultante fondamentale :

$$F_{mmsmaxv} = \frac{m}{2} F_{mmphasemaxv}(\theta) = \frac{m}{2} \frac{1}{\pi v} \frac{NAKdv}{p} I \sqrt{2} \quad (III-26)$$

$$F_{mmsmaxv} = \frac{3}{2} \cdot F_{mmphasemaxv}(\theta) = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi v} \frac{1}{2p} \frac{NAKdv}{2p} I \sqrt{2} = \frac{3}{\pi v} \frac{NAKdv}{p} I \quad (III-27)$$

$$F_{mmsmaxv} = \frac{3}{\pi v} \frac{NAKdv}{p} I \sqrt{2} = \frac{3}{\pi \cdot 1} \frac{1}{1} \frac{30.0.96}{1} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2} = 27.52 \text{ Aspires}$$

Et v est le nombre d'harmoniques spatiales de F_{mm} appartiennent à la série suivante :

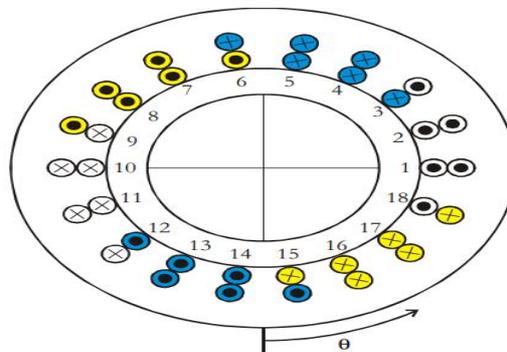
$$v = 6k + 1 \quad (III-28)$$

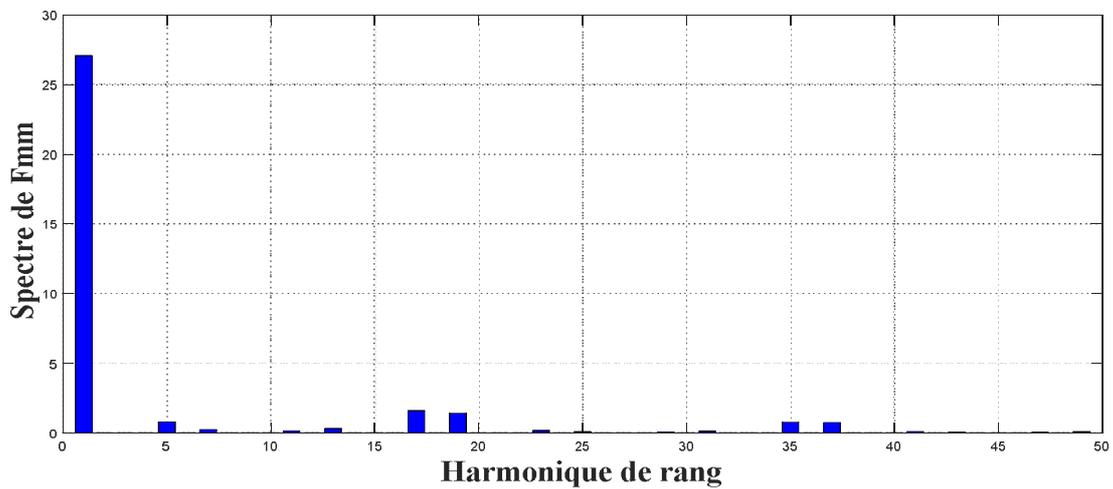
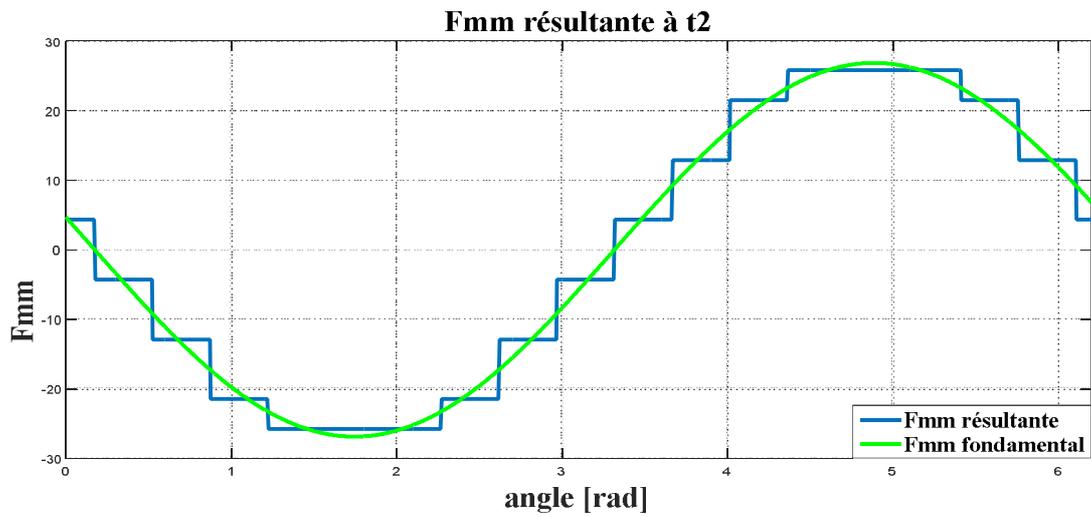
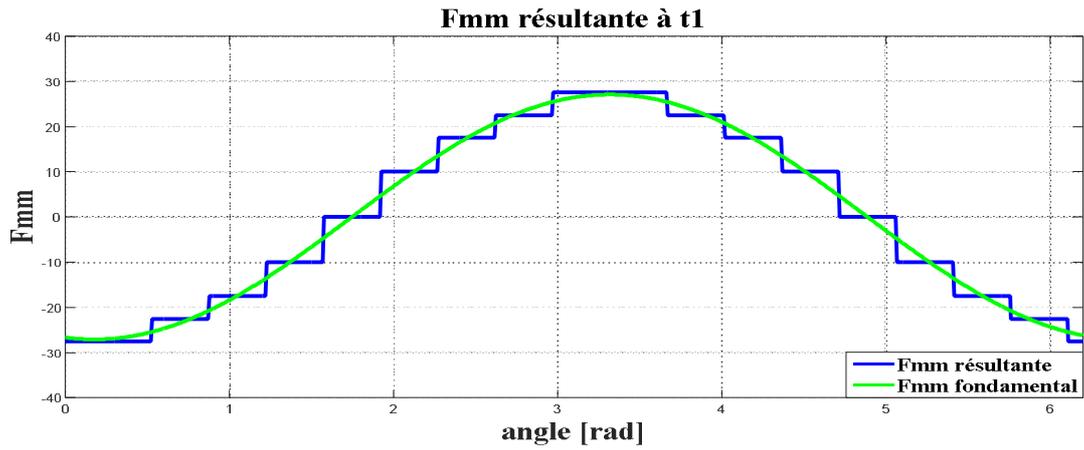
Où $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ De (III.28) suit que l'enroulement symétrique en trois phases fourni par l'alimentation en tension triphasée symétrique contient fondamentale $v = 1$, cinquième $v = 5^{\text{ème}}$, septième $7^{\text{ème}}$, onzième $11^{\text{ème}}$, etc. Le signe négatif signifie une onde F_{mm} tournante inverse.

III.5 Enroulement triphasé à deux couches avec un pas raccourci

Une mesure supplémentaire prise pour améliorer le niveau de la forme d'onde F_{mm} rotative plus proche de la sinusoïde à partir de l'utilisation des bobines à pas raccourci. Cependant, pour utiliser des bobines avec un pas raccourci, l'enroulement de phase du stator doit être placé en deux couches. Certaines des harmoniques spatiales plus élevées dans la forme d'onde F_{mm} rotative résultante pourraient être annulé ou significativement atténué.

Voyons l'exemple suivant : la (Fig.III.7) montre l'enroulement statorique triphasé à double couche. Chaque bobine dans les enroulements de phase est une bobine courte. Le raccourcissement de la bobine est un pas de stator $y=8$. Maintenant, au lieu de trois bobines dans un enroulement, six bobines à pas courtes dans un enroulement de phase. Pour que la comparaison avec le cas analysé précédemment soit possible, chaque bobine doit avoir la moitié du nombre de spires comme précédemment, pour deux instants différents comme L'exemple de l'enroulement à une couche, On dessine la F_{mm} résultante à deux couches avec un pas $y=8$.





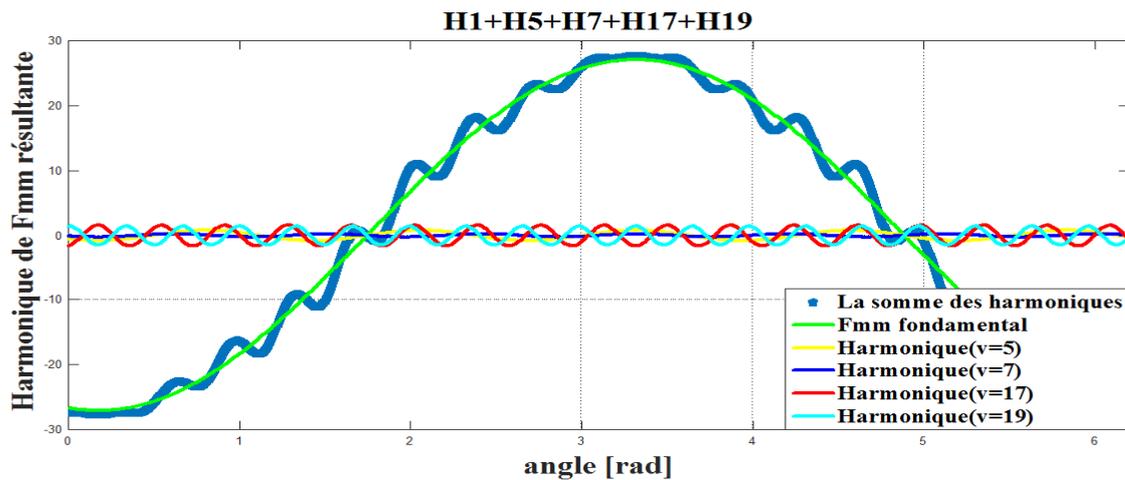


Fig.III.7 L'onde Fmm résultante d'enroulement à deux couches avec un pas de raccourcissement, $q=3$, $p=1$, $\tau_p=9$, $y=8$, THD = 9.4948%.

III.5.1 Interprétation des résultats

Pour l'enroulement à deux couche de phase, on remarque une amélioration à niveau de la forme rotative Fmm résultante à deux temps déferents plus proche de la sinusoïde, On constate que les harmoniques sont un peu est plus petite dans le cas de raccourcissement d'une seule encoche, ils sont diminué mais pas absolument.

Le pas de raccourcissement $y = 8$. Il est évident que, pour tout choix, $5^{\text{ème}}$, $7^{\text{ème}}$ et pour les autres harmoniques ne peuvent pas être éliminés, mais il sera considérablement réduit mais l'amplitude de l'harmonique spatiale fondamentale sera diminuer 27.0784.

On conclut la super position de conducteur dans les encoches avec un pas de raccourcissement augmente la forme de la Fmm proche de sinusoïdale et réduit le THD d'harmonique mais il diminue l'amplitude de Fmm fondamental.

Le raccourcissement de la bobine pourrait être décrit de la manière suivante :

$$K_r = \sin v \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2} \quad (\text{III-29})$$

En prenant en compte le facteur de raccourcissement vient d'être défini, l'amplitude de Fmm en rotation :

$$F_{mmsmaxv} = \frac{3}{\pi} \frac{1}{v} \frac{K_{dv} \cdot K_{rv} N_{ph}}{p} I \sqrt{2} = \frac{3}{\pi} \frac{1}{v} \frac{K_b N_{phase}}{p} I \sqrt{2} \quad (\text{III-30})$$

Ou : $K_b = K_{rv} K_{dv}$

$$F_{mmsmaxv} = 1.35 \frac{N_{eff} I}{p \cdot v} \quad (\text{III-31})$$

$N_{\text{eff}} = K_b \cdot N_{\text{phase}}$ est ainsi appelé nombre de spires efficaces par phase [24]-[27]. La rotation de la forme d'onde pour Fmm en deux instants différents du temps et pour l'enroulement de la (Fig.III.7) Pour un raccourcissement d' une seule encoche de stator, le facteur de raccourcissement est :

$$K_r = \sin .8/9 . \pi/2 = 0.9848$$

Facteur de distribution est comme avant :

$$K_{d1} = 0.96$$

Le nombre de spires efficace :

$$N_{\text{eff}} = 0.96 \cdot 0.9848 \cdot 5.6 = 28.36 \text{ spires}$$

Amplitude Fmm fondamentale pour l'enroulement à deux couches est :

$$F_{\text{mmsmaxv}} = 1.35 \frac{28.36 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)}{1.1} = 27.15 \text{ Aspires}$$

L'amplitude de $F_{\text{mm}_{\text{smaxv}}}$ d'enroulement à deux couches est plus petite que dans le cas d'enroulements à pas totale, à cause du facteur de raccourcissement. Le but d'une bobine à pas court est la réduction du cinquième et 7^{ème} harmoniques d'espace dans l'onde Fmm en rotation. A savoir, pour annuler 5^{ème} harmonique de l'onde Fmm en rotation, la condition suivante doit être satisfaite :

$$K_{r5} = \sin 5 \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2} = 0 \rightarrow 5 \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2} = k\pi \rightarrow y = \frac{2}{5} k \tau_p \quad (\text{III-32})$$

où k est un nombre entier, $k = 0,1,2...$ et k doit être choisi de telle sorte que le pas du raccourcissement y est d'abord plus petit nombre que le pas polaire exprimée en nombre d'encoche du stator. Pour le bobinage analysé, $\tau_p = 9$, de sorte que les solutions raisonnable pour y vaut pour $k=2$

$$y = \frac{2}{5} \cdot k \cdot 9 \xrightarrow{k=2} \frac{36}{5} = 7.2$$

Le pas de bobinage doit être un nombre entier, les solutions possibles sont $y = 7$ ou $y = 8$. Il est évident que, pour tout choix, 5^{ème} harmonique ne peut pas être éliminé, mais pour $y = 7$, il sera considérablement réduit. De même, pour annulant harmonique 7^{ème} de l'espace, la condition suivante doit être satisfaite :

$$K_{r7} = \sin 7 \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2} = 0 \rightarrow 7 \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2} = k\pi \rightarrow y = \frac{2}{7} k \tau_p \quad (\text{III-33})$$

$$y = \frac{2}{7} \cdot k \cdot 9 \xrightarrow{k=3} \frac{54}{7} = 7.71$$

Encore une fois, y pourrait être 7 ou 8, l'harmonique 7^{ème} spatiale pourrait être atténuée que 5^{ème}, en particulier pour $y = 8$, mais pas tout à fait éliminé. Si les bobines sont

choisies avec pas des encoches du stator 7, cinquième harmonique sera beaucoup plus atténuée que le 7^{ème}. Inversement, si les bobines sont choisies avec pas d'encoche du stator 8, 7^{ème} harmonique sera beaucoup plus atténuée que le 5^{ème}. Dans l'étude de cas analysés, des bobines avec $y=8$.

La hauteur est utilisés (un raccourcissement du pas des encoches du stator), de sorte septième harmonique spatiale sera beaucoup plus atténué que 5^{ème}, comme on pouvait facilement conclure par comparaison du spectre d'harmonique d'ondes Fmm sur les (Fig.III.6) et (Fig.III.7).

Les figures.III.5 et III.7, il doit être observé que le raccourcissement des bobines réduit l'intensité des harmoniques mais pas absolument, quelle que soit le niveau de le Fmm (la forme de Fmm) [4].

Après cette étude. On a traité une introduction sur les éléments de base de bobinage comme la Fmm résultante et son spectre d'harmonique, le facteur de distribution, facteur de raccourcissement, le coefficient de bobinage et la vitesse synchrone... Cette approche pourrait être facilement mise en place pour l'analyse d'un autre type de d'enroulement.

III.6 Analyse spectrale de nouveau type d'enroulements du moteur asynchrone à cage

Moteurs triphasés asynchrones à cage (Moteurs à induction) sont souvent utilisés dans des applications industrielles en raison de leur faible coût, fabrication relativement simple et une construction robuste, le choix de moteur dépend de différents facteurs: la technologie du producteur (pureté du matériel d'écureuil), la qualité des roulements, la qualité du laminage, matériaux, construction de logements (pertes supplémentaires) et type d'enroulement qui est inséré dans les encoches du stator. Par conséquent, on a étudié trois types d'enroulements différents du moteur à induction qui sont présentée dans ce chapitre. Ces différents types d'enroulements sont : Enroulement concentrique à une seule couche, Enroulement concentrique à double couches et enroulement concentrique à une deux_couches. L'enroulement concentrique avec une seule couche est présenté à la (Fig.III.8). Ce type de l'enroulement est approprié pour l'insertion de machines mais est rarement utilisé dans l'industrie parce que la masse de cuivre est importante pour ce type de bobinage. Le type d'enroulement le plus utilisé pour l'induction de taille moyenne des moteurs est l'enroulement à double couches avec un pas de raccourcissement de bobinage, il présenté dans la (Fig.III.9). L'avantage de l'enroulement est une masse plus petite de cuivre à cause des têtes d'enroulement les plus courtes. Un type spécial d'enroulement qui est partiellement en

couches simples et partiellement double couche (Fig.III.10). Son avantages sont une masse plus petite d'insertion de cuivre à cause des têtes d'enroulement les plus courtes et aussi les harmoniques supérieures dans Fmm sont réduit.

III.7 Description du moteur à induction utilisé

Le moteur est un moteur à induction (cage d'écuréuil) à quatre pôles couplé au triangle avec 36 encoches la machines à 28 bars dans le rotor. Les données nominales utilisées dans le moteur sont présenté en (Tab.III.1).

U (V)	I (A)	P (W)	n (tr/min)	Cos ρ	η	f (Hz)
400	8	4000	1430	>0,8	>0,8	50

Tab.III.1 Données nominales orientées du prototype du moteur à induction [14].

III.8 Calcul des paramètres d'enroulements

Les résultats des paramètres d'enroulements sont calculer pour tous les types d'enroulement sont présentés dans le tableau.III.2.Le calcul des paramètres d'enroulement commence par le calcul de nombre d'encoche du stator par pôle q_p :

$$q_p = \frac{q}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \quad (\text{III.34.1})$$

Pour la conception de l'enroulement également le nombre d'encoche de stator par pôle et par phase est nécessaire :

$$q = \frac{q}{2p_m} = \frac{36}{4.3} = 3 \quad (\text{III.34.2})$$

α : angle mécanique entre les encoches de stator peut être facilement calculée par

$$\alpha_m = \frac{360^\circ}{q} = 10^\circ (\text{III.35})$$

Et aussi l'angle électrique compte tenu du nombre de p paires de pôle par :

$$\alpha = p \frac{360^\circ}{q} = 2 \frac{360^\circ}{3} = 20^\circ \quad (\text{III.36})$$

Supposons que la tension induite E soit environ 96% de la tension nominale, le nombre de spires N par phase peut être calculé :

$$N = \frac{E.a}{4.44.f.\Phi_{1.fw}} = 288 \text{spires} \quad (\text{III.37})$$

f est la fréquence d'approvisionnement, kb le facteur de bobinage et a le nombre de branches parallèles dans l'enroulement. Le nombre de conducteurs par phase Z :

$$z = 2 \cdot N = 2 \cdot 288 = 576 \text{ spires} \quad (\text{III.38})$$

Le nombre de conducteurs par encoche Z_u peut être déterminé Par (III.39) compte tenu du nombre de phases m [28] :

$$z_u = \frac{m \cdot z}{Z} = \frac{2 \cdot 288}{36} = 16 \text{ conducteurs} \quad (\text{III.39})$$

On peut calculer le taux d'harmonique comme suit :

Pour l'enroulement avec une seule couche :

$$\text{THD}(\%) = \text{Distorsion totale} = 100 * \frac{\text{valeur efficace de l'ensemble des harmoniques}}{\text{valeur efficace du fondamental}} \quad (\text{III.40})$$

$$\text{THD}(\%) = 9.8106$$

On peut définir le coefficient de bobinage par :

$$K_{bv} = K_{dv} \cdot K_{rv} \quad (\text{III.41})$$

La première couche :

$$K_{b1} = 0.9598 \cdot 1 = 0.9598$$

Le pas relatif c'est le rapport de pas d'enroulement sur le pas polaire et facilement calculer pour l'enroulement à une couche :

$$\beta = \frac{y}{\tau_p} = \frac{9}{9} = 1$$

Le pas relatif de la deuxième couche :

$$\beta = \frac{y}{\tau_p} = \frac{7}{9} = 0.77$$

Le dernier est calculer pour l'enroulement à une_ deux couche :

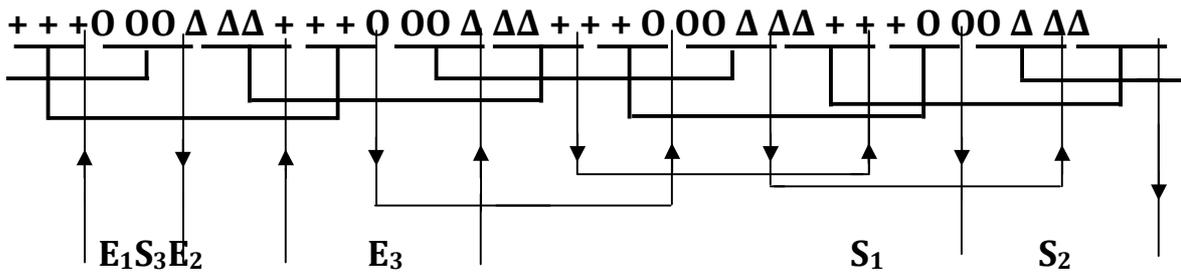
$$\beta = \frac{y}{\tau_p} = \frac{8}{9} = 0.88$$

L'amplitude de F_{mm} fondamentale pour l'enroulement à une couche :

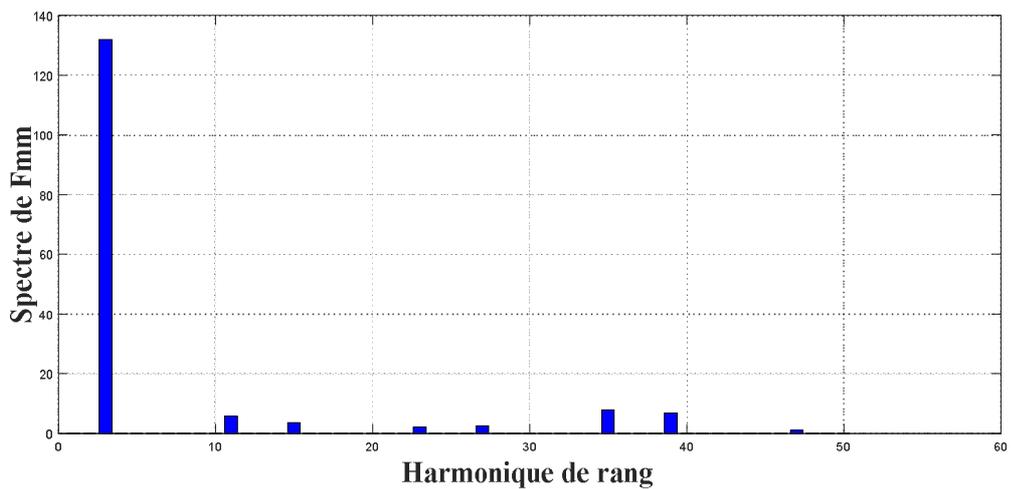
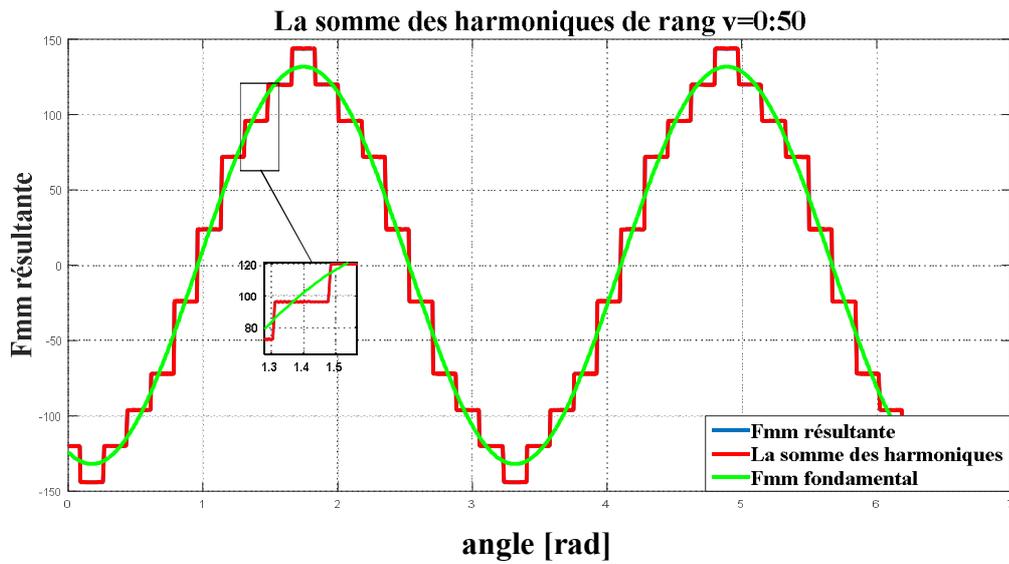
$$F_{mms_{max1}} = \frac{K_b N_{phase}}{p} I \sqrt{2} = 131.9356$$

III.9 Enroulement à une couche

Quand il n'y pas de raccourcissement de pas, l'enroulement est dit à une couche. Tous les conducteurs de l'encoche appartiennent à la même bobine ou section suivant le mode de bobinage, On demande de concevoir un enroulement avec couches, voir l'annexe A, la figure (III.8) représente l'enroulement à une couche :



III.9.1 Les résultats



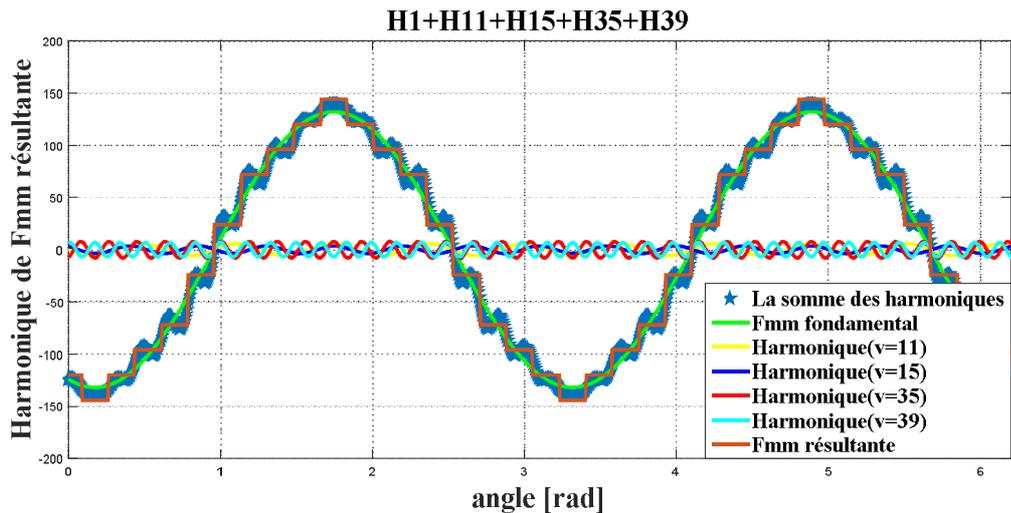


Fig.III.8 Enroulement à une couche $Z=36$, $q=3$, $m=3$, $p=2$, $\tau_p = 9$, $THD=9.8106\%$ et son spectre d'harmonique ainsi les harmoniques superieurs.

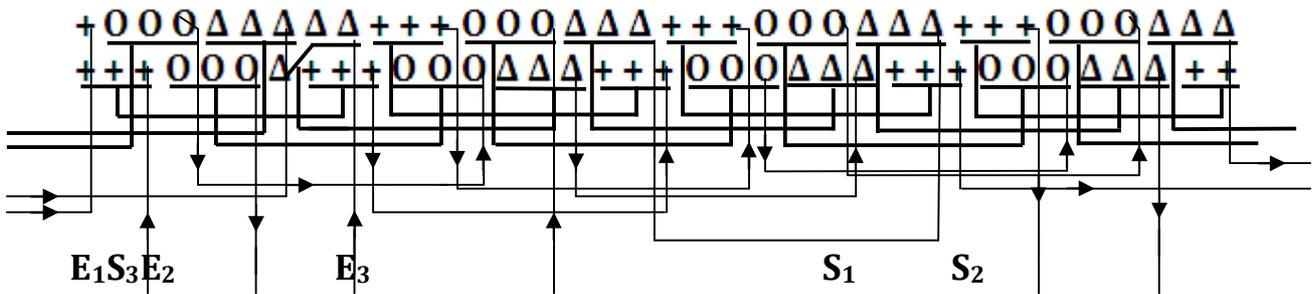
III.9.2 Interprétation des résultats

La Fig.III.8 représente la Fmm d'enroulement à une couche triphasé à $q=3$ par pôle et par phase avec une ouverture des spires $\tau_p = 9$ et son spectre d'harmonique, De toute évidence, la distribution spatiale de Fmm résultante dans l'entrefer est périodique selon un courbe en créneaux, L'onde de Fmm résultante des trois onde pulsâtes dont l'amplitude varies avec la valeur instantané des courants I_a, I_b et I_c , elle conserve une amplitude constante par ailleurs que l'axe de l'onde Fmm défini par son maximum coïncide avec l'axe d'une phase quand le courant est maximal dans cette phase, La Fmm déplace à une vitesse $v=2\tau_p f$ correspondant à vitesse angulaire $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ dite de synchronisme.

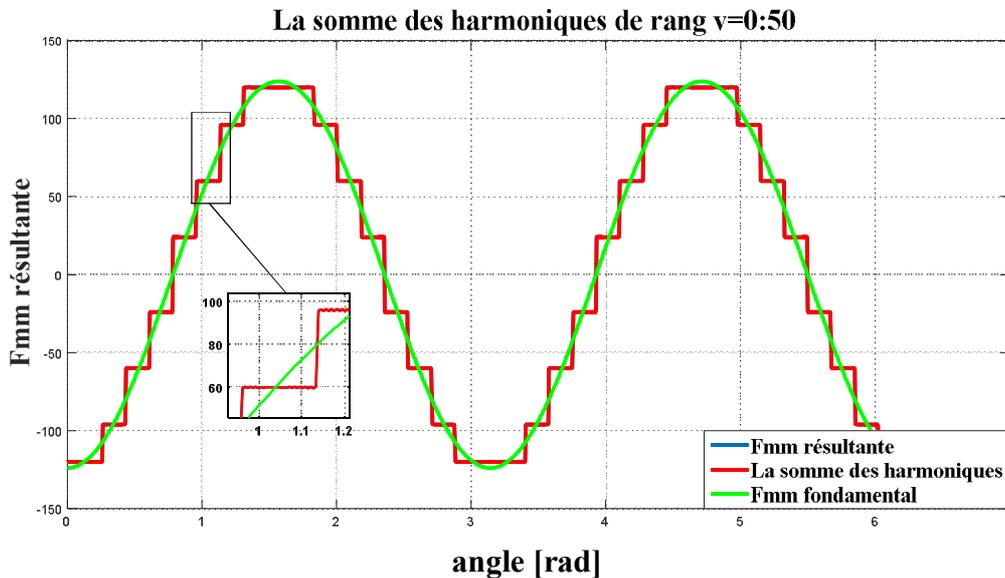
Le résultat met en évidence que la décomposition de Fourier d'un signale sinusoïdale est la somme de signale fondamentale et les autre harmonique qui apparaitre suivre le signale résultant. A partir de spectre d'harmonique l'amplitude de l'harmonique spatiale fondamentale est de 131.98. Les harmoniques de rang paires sont disparaissent dans l'onde de Fmm résultante et le continue sous harmonique est négligeable. On remarque que les harmonique $v=5$ et $v=7$ sont négligeable. Les harmoniques spatiales plus étranges sont présentes dans le spectre d'harmonique les impaires harmoniques : ($11^{\text{ème}}$, $15^{\text{ème}}$, $35^{\text{ème}}$, $39^{\text{ème}}$) qui sont suivre avec des ondulations la Fmm fondamentale, ils sont la conséquence directe de la déformation de Fmm résultante.

III.10 Enroulement à deux couches

L'enroulement est à deux couches (Fig.III.9). Chaque encoche contient deux paquets de conducteurs appartenant à deux sections différentes qui peuvent être de la même phase ou non. Cela conduit à renforcer l'isolement entre les deux sections présentes dans la même encoche. L'enroulement à deux couches ou encore deux faisceaux par encoche n'est utilisés qu'avec des sections, On demande de concevoir un enroulement à deux couches, voir l'annexe A.



III.10.1 Les résultats



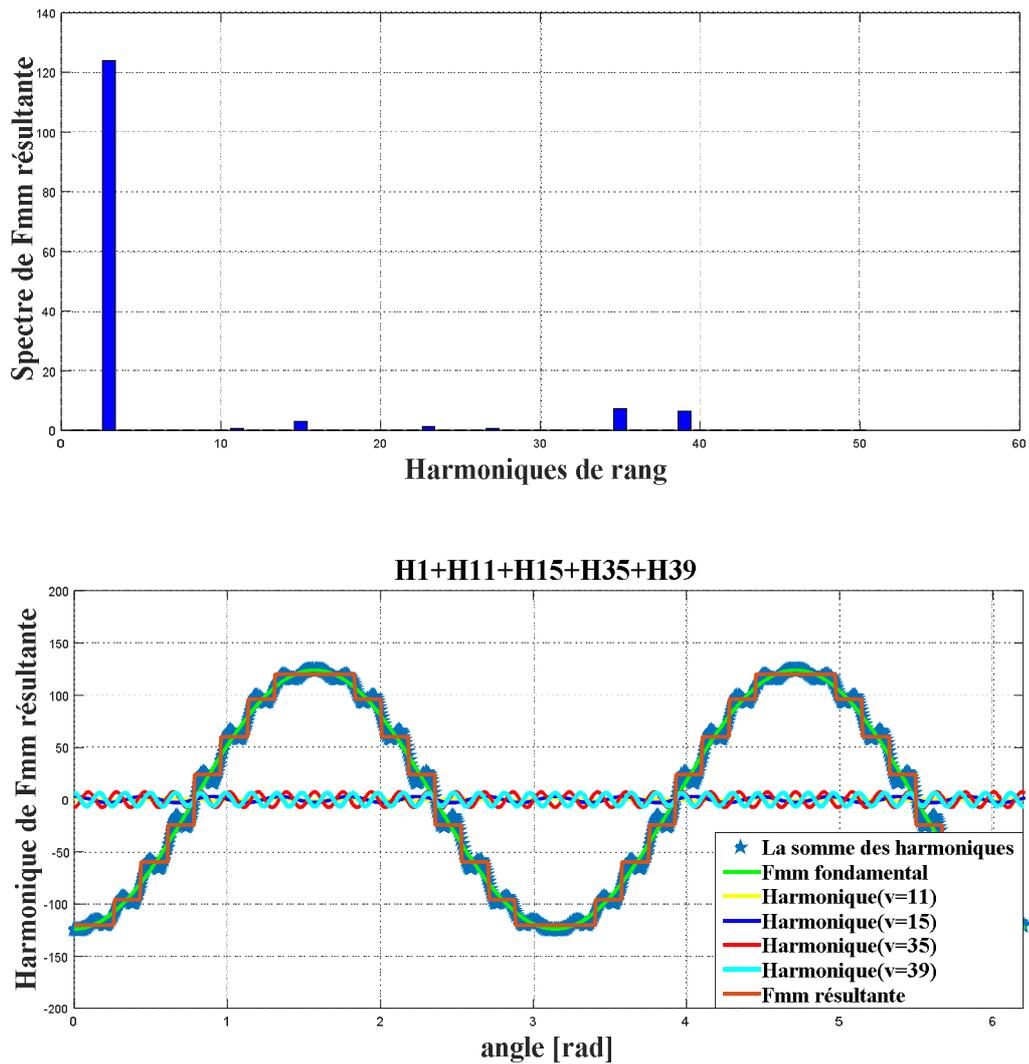


Fig.III.9 Enroulement avec deux couches $Z=36$, $q=3$, $m=3$, $p=2$, $\tau_p = 9$, $y=7$, $THD=8.3769\%$ et spectre harmoniques ainsi les harmoniques remarquables.

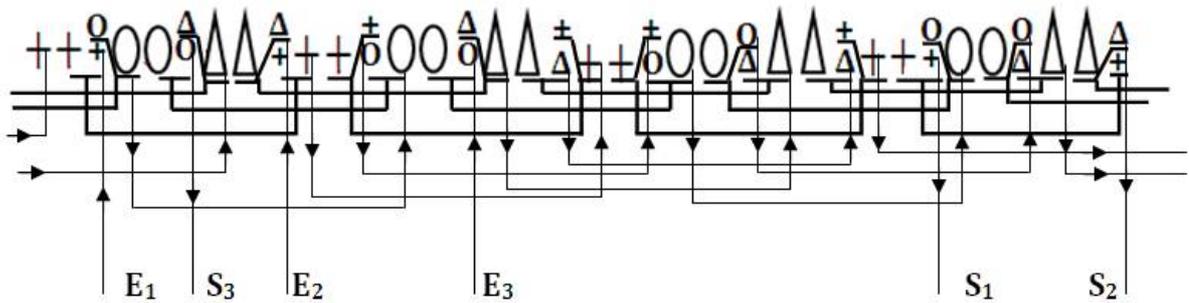
III.10.2 Interprétation des résultats

La figure (III.9) est représenté la courbe de Fmm d'un enroulement à deux couches avec un pas raccourci et son spectre d'harmonique, on traite les harmoniques d'enroulement à deux couches à pas raccourci $y=7$, on constate que la distribution d'enroulement avec un raccourcissement du pas influe sur la forme de la courbe de Fmm résultante en lui donnant une forme proche d'une sinusoïdale mais son amplitude plus réduit que l'enroulement précédent à cause du raccourcissement d'enroulement. On constate que la distribution de l'enroulement assure une réduction substantielle des harmoniques $K_{r1}=0.94$, $K_{r5}=0.174$, $K_{r7}=0.1907$. Le raccourcissement du pas permet d'éliminer complètement l'harmonique de rang $v=5$ et

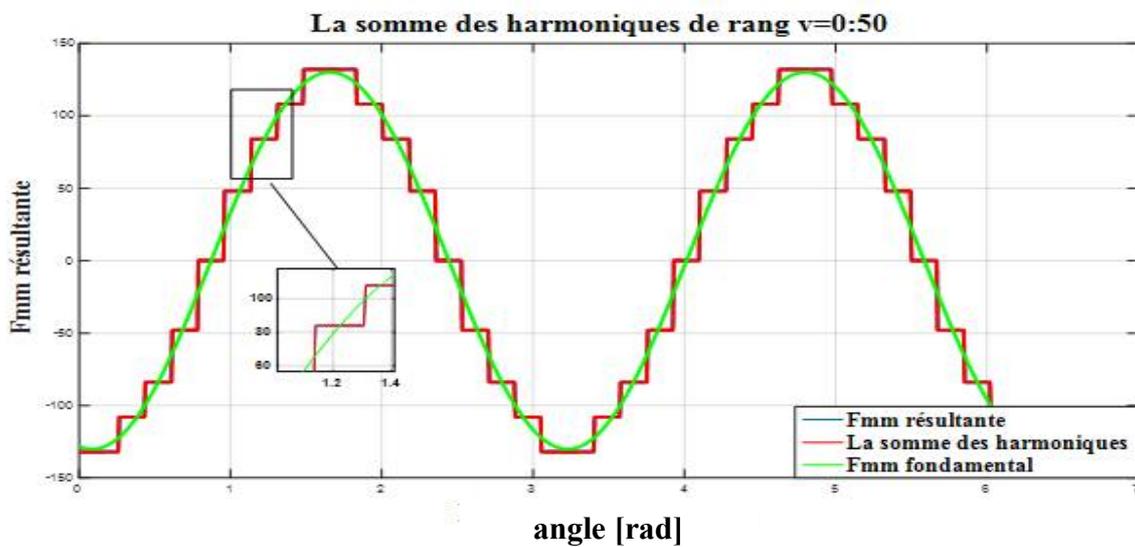
$v=7$ par rapport leurs valeurs avec un pas diamétral et les autres harmoniques diminuent considérablement, cependant le fondamental de Fmm est très atténué et leurs palier est plein.

III.11 Enroulement à une_ deux couches

L'enroulement à une_ deux couche est un enroulement hybride qui est constitué partiellement enroulement à une couche et partiellement deux couches qui est apparaitre dans la figure suivante, On demande de concevoir un enroulement à deux couches, voir l'annexe a.



III.11.1 Les résultats



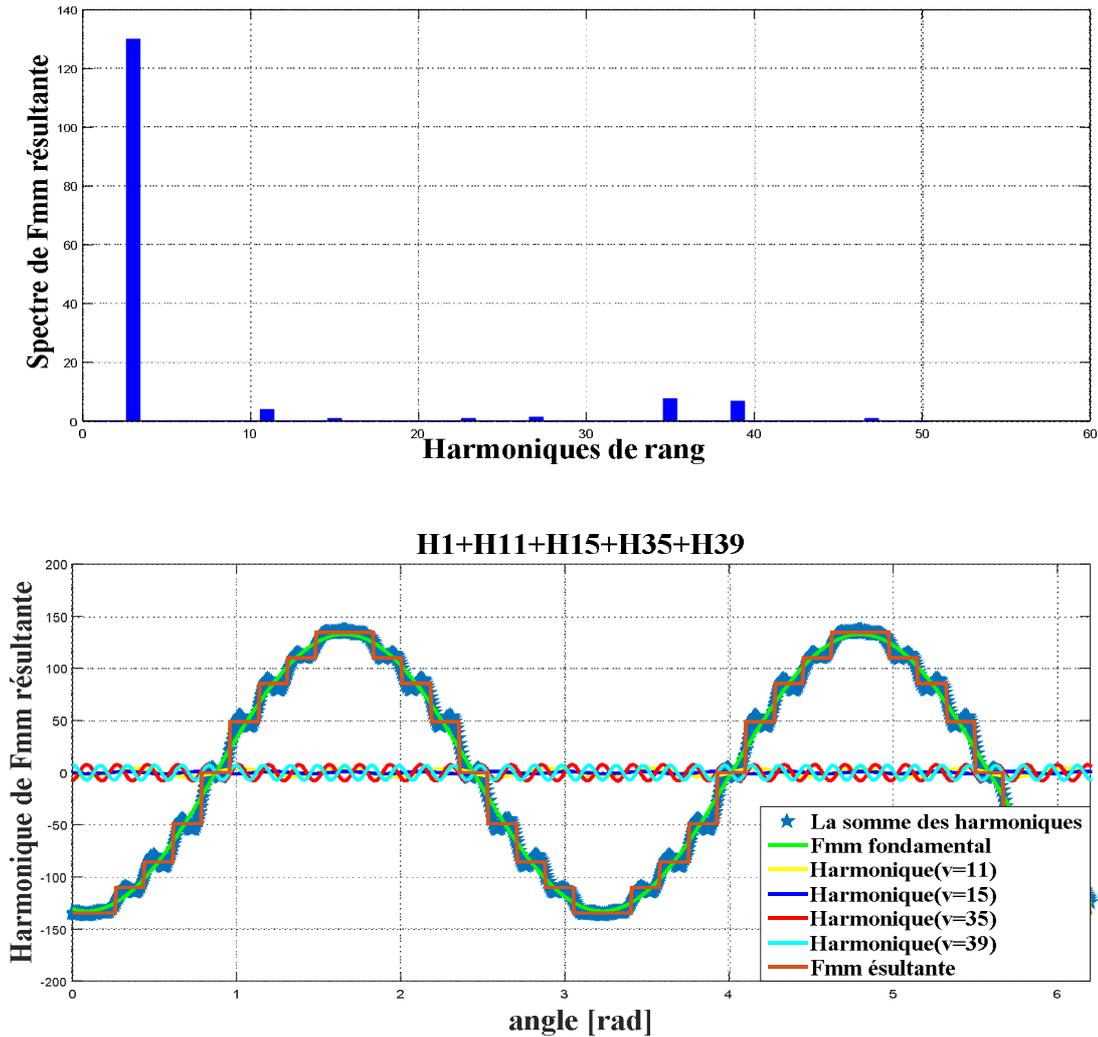


Fig.III.9 Enroulement une_deux couches $Z=36$, $q=3$, $m=3$, $p=2$, $\tau_p = 9$, $y=8$, $THD=8.64079\%$.
et son spectre d'harmonique ainsi les harmoniques remarquables

III.11.2 Interprétation des résultats

L'enroulement à nouveau type hybride (une et deux couches), la fonction Fmm varie sinusoïdalement et prend des valeurs positives et négatives. Fmm représente toujours une onde résultante de trois ondes pulsantes fixe par rapport aux enroulements qui crée. A partir de la figure(III.11) l'apport des harmoniques reste toujours assez faibles mais leurs présences déforme la forme d'onde de Fmm et pour pouvoir comparer l'influence du type d'enroulement du circuit magnétique sur la valeur relative d'harmonique supérieure, le pas relatif de chaque enroulement : une couche, deux couches et une_deux couches successivement : $\beta=1$, $\beta=7/9$, $\beta=8/9$, on voit d'après les résultats pour le pas $\beta=0.88$ plus avantageux car l'enroulement à une_deux couches a des amplitudes des palier de Fmm sont proportionnelles aux nombre de spires des bobines (créé la Fmm en trait pointillé) et leur

amplitude est acceptable 130.03 par rapport l'enroulement avec deux couche qui est une valeur atténué 123.97.

III.12 La comparaison entre les trois types d'enroulement

Type d'enroulement	Pas d'enroulement	N (spires)	Z (conducteurs)	Zu (conducteurs)	Kb	THD(%)	Amplitude de Fmm fondamental
Unecouche	9	576	288	48	0,9598	9.8106	131.93
Deux couches	7	576	288	24/24	0,9019	8.3769	123.97
Une_deux couches	8	576	288	24/48	0,9460	8.6408	130.03

Tab.III.3 La comparaison entre les différents types d'enroulements.

III.12.1 Interprétation des résultats

- On voit d'après les résultats pour le pas d'enroulement $\tau_p = 9$ plus avantageux de part du coefficient de bobinage proche de « 1 », Cependant d'autre part le taux d'harmonique est élevé.
- L'enroulement avec une couche a d'amplitude Fmm fondamentale considérable 131.93.
- Le seconde type le fondamental de Fmm est très atténué, mais le point positive de l'enroulement à double couche est le taux d'harmonique est plus réduit.
- Il est possible de réaliser un compromis entre le premier type et le deuxième qui permet d'obtenir des résultats acceptables.

III.13 Conclusion

Dans ce chapitre, on traite une analyse spectrale de trois types d'enroulements de stator : enroulement concentrique à une seule couche, enroulement concentrique avec double couche et l'enroulement concentrique à une_deux couches, on conclut les point suivants :

- Plus la Fmm par phase sera proche d'une sinusoïdale plus la Fmm créée par trois phases sera également.
- La distribution de l'enroulement pour $q=3$ assure une réduction substantielle des harmoniques de Fmm $K_{d1}=0.9598$, $K_{d5}=0.2176$.

- Le raccourcissement des bobines réduit l'intensité des harmoniques mais pas absolument, quelle que soit le niveau de le Fmm (la forme de Fmm).
- Il faut choisi un pas relatif proche de valeur « 1 » pour maximiser la Fmm fondamentale pour une forme sinusoïdale et assurer une réduction le THD.
- Les amplitudes des paliers de Fmm sont proportionnelles aux nombres de spires des bobines.
- Dans un enroulement à une couche par pole conséquent, le nombre de groupes de bobines dans une phase égale à p.
- On remarque que lors de la conception de l'enroulement, le pas de l'enroulement n'est pas nécessaire. Cela est dû à l'utilisation de l'étoile des phases.
- Un nombre d'étapes important pour le placement de tous les groupes formant l'enroulement avec deux couches, théoriquement il est de $6p$, contrairement à l'enroulement à une couche où celui-ci est de 3, la nécessité de placer $6p$ (τ -y) isolants entre les faisceaux d'une même encoche appartenant à différentes phases.
- La condition de l'enroulement à une_deux couches est l'existence des groupes des bobines concentriques et le nombre d'encoches par pôle et par phase $q > 2$.
- L'inconvénient principal est les méthodes de placement d'enroulement à deux couches et une_deux est caractérisé par la distribution non uniforme des faisceaux en haut et en bas des encoches, ce qui rend difficile la réalisation des branches parallèles. Généralement ces méthodes sont utilisées dans les ateliers de réparation. Les méthodes asymétriques existantes entraînent une différence de courants entre les phases et les branches parallèles à cause du flux de fuite qui croit avec le raccourcissement du pas d'enroulement.
- L'avantage principal de l'enroulement à une_deux la possibilité de réaliser une économie de cuivre obtenue grâce un pas raccourci réduit d'une demi encoche par rapport à celui à deux couches, l'utilisation de l'enroulement à 1-2 couches placé automatiquement est fortement recommandée.
- D'après les résultats présentés il est évident que le dernier type d'enroulement possède des caractéristiques compromis entre l'enroulement à une couche et deux couche mais chaque enroulement est avantager dans l'industrie suivant le cahier de charge et l'application industrielle.

Conclusion générale

Dans cette étude, on a recensé trois types de bobinage alternatif de machine asynchrone triphasé, Les machines asynchrone triphasée à courant alternatif sont constituées différent types d'un bobinage statorique. L'étude de ces enroulements montre qu'un bobinage réparti avec ou sans raccourcissement de pas permet d'obtenir des ondes de Fmm trapézoïdale dans l'entrefer à cause l'ouverture d'encoche et le contenu harmonique. Cette étude est comparative entre l'enroulement avec une couche pour un nombre de conducteur constant au niveau des encoches et double couche, le nombre de conducteur est repartie en deux en haut et en bas ainsi le dernier structure est hybride (une_ deux couche), chaque type d'enroulement du moteur asynchrone sont caractérisé des avantages et inconvénients. Pour comprendre l'intérêt des différents enroulements, on peut connaître la création du champ tournant (Fmm) dans différents enroulements et le détail des harmoniques d'espace qui sont mis en lumière. La première structure possédant trois bobines par pôle et par phase uniformément réparties permet d'obtenir 96% du fondamental de Fmm par contre le continue harmonique est augmenter, le nombre d'encoche est doublé au cas de deux couches qui permet réduit le continue d'harmonique mais il permet d'obtenir une Fmm fondamental atténué, L'étude des différents bobinages pour maximisant le fondamental de Fmm et réduit le continue harmonique. Il est possible de réaliser un compromis entre le premier type et le deuxième, La structure hybride crée une Fmm dont le contenu harmonique est proche de double couche et une amplitude de Fmm proche que le stator à pas diamétral à une encoche par pôle et par phase à volume de conducteurs identique.

L'analyse spectrale de trois types d'enroulements de stator : enroulement concentrique à une seule couche, enroulement concentrique avec double couche et l'enroulement concentrique à une_ deux couche, En comparant les résultats sont obtenus montre :

- Plus la Fmm par phase sera proche d'une sinusoïdale plus la Fmm créée par trois phases sera également.
- La distribution de l'enroulement pour $q=3$ assure une réduction substantielle des harmoniques de Fmm $K_{d1}=0.9598$, $K_{d5}=0.2176$...etc.
- Le raccourcissement des bobines réduit l'intensité des harmoniques mais pas absolument, quelle que soit le niveau de le Fmm (la forme de Fmm).
- Il faut choisi un pas relatif proche de valeur « 1 » pour maximiser la Fmm fondamentale pour une forme sinusoïdale et assurer une réduction du THD.
- Les amplitudes des paliers de Fmm sont proportionnelles aux nombres de spires des bobines.

- Dans un enroulement à une couche par pôle conséquent, le nombre de groupes de bobines dans une phase égale à p .
- On remarque que lors de la conception de l'enroulement, le pas de l'enroulement n'est pas nécessaire. Cela est dû à l'utilisation de l'étoile des phases.
- Un nombre d'étapes important pour le placement de tous les groupes formant l'enroulement avec deux couches, théoriquement il est de $6p$, contrairement à l'enroulement à une couche où celui-ci est de 3, la nécessité de placer $6p$ (τ -y) isolants entre les faisceaux d'une même encoche appartenant à différentes phases.
- La condition de l'enroulement à une_deux couches est l'existence des groupes des bobines concentriques et le nombre d'encoches par pôle et par phase $q > 2$.
- L'avantage de l'enroulement à deux couches était possible d'éliminer les harmoniques d'espace (H_5 ou H_7). Cependant, le fondamental de Fmm de ce structure est très réduit par rapport à celui des autres structures.
- L'inconvénient principal est les méthodes de placement d'enroulement à deux couches et une_deux est caractérisé par la distribution non uniforme des faisceaux en haut et en bas des encoches, ce qui rend difficile la réalisation des branches parallèles. Généralement ces méthodes sont utilisées dans les ateliers de réparation. Les méthodes asymétriques existantes entraînent une différence de courants entre les phases et les branches parallèles à cause du flux de fuite qui croît avec le raccourcissement du pas d'enroulement.
- L'avantage principal de l'enroulement à une_deux la possibilité de réaliser une économie de cuivre obtenue grâce un pas raccourci réduit d'une demi encoche par rapport à celui à deux couches, l'utilisation de l'enroulement à une deux couches placé automatiquement est fortement recommandée.

D'après les résultats présentés il est évident que le dernier type d'enroulement possède des caractéristiques compromises entre l'enroulement à une couche et deux couches qui permet d'obtenir un pas relatif $\beta=0.88$ proche d'une valeur « 1 » mais chaque enroulement est avantage dans l'industrie suivant le cahier de charge et l'application industrielle.

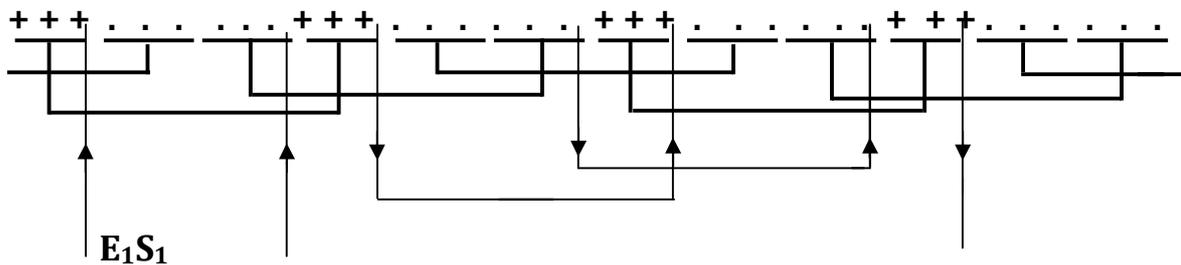
Annexe A

Annexe A

On demande de concevoir un enroulement à une couche par pôle consécutif ayant les paramètres suivants : $Z=36$; $2p=4$.

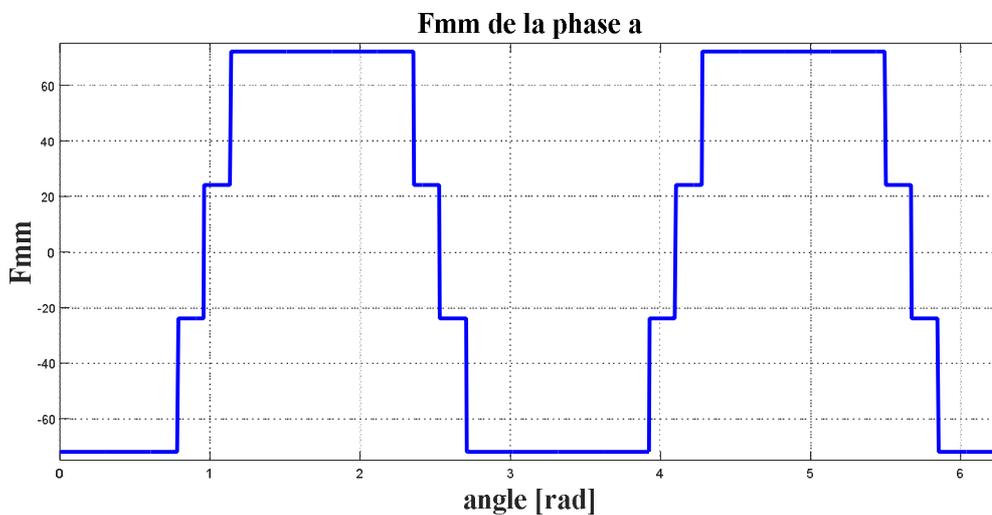
On détermine le nombre de bobines dans un groupe : $q=3$

L'étoile des phases est définie pour une paire de pôles ($p=2$). Pour $p = k$, il faut répéter l'étoile k fois. Dans le cas considéré deux fois. On procède à la répartition des encoches à l'aide de q et de l'étoile des phases.



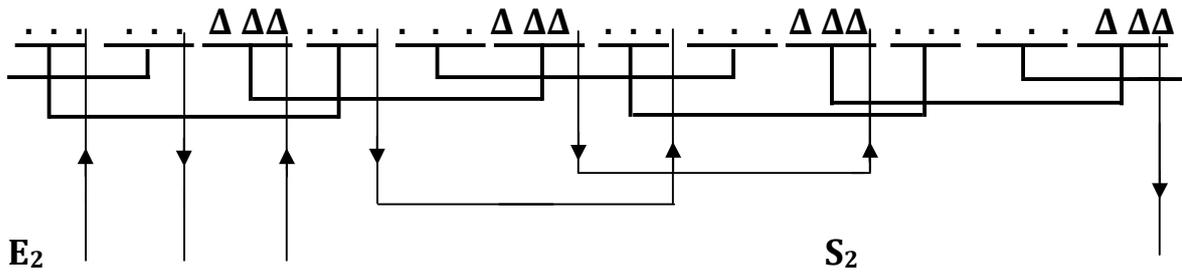
Enroulement à une couche par pôle consécutif à pas diamétrale (première phase).

Voilà la courbe de la première phase.



Fmm de la phase a.

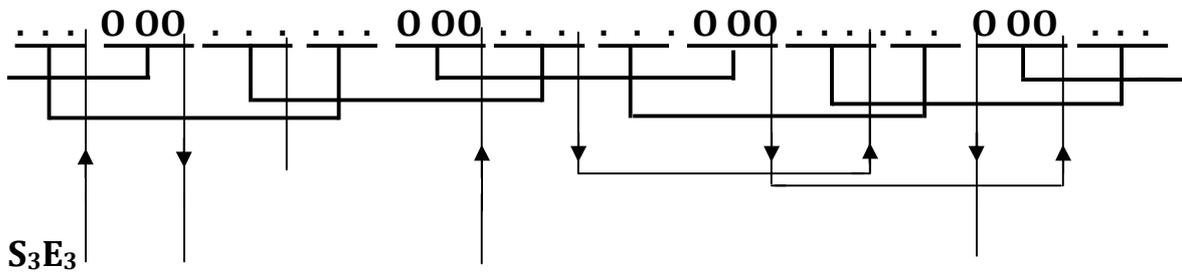
La seconde phase :



Enroulement à une couche par pôle consécutif à pas diamétrale (deuxième phase).

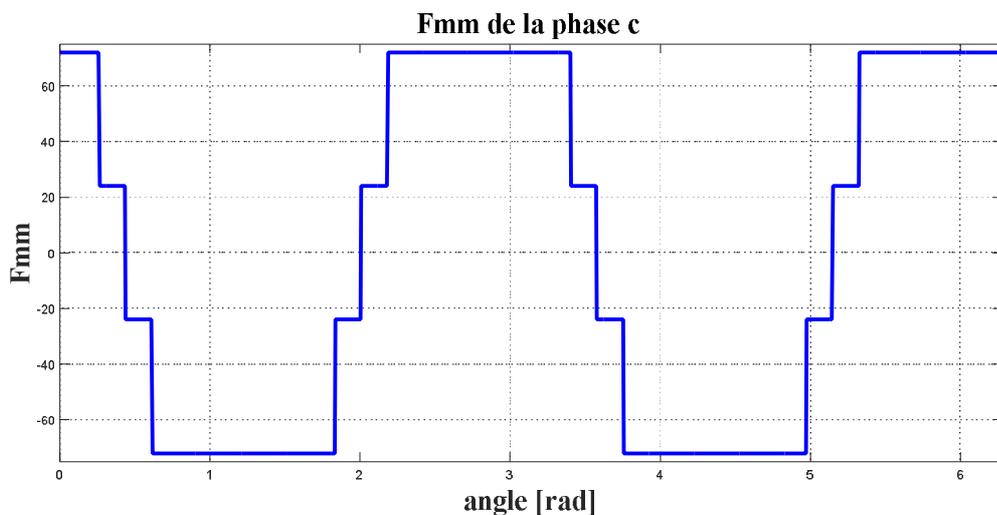
La 2^{ème} phase de Fmm est décalé par rapport le premier par un angle $\frac{2\pi}{3}$.

La dernière phase :



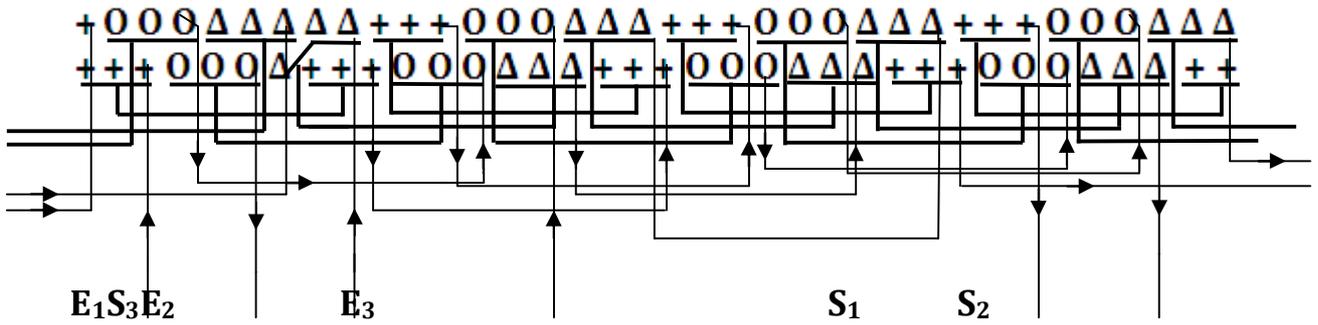
Enroulement à une couche par pôle consécutif (3^{ème} phase).

Enfin la courbe de la 3^{ème} phase est décalé par rapport le premier par un angle $\frac{4\pi}{3}$



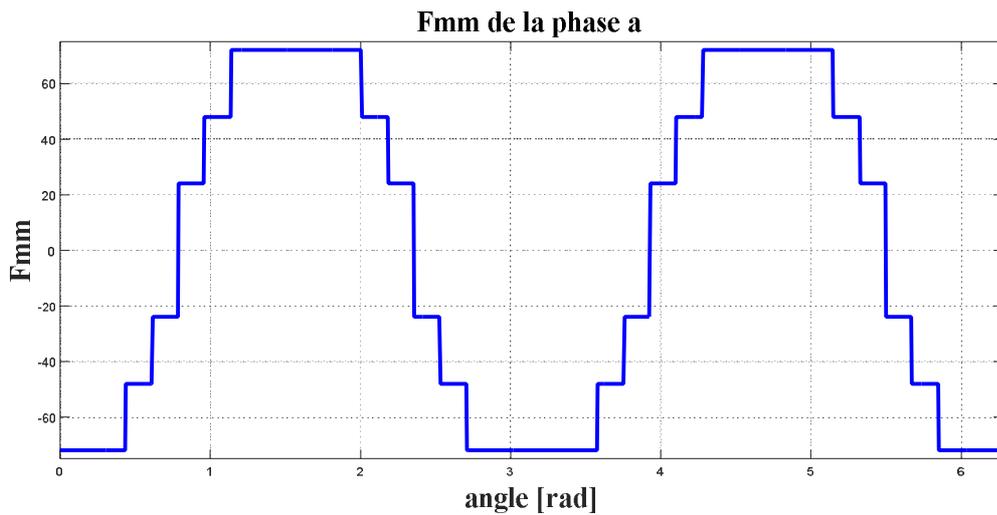
Enroulement à une couche par pôle consécutif à pas diamétrale (3^{ème} phase).

On demande de concevoir un enroulement à deux couche par succession asymétrique ayant les paramètres suivants : $Z=36$; $2p=4$.



**Enroulement à deux couches par succession asymétrique à pas raccourci $y=7$
(3^{ème} phase).**

Voila les courbes des trois phases successivement.



Enroulement à deux couches par succession asymétrique (1^{ème} phase).

Bibliographie

- [1] **Gilles DESBIENS**, « Machines bobinés sur dents » thèse de doctorat, l'Ecole Doctorale «Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal » Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, May2009.
- [2] Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtenir du diplôme : Diplôme d'ingénieur d'état, « Bobinage d'un moteur asynchrone triphasé : Etude théorique et pratique ».
- [3] **D. Zakaria, M.brahime**,« Modélisation et simulation d'une génératrice asynchrone on saturation », thèse de doctorat, Université kasdimerbah Ouargla.
- [4] **P.Cochran**, « Polyphase induction motors – analysis, design and application», CRC Press, 1989.
- [5] **A.E.Fitzgerald, C.Kingsley, S.D. Umans**, « Electric machinery », article McGraw Hill Professional, 2002.
- [6] **SalmaElAimani** , « Machine asynchrone», thèse de magester, 2012.
- [7] **W. Ouyang**, T. A. Lipo, *A. EL-Antably, « Analysis of Optimal Stator Concentric Winding PatternsDesign», article. Department of Electrical and computer Engenering University of Wisconsin-Madison.
- [8] **Jacques SAINT-MICHEL**, Directeur Scientifique Moteurs Leroy Somer« Bobinage des machines tournante à courant alternative ».
- [9] **Abdessemed R, Tomachevitch V. F**, « Enroulements des machines électriques », Livre, Université Batna, 2012.
- [10] **ABDESSEMED VERA**, « CONTRIBUTION A L'ANALYSE ET L'AMELIORATION DE LA FIABILITE DES MACHINES ELECTRIQUES », thèse de doctorat, Université Batna, 2012.
- [11] **G. SEGUIER, F. NOTTELET**, «Electrotechnique industrielle », Livre, Technique & Documentation (1996).
- [12] **I.Zagradišnik.B.Slemnik**, Rotating electrical machines, University of Maribor, Faculty of electrical engineering and computer science, Maribor, 2005.
- [13] Official website of company Kinle&Spiess www.kienle-spiess.com.
- [14] **Miralem HADŽISELIMOVIĆ**, Tine MARČIČ³, Bojan ŠTUMBERGER, Ivan ZAGRADIŠNIK, « Winding type influence on efficiency of an induction motor», article, -(University of Maribor , Faculty of Energy Technology University of Maribor, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science TECES, Research and Development centre for Electric Machines.
- [15] **H. Sequenz**, « The windings of electrical machines, Vol. 3, A.C. Machines », Springer Verlag, Vienna 1950 (in German).

- [16] **M.M.Liwschitz-Garik**, «Winding of alternating current machines», van Nostrand Publications, 1950.
- [17] **A. Demenko**, «Description of electrical machine windings in the finite element space », COMPEL, 2008.
- [18] **J. Steinbrink**, “Design and analysis of windings of electrical machines”, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM, 2008.
- [19] **D.A. Kocabas, A. F. Mergen**, “A novel method to reduce the effects of space harmonics in alternating current machines”, International Symposium on Industrial Electronics, 2008.
- [20] **H.Xueliang, D.Qiang, H. Minqiang**, «A Novel Exact and Universal Approach for Calculating the Differential Leakage Related to Harmonic Waves in AC Electric Motors », IEEE on Energy Conversion, Vol. 19, No. 1, pp. 1-6, March 2004.
- [21] **N.L. Schmitz, D.W. Novotny**, « Introductory electromechanics », Ronald Press, 1965.
- [22] **R.B. Robinson**, «Inductance coefficient of rotating machines expressed in terms of winding space harmonics », Proc. Inst. Elec. Eng, Vol. 111, No. 4, pp. 769-774, 1964.
- [23] **T.A. Lipo**, «Theory and control of synchronous machines», ECE 511 lecture notes, University of Wisconsin-Madison.
- [24] **A.E.Fitzgerald, C. Kingsley, S.D.Umans**, «Electric machinery», McGraw Hill Professional, 2002.
- [25] **I. Boldea, S.A. Nasar**, The induction machine handbook, CRC Press, 2002.
- [26] **P.C.Sen**, «Principles of electrical machines and power electronics», Wiley, 1996.
- [27] **P.Cochran, Polyphase** «Induction motors – analysis, design and application», CRC Press, 1989.
- [28] **jafarKhalilpour**, « INVESTIGATION THE EFFECTS OF DIFFERENT TYPES OF WINDING AND DIFFERENT PATTERNS ON EFFICIENCY AND REMOVING HARMONICS AND TORQUES IN INDUCTION MACHINE »,article, Faculty of Electrical Engineering, Aeronautical University of Science and Technology, 7, APRIL 2016.