

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou**



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Électrotechnique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme

*de MASTER ACADEMIQUE EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION : MACHINES ELECTRIQUES*

Thème

**Contribution au dimensionnement d'un moteur
asynchrone triphasé à cage**

Encadré par :

M^f : A.KIMOUCHE

M^{elle} : N.KICHOU

Soutenu le : 02/07/2013

Présenté par :

M^f : ARAB Abderrahmen

M^f : ATIG Mahdi

Promotion 2013

Remerciements

Tout d'abord on remercie le bon dieu puissant de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donnée tout au long de nos études.

Nous remercions nos professeurs qui nous ont enseigné durant notre cursus universitaire.

Nous tenons à remercier notre promoteur monsieur A.KIMOUCHE, maître assistant à l'université MOULOUD Mammeri de TIZI-OUZOU pour nous avoir encadré, orienté et soutenu dans les moments difficiles.

Nous tenons toutes nos gratitude à M^{elle} N.KICHOU, pour ces conseils et sa disponibilité lors des différentes sollicitations.

Nous remercions aussi tout le personnel de l'ENEL d'AZAZGA qui nous ont aidé à faire notre stage pratique dans des bonnes conditions.

Nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury, qui nous font l'honneur de juger ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mes chers parents, qui ont veillé sur mon éducation,
qui m'ont soutenu tout au long de mes études, et à qui
je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma
reconnaissance.*

A mes frères et mes sœurs.

A ma très chère Lynda.

A toute ma famille et mes proches.

A tous mes chers et amis.

A tous les enseignants ayant contribué à ma formation.

Et à tous mes collègues de la promotion : 2012/2013.

ARAB Abderrahmen

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents, qui m'ont soutenu tout au long de mes études.

A mes frères et mes sœurs.

A tous les membres de ma famille.

A tous mes chers et amis.

A tous les enseignants ayant contribué à ma formation.

Et à tous mes collègues de la promotion : 2012/2013.

A.T.F. Mahdi

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur la machine asynchrone triphasé	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Constitution d'un moteur asynchrone triphasé	3
I.2.1. Stator	5
I.2.2. Rotor.....	6
a) Rotor bobiné (à bague)	7
b) Rotor à cage (rotor en court-circuit).....	7
c) Rotor à double cage	8
d) Rotor à double encoche ou à encoches profondes.....	8
I.2.3. Paliers	9
I.3. Symboles électriques	9
I.4. Classification des moteurs à cage d'écureuil.....	9
I.5. Bobinage des moteurs asynchrones	11
I.5.1. Enroulement imbriqué à simple couche	12
I.5.2. Enroulement concentrique	14
I.5.3. Enroulement imbriqué à double couche.....	14
I.5.4. Enroulement ondulé	15
I.6. Isolation des moteurs asynchrones.....	16
I.7. Principe de fonctionnement	16
I.8. Branchement des moteurs asynchrones triphasés	17
I.9. Démarrage d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil	18
I.9.1. Problèmes de démarrages.....	18
I.9.2. Différents types de démarrages	18
I.9.2.1. Démarrage direct	18
I.9.2.2. Démarrage sous tension réduite	19
a) Démarrage étoile-triangle	19
b) Démarrage par autotransformateur	20
c) Démarrage par des résistances statoriques	21
d) Démarrage par gradateur de tension	21
I.10. Freinage des moteurs asynchrones triphasés	22
I.10.1. Arrêt en roue libre	22

I.10.2. Arrêt piloté	22
a) Freinage hypersynchrone	22
b) Freinage par injection de courant continu	22
I.10.3. Arrêt à contre-courant	22
I.10.4. Freinage mécanique par électro-frein.....	23
I.11. La vitesse de synchronisme	23
I.12. Le champ tournant	24
I.13. Glissement.....	24
I.14. Bilan de puissance et des pertes	25
I.14.1. La puissance absorbée	25
I.14.2. Les pertes par effet Joule au stator P_{js}	26
I.14.3. Les pertes fer	26
I.14.4. La puissance transmise dans l'entrefer P_{tr}	26
I.14.5. Pertes Joule au rotor P_{jr}	26
I.14.6. Puissance électromagnétique P_{em} et moment du couple électromagnétique C_{em}	27
I.14.7. Pertes mécaniques rotationnelles	27
I.14.8. Puissance mécanique et couple utiles P_u et C_u	27
I.14.9. Rendement.....	27
I.14.10. Détermination des pertes constantes	27
I.15. Facteur de puissance	28
I.16. Caractéristique mécanique	28
I.17. Caractéristique de courant $I = f(\Omega)$	29
I.18. Essais sur un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil	29
I.18.1. Essai à vide.....	29
I.18.2. Essai en charge	29
I.19. Variation de vitesse d'un moteur asynchrone triphasé	30
I.19.1. Réglage par variation du nombre de paires de pôles.....	30
I.19.2. Réglage par variation de tension	30
I.19.3. Réglage par action sur le glissement	30
I.19.4. Réglage par variation de fréquence	30
I.20. Tension et fréquence induite dans le rotor	31
I.21. Effet de la résistance du rotor	31
I.22. Conclusion	32

Chapitre II : Dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil

II.1. Introduction	33
II.2. Dimensionnement du moteur.....	33
II.2.1. Dimensionnement du stator	34
II.2.1.1. Coefficient d'utilisation	34
II.2.1.2. Le pas polaire	34
II.2.1.3. Le rapport entre le diamètre extérieur et le diamètre intérieur	34
II.2.1.4. Epaisseur de l'entrefer	35
II.2.1.5. la Longueur apparente du stator.....	35
II.2.1.6. Le flux par pôle	35
II.2.1.7. Dimensionnement des encoches	36
II.2.1.8. Facteurs influent sur la tension totale induite du stator	37
a) Facteur de distribution du flux	37
b) Facteur de forme du flux	38
c) Facteur de distribution de l'enroulement	38
d) Facteur de pas.....	38
II.2.1.9. Dimensionnement du cuivre du stator	38
a) Nombre de conducteur en série.....	38
b) Nombre de conducteur par encoche	38
c) Section des conducteurs du stator	39
II.2.1.10. La densité de flux dans l'entrefer.....	39
II.2.1.11. La densité de flux dans les dents du stator.....	39
II.2.1.12. La densité de flux dans la culasse du stator	40
II.2.1.13. Les encoches semi-ouvertes de type trapézoïdal à fond rond.....	40
II.2.1.14. Bobinage du stator	42
II.2.2. Dimensionnement du rotor	42
II.2.2.1. Diamètre extérieur et intérieur du rotor	42
II.2.2.2. Dimensionnement des encoches du rotor.....	42
II.2.2.3. Densité de flux dans les dents du rotor	43
II.2.2.4. Densité de flux dans la culasse du rotor.....	44
II.2.2.5. Calcul type d'une encoche	44
II.2.2.6. Coefficient de carter.....	44
II.2.2.7. Longueur réelle du rotor	45
II.2.2.8. Le courant dans les barres et les anneaux de la cage du rotor	45

II.2.2.9. Densité du courant dans le rotor	46
II.2.2.10. Dimensionnement de l'anneau	46
a) Section de l'anneau	46
b) Largeur radiale, Epaisseur et Diamètre moyen de l'anneau	47
II.2.2.11. Section de chaque barre	47
II.3. Conclusion	47
Chapitre III : Caractéristiques d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil	
III.1. Introduction	48
III.2. Caractéristiques des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil.....	48
III.2.1. La force magnétisante.....	48
III.2.1.1. La force magnétisante à travers l'entrefer	48
III.2.1.2. La force magnétisante pour la culasse du stator et du rotor	48
III.2.1.3. La force magnétisante pour les dents statoriques et rotoriques	49
III.2.1.4. La force magnétisante totale	49
III.2.2. Le courant de magnétisation.....	49
III.2.3. Volume des dents	50
III.2.4. Evaluation du courant et des pertes à vide	50
III.2.4.1. Les pertes fer.....	50
a) Pertes de surface	50
b) Pertes par pulsation dans les dents.....	50
c) Pertes dans la culasse du stator	51
d) Pertes dans les dents du stator	51
III.2.4.2. Les pertes mécaniques	51
III.2.4.3. Les pertes Joule.....	52
a) Les pertes Joule statoriques	52
b) Les pertes Joule rotoriques	54
III.2.4.4. Réactance de fuite.....	55
a) Dispersion d'encoche.....	55
b) Dispersion différentielle	57
c) Dispersion de boucle.....	57
d) Dispersion des têtes de bobines	58
e) Dispersion due à la disposition en biais.....	59
f) Réactance totale de fuite.....	59
III.2.5. Circuits équivalents	59

III.2.5.1. Caractéristiques en marche normale	60
III.2.5.2. Caractéristiques au démarrage	61
III.3. Conclusion	64
Chapitre IV : Application	
IV.1. Introduction	65
IV.2. Processus de fabrication d'un moteur asynchrone	65
IV.2.1. Présentation de l'unité des moteurs	65
IV.2.1.1. Bâtiment 2a	66
A. Ateliers de découpage, encochage et empaquetage	66
a) Fabrication des tôles statoriques et rotoriques	66
b) Empaquetage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques	66
c) Fabrication des capots de ventilateurs	67
d) Découpage des barres de cuivre pour les rotors à cage d'écureuil	67
B. Atelier de moulage sous pression	67
IV.2.1.2. Bâtiment 2	67
A. Atelier d'usinage	67
a) Fabrication des arbres rotoriques	67
b) Usinage des différentes pièces en fonte et en alpac (alliage d'aluminium	68
B. Atelier de bobinage	68
a) Secteur préparation isolation	68
b) Secteur préparation des bobines	69
c) Secteur bobinage du paquet statorique	69
d) Contrôle	70
e) Imprégnation	70
C. Atelier de montage	70
a) Secteur équilibrage du rotor	70
b) Secteur pré montage	70
c) Secteur montage final	71
d) Contrôle final	71
d.1) Essai série	71

d.2) Essais spécieux.....	72
IV.3. Application.....	73
IV.3.1. Cahier de charge.....	73
IV.3.2. Calcul est simulation du moteur.....	74
IV.3.2.1. Dimensionnement du stator.....	75
IV.3.2.2. Dimensionnement du rotor.....	76
IV.3.2.3. Détermination des caractéristiques du moteur.....	77
IV.3.3. Comparaison des résultats calculés avec ceux réels.....	82
IV.3.4. Interprétation des résultats obtenus.....	83
IV.4. Procédure de calcul avec éléments finis.....	83
IV.4.1. Modèle du dispositif à étudier.....	83
IV.4.2. Maillage par éléments finis.....	84
IV.4.3. Résultats de simulation.....	85
IV.5. Conclusion.....	86
Conclusion Générale.....	87
Bibliographie	
Annexes	

Liste des Figures

Liste des figures

Figure I.1 : Construction d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil3

Figures I.2 : Vue du stator d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil avec et sans bobinages.....6

Figure I.3 : Représentation d'une plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé6

Figure I.4 : Structure d'un rotor à cage d'écureuil8

Figure I.5 : Coupe d'un rotor à cage à encoches profondes9

Figure I.6 : Symboles électrique des moteurs asynchrones triphasés9

Figure I.7 : Forme d'encoches pour divers classes de moteur a) Classe A, b) Classe B, c) Classe C, d) Classe D, e) Classe F11

Figure I.8 : Représentation schématique des différents composants constituant un enroulement.....11

Figure I.9 : Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases d'un moteur à 2 pôles, 12 encoches avec des enroulements, qui ont un pas entier et sont placés à 120° électriques ...13

Figure I.10 : Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases d'un moteur à 4 pôles, 24 encoches. Les enroulements ont un pas entier et sont placés à 120° électriques13

Figure I.11 : Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases d'un moteur à 2 pôles, 12 encoches, avec deux conducteurs par encoche. Les enroulements ont un pas entier et sont placés à 120° électrique14

Figure I.12 : Enroulement concentrique triphasé pour les trois phases d'un moteur à 2 pôles, 12 encoches. Avec des enroulements qui sont placés à 120° électriques14

Figure I.13 : Enroulement imbriqué triphasé à double couche, pour les trois phases d'un moteur à 4 pôles, 36 encoches. L'enroulement a un pas fractionnaire de $7/9$, c'est-à-dire 140° électriques. Les enroulements sont placés à 120° électriques15

Figure I.14 : Enroulement imbriqué triphasé à double couche, pour les trois phases d'un moteur à 4 pôles, 36 encoches. L'enroulement a un pas fractionnaire de $7/9$, c'est-à-dire 140° électriques. Les enroulements sont placés à 60° électriques15

Figure I.15 : Enroulement ondulé pour une phase d'un moteur à 4 pôles, 36 encoches16

Figures I.16 : Couplage étoile triangle d'un moteur asynchrone triphasé17

Figure I.17 : Les domaines de fonctionnement de la machine asynchrone triphasé.....23

Figure I.18 : principe d'un moteur asynchrone triphasé24

Figure I.19 : Bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone triphasé25

Figure I.20 : Caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone triphasé.....28

Figure I.21 : Variation de l'intensité du courant I en fonction de la vitesse Ω	29
Figure I.22 : Variation du couple en fonction de la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé de 1KW	31
Figure II.1 : Encoche de type ouvert, a) un seul conducteur par couche, b) plusieurs conducteurs par couche	36
Figure II.2 : Encoche de type ouvert avec plusieurs conducteurs de faible section a) deux conducteurs carrés par couche, b) plusieurs conducteurs ronds par couche	37
Figure II.3 : Encoche de type semi ouvert, a) à fond rond, b) à fond plat	37
Figure II.4 : Encoche trapézoïdale à fond rond	40
Figure II.5 : Encoches rotoriques avec une forme trapézoïdale	43
Figure II.6 : Une surface dentée face à une surface lisse au niveau de l'entrefer.....	45
Figure III.1 : Disposition des têtes de bobines dans le cas de bobines rigide préformées .	52
Figure III.2 : Bobine de plusieurs fils rond de faible section	53
Figure III.3 : Différents types d'encoches, a) type ouvert, b) type semi-ouvert rectangulaire, c) type semi-ouvert ronde, d) type semi ouvert trapézoïdale à fond rond, e) type semi-ouvert trapézoïdale à fond plat	55
Figure III.4 : Extension d'une tête de bobine préformée au stator et extension des barres au rotor et position de l'anneau	58
Figure III.5 : Schéma équivalent pour un moteur à simple cage d'écureuil.....	59
Figure III.6 : Schéma équivalent pour un moteur à double cage d'écureuil	60
Figure IV.1 : Organigramme de Calcul	74
Figure IV.2 : Géométrie du moteur.....	84
Figure IV.3 : Maillage du domaine d'étude.....	84
Figure IV.4 : Répartition des lignes du champ	85
Figure IV.5 : Répartition de l'induction magnétique.....	86
Figures B.1 : Schémas fonctionnels pour le démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches). Annexe B	
Figures B.2 : Circuits puissances et commandes pour le démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)	Annexe B
Figures B.3 : Représentation des composants (Q1, KM1, F1).....	Annexe B
Figures B.4 : Schémas fonctionnels pour le démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)	Annexe B

Figures B.5 : Circuits puissances et commandes pour le démarrage étoile triangle d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)	Annexe B
Figures B.6 : Schémas fonctionnels pour le démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)	Annexe B
Figures B.7 : Circuits puissances et commandes pour le démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches).....	Annexe B
Figures B.8 : Schémas fonctionnels pour le démarrage par des résistances statotique d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)	Annexe B
Figures B.9 : Circuits puissances et commandes pour le démarrage par résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches).....	Annexe B
Figure B.10 : Principe de gradateur de tension	Annexe B
Figure B.11 : Démarrage par gradateur de tension	Annexe B
Figure B.12 : Coefficient d'utilisation en fonction du nombre de pôles et du rapport entre la puissance et la vitesse.....	Annexe B
Figure B.13 : Courbe de magnétisation et pertes dans le fer.....	Annexe B
Figure B.14 : Facteur de correction Ka pour le calcul de la résistance des anneaux	Annexe B

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1. Tableau récapitulatif des éléments constituant un moteur asynchrone triphasé..	4
Tableau I.2. Tableau récapitulatif des éléments constituant l'enroulement.....	12
Tableau IV.1. Calcul analytique des paramètres du stator.....	75
Tableau IV.2. Calcul analytique des paramètres du rotor.....	76
Tableau IV.3. Calcul analytique des performances du moteur	77
Tableau IV.4. Comparaison des résultats	82
Tableau A.1. Le rapport entre les diamètres du stator	Annexe A
Tableau A.2. Plages usuelles pour c_1 en fonction du nombre de pôles	Annexe A
Tableau A.3. Valeur du facteur de pas pour divers harmoniques	Annexe A
Tableau A.4. Les caractéristiques électriques moyennes des moteurs asynchrones à cage d'écurueil avec une gamme de puissances comprises entre 1 KW et 20 MW	Annexe A
Tableau A.5. Valeurs usuelles pour les conducteurs du bobinage du stator	Annexe A
Tableau A.6. Valeurs de i_d et de i_w en fonction de la tension et de diamètre extérieur du stator	Annexe A
Tableau A.7. Nombre d'encoches au rotor recommandé en fonction du nombre de pôles et du nombre d'encoches au stator	Annexe A
Tableau A.8. Valeurs des paramètres d_{tb} et b_1 en fonction de la tension.....	Annexe A

Liste des symboles

Liste des symboles

ab : Section d'une barre du rotor (mm^2)

as : Section d'un conducteur du stator (mm^2)

Aa : Section de l'anneau (mm^2)

Ab : Section totale des barres du rotor (mm^2)

ba : Extension des barres du rotor (mm)

b1 : Extension de la partie droite des bobines (mm)

b2 : Longueur de la partie inclinée de la tête (mm)

b3 : Extension de la partie courbée de la tête des bobines (mm)

b4 : Projection longitudinale de b2 (mm)

Bcr : Densité de flux dans la culasse du rotor (T)

Bcs : Densité de flux dans la culasse du stator (T)

Bdr : La densité de flux dans les dents du rotor (T)

Bds : Densité maximale de flux dans les dents statoriques (T)

Bg : Densité de flux dans l'entrefer (T)

cr : Paramètre égal à 0,157 pour un rotor dans lequel les conducteurs sont en cuivre ou en laiton et soudés aux anneaux

cr : Paramètre égal à 0,228 pour un rotor dans lequel les conducteurs sont en aluminium coulé et collés aux anneaux

cs : nombre de côtés de bobine par encoche

c1 : Constante associée au nombre de pôles

Cdém ou Cd : Couple de démarrage (N.m)

Cem : Couple électromagnétique (N.m)

Cer : Facture utilisé pour la détermination de la valeur ajoutée afin de traiter le haut de l'encoche du rotor

Ces : Facture utilisé pour la détermination de la valeur ajoutée afin de traiter le haut de l'encoche du stator

Cn : Couple nominal (N.m)

Cu : Couple utile (N.m)

da : Largeur radiale de l'anneau (mm)

d_b : Epaisseur de la barre (mm)

d_c : La distance radiale entre le centre de l'anneau et le centre de l'ensemble des conducteurs du stator dans une encoche (mm)

d_{cr} : Epaisseur de la culasse du rotor (mm)

d_{cs} : Epaisseur de la culasse du stator (mm)

d_{er} : Profondeur d'une encoche du rotor (mm)

d_{es} : Profondeur d'une encoche du stator (mm)

d_{tb} : Distance entre deux têtes de bobines (mm)

d_2 : Distance entre la surface de la dent et le centre du cercle formant le fond de l'encoche (mm)

d_{2r} : Distance entre la surface de la dent et le centre du cercle formant le fond de l'encoche du rotor (mm)

d_{2s} : Distance entre la surface de la dent et le centre du cercle formant le fond de l'encoche du stator (mm)

d_3 : La distance entre l'ouverture et la partie utile de l'encoche (mm)

d_{3r} : La distance entre l'ouverture et la partie utile de l'encoche du rotor (mm)

d_{3s} : La distance entre l'ouverture et la partie utile de l'encoche du stator (mm)

d_4 : Epaisseur de l'isthme des dents (mm)

d_{4r} : Epaisseur de l'isthme des dents rotoriques (mm)

d_{4s} : Epaisseur de l'isthme des dents statoriques (mm)

D : Diamètre intérieur du stator (mm)

D_a : Diamètre moyen de l'anneau (mm)

D_{ax} : Diamètre intérieur du rotor (mm)

D_e : Diamètre extérieur du stator (mm)

D_{fil} : Diamètre de chaque fil isolé (mm)

D_r : Diamètre du rotor (mm)

E : Tension d'alimentation du moteur (V)

E_{co} : Tension induite dans le rotor, à circuit ouvert, le rotor étant immobile (V)

E_i : La tension induite par phase (V)

E_2 : Tension induite dans le rotor à circuit ouvert (V)

f : Fréquence du réseau (Hz)

f_b : Facteur de forme du flux

f_d : Facteur de distribution du flux

f_{pr} : Fréquence de pulsation dans les dents rotoriques

f_{ps} : Fréquence de pulsation dans les dents statoriques

f_2 : Fréquence dans le rotor (Hz)

F_b : Facteur tenant compte de la forme du bas de l'encoche

F_{br} : Facteur tenant compte de la forme du bas des encoches rotoriques

F_{bs} : Facteur tenant compte de la forme du bas des encoches statoriques

F_{cr} : Force magnétisante totale par pôle pour la culasse du rotor (At)

F_{cs} : Force magnétisante totale par pôle pour la culasse du stator (At)

$F_{dém}$: Force magnétisante par encoche pour le courant de démarrage à rotor calé (At)

F_{dr} : Force magnétisante totale par pôle pour les dents du rotor (At)

F_{ds} : Force magnétisante totale par pôle pour les dents du stator (At)

F_g : Force magnétisante par pôle pour l'entrefer (At)

F_h : Facteur tenant compte de la forme du haut de l'encoche

F_{hr} : Facteur tenant compte de la forme du haut de l'encoche rotorique

F_{hs} : Facteur tenant compte de la forme du haut de l'encoche statorique

F_p ou $(\cos \varphi)$: Le facteur de puissance du moteur

F_{po} : Le facteur de puissance du moteur à vide

F_t : La force magnétisante totale à travers le circuit magnétique (At)

g : Epaisseur de l'entrefer (mm)

G_{cs} : Masse du fer de la culasse du stator (kg)

G_{ds} : Masse du fer des dents du stator (kg)

H_{cr} : Force magnétisante pour la culasse du rotor (At/mm)

H_{cs} : Force magnétisante pour la culasse du stator (At/mm)

H_{dr} : Force magnétisante pour les dents du rotor (At/mm)

H_{ds} : Force magnétisante pour les dents du stator (At/mm)

i_d : Augmentation d'épaisseur pour la profondeur de l'encoche (mm)

i_w : Augmentation d'épaisseur pour la largeur de l'encoche (mm)

I : Courant par phase (A)

I_a : Valeur efficace du courant dans l'anneau (A)

$I_{a\ max}$: Le courant maximal dans l'anneau (A)

I_b : Courant dans une barre (A)

I_d : Courant de démarrage (A)

I_{fe} : Courant pour tenir compte des pertes dans le fer (A)

I_g : Courant de magnétisation correspond à la chute de potentiel magnétique dans l'entrefer (A)

I_m : Courant de magnétisation (A)

I_{max} : Le courant maximal dans les barres rotoriques (A)

I_n : Courant nominal (A)

I_o : Courant à vide (A)

I_{or} : Composante réelle du courant à vide (A)

I_r : Courant dans le rotor (A)

I_{rc} : Courant à rotor calé (A)

I_1 : Courant du stator (A)

I_2 : Le courant rotorique reporté au stator (A)

J_a : Densité de courant dans les anneaux (A/mm^2)

J_b : Densité de courant dans les barres (A/mm^2)

J_s : Densité de courant dans le stator (A/mm^2)

K_a : Facteur de correction pour la résistance de l'anneau

K_{br} : Constante de dispersion de boucle du rotor

K_{bs} : Constante de dispersion de boucle du stator

K_c : Coefficient de carter

K_{ch} : Facteur qui tien compte de l'écrasement des chignons

K_{cr} : Coefficient de carter au rotor

K_{cs} : Coefficient de carter au stator

K_d : Facteur de distribution de l'enroulement du stator

K_{de} : Facteur de réduction de dispersion d'encoche

K_{der} : Facteur de réduction de dispersion d'encoche pour le rotor

K_{des} : Facteur de réduction de dispersion d'encoche pour le stator

K_{dr} : Facteur de distribution de l'enroulement du rotor

K_f : Coefficient de foisonnement qui vaut 0,93

K_g : Facteur qui varier en fonction de λ_g

K_h : Facteur de correction qui varier entre 1,2 et 1,8 pour la réactance de fuite au démarrage

K_m : Constante égale à 1,40 pour le cuivre ; 1,08 pour l'aluminium et 0,74 pour le laiton

K_p : Facteur de pas

K_{pr} : Facteur du pas rotorique

K_t : Facteur de majoration

K_u : Coefficient d'utilisation

K_2 : Coefficient de trapézoïdalité des dents

K_{2r} : Coefficient de trapézoïdalité des dents rotoriques

K_{2s} : Coefficient de trapézoïdalité des dents statoriques

K_{3r} : Coefficient d'ouverture d'encoches rotoriques

K_{3s} : Coefficient d'ouverture d'encoches statoriques

K_5 : Coefficient variant entre 0,8 et 1,0

K_6 : Coefficient variant entre 0,4 et 0,5

l : Longueur totale du stator (mm)

l_a : Longueur apparente du stator (mm)

l_b : Longueur d'une barre (mm)

l_{cr} : Longueur du chemin parcouru par le flux dans la culasse du rotor (mm)

l_{cs} : Longueur du chemin parcouru par le flux dans la culasse du stator (mm)

l_{dr} : Longueur du chemin parcouru par le flux dans les dents du rotor (mm)

l_{ds} : Longueur du chemin parcouru par le flux dans les dents du stator (mm)

l_s : Longueur moyenne d'une demi-spire (mm)

l_v : Longueur virtuelle des canaux de ventilation statorique (mm)

l_2 : Longueur réelle du rotor (mm)

L_e : L'inductance par phase pour la dispersion d'encoche

m : Nombre de phases

m_r : Nombre de phase du rotor

n : Vitesse de révolution (tr/mn)

n_s : Vitesse de synchronisme (tr/mn)

N : Nombre de conducteurs en série par phase

N_b : Nombre de barres

N_c : Nombre de conducteurs par encoche

N_{eps} : Nombre d'encoches par pôle au stator

Ner : Nombre d'encoches du rotor
Nes : Nombre d'encoches du stator
Nfil : Nombre de fils en parallèle
Nv : Nombre de canaux de ventilation

p : Nombre de paire de pôles
2p : Nombre de pôles
Pa : La puissance absorbée (W)
Pc : Pertes constantes (W)
Pcs : Pertes dans la culasse du stator (W)
Pcu1 : Les pertes dans le cuivre du stator (W)
Pcu2 : Les pertes dans le cuivre du rotor (W)
Pds : Pertes dans les dents du stator (W)
Pem : Puissance électromagnétique (W)
Pfe : Pertes dans le fer (W)
Pg : La puissance à travers l'entrefer (W)
Pjor : Pertes dues à l'effet Joule au rotor à vide (W)
Pjos : Pertes dues à l'effet Joule au stator à vide (W)
Pjs : Pertes dues à l'effet Joule au stator (W)
Pjr : Pertes Joule au rotor (W)
Pmec : Pertes mécaniques (W)
Pp : Pertes par pulsation (W)
Prot : Pertes mécaniques rotationnelles (W)
Psurf : Pertes de surface (W)
Ptr : La puissance transmise dans l'entrefer (W)
Pu : La puissance utile du moteur (W)

q : Nombre de chemins parallèles

r : Résistance de chaque enroulement (Ω)
R : Rayon du cercle de l'encoche (mm)
Ra : Résistance de l'anneau (Ω)
Rb : Résistance d'une barre rotorique (Ω)

R_c : Facteur qui multiplie la résistance des barres pour la section contenue dans le circuit magnétique

R_{fe} : La résistance qui tien compte des pertes dans le fer (Ω)

R_t : La résistance totale d'un moteur asynchrone triphasé à double et à simple cage d'écureuil (Ω)

R_1 : Résistance par phase du stator (Ω)

R_2 : Résistance par phase du rotor reportée au stator (Ω)

R_{2b} : La résistance rotorique pour la cage du bas d'un moteur asynchrone triphasé à double cage d'écureuil (Ω)

$R_{2\text{ dém}}$: Résistance rotorique au démarrage (Ω)

R_{2h} : La résistance rotorique pour la cage du haut d'un moteur asynchrone triphasé à double cage d'écureuil (Ω)

s : Le glissement (%)

S_{dr} : Surface de toutes les dents du rotor (mm^2)

S_{ds} : Surface de toutes les dents du stator (mm^2)

s_m : Le glissement qui correspond au couple maximal

S_{ne} : Surface nette de chaque encoche (mm^2).

t : Le pas d'encoche

t_a : Nombre de spire par bobine

t_c : Pas d'encoche au centre de l'encoche (mm)

t_{r1} : Pas d'encoche à l'entrefer du rotor (mm)

t_{s1} : Pas d'encoche à l'entrefer du stator (mm)

U : La tension composée aux bornes du moteur (V)

V : Vitesse périphérique du rotor (m/s)

V_{dr} : Volume des dents rotoriques (mm^3)

V_{ds} : Volume des dents statoriques (mm^3)

w_a : Epaisseur de l'anneau (mm)

w_b : Largeur de la barre (mm)

$w_{dr\text{ min}}$: Largeur minimale des dents du rotor (mm)

w_{dr1} : Largeur des dents du rotor à l'entrefer (mm)

wdr2 ou wdr3 : Largeur des dents du rotor, en dessous de l'isthme (mm)

wds min ou (wds3 ou wds2) : Largeur minimale de la dent du stator (mm)

wds1 : Largeur des dents du stator à l'entrefer (mm)

we : Largeur de l'encoche (mm)

wer1 : Largeur de l'encoche rotorique au niveau de l'entrefer (mm)

wer2 : Largeur de l'encoche du rotor près de l'ouverture (mm)

wer3 : largeur du fond de l'encoche du rotor (mm)

wes1 : Largeur de l'encoche statorique au niveau de l'entrefer (mm)

wes3 : Largeur maximale de l'encoche (mm)

we1 : Largeur de l'encoche à l'entrefer (mm)

Wv : Largeur d'un canal de ventilation (mm)

Xbi : Réactance due à la disposition en biais (Ω)

Xbr : Réactance due à la dispersion de boucle au rotor (Ω)

Xbs : Réactance due à la dispersion de boucle au stator (Ω)

Xc : Facteur de correction pour le facteur qui tient compte de la forme du bas des encoches rotoriques

Xd : Réactance totale due à la dispersion différentielle (Ω)

Xdr : Réactance due à la dispersion différentielle au rotor (Ω)

Xdr dém : Réactance due à la dispersion différentielle au rotor au démarrage (Ω)

Xds : Réactance due à la dispersion différentielle au stator (Ω)

Xds dém : Réactance due à la dispersion différentielle au stator au démarrage (Ω)

Xe : La réactance de dispersion d'encoche (Ω)

Xer : Réactance due à la dispersion d'encoche au rotor (Ω)

Xer dém : Réactance due à la dispersion d'encoche au rotor au démarrage (Ω)

Xes : Réactance due à la dispersion d'encoche au stator (Ω)

Xes dém : Réactance due à la dispersion d'encoche au stator au démarrage (Ω)

Xm : Réactance de magnétisation (Ω)

Xt : La réactance totale d'un moteur asynchrone triphasé à double et à simple cage d'écreuil (Ω)

Xtr : Réactance due à la dispersion des têtes de bobines du rotor (Ω)

Xts : Réactance due à la dispersion des têtes de bobines du stator (Ω)

X1 : Réactance du stator par phase (Ω)

$X1_{\text{dém}}$: La réactance totale de fuite au démarrage pour le stator (Ω)

$X2$: Réactance du rotor par phase (Ω)

$X2b$: La réactance rotorique pour la cage du bas d'un moteur asynchrone triphasé à double cage d'écureuil (Ω)

$X2_{\text{dém}}$: La réactance totale de fuite au démarrage pour le rotor (Ω)

$X2h$: La réactance rotorique pour la cage du haut d'un moteur asynchrone triphasé à double cage d'écureuil (Ω)

y, y_r, y_s : Symboles utiles pour le calcul du coefficient d'ouverture d'encoches statoriques ($K3s$) et rotoriques ($K3r$)

$Z_{\text{dém}}$: L'impédance équivalente au démarrage pour un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (Ω)

Z_t : Impédance totale d'un moteur asynchrone triphasé à double et à simple cage d'écureuil (Ω)

Z_2 : Impédance rotorique pour un moteur asynchrone triphasé à double et à simple cage d'écureuil (Ω)

ΔF_h : Valeur ajoutée afin de traiter le haut de l'encoche

ΔF_{hr} : Valeur ajoutée afin de traiter le haut de l'encoche du rotor

ΔF_{hs} : Valeur ajoutée afin de traiter le haut de l'encoche du stator

α : Angle entre les têtes de bobines et les laminations ($^\circ$)

β : L'angle électrique qui sépare deux encoches ($^\circ$)

γ : Rapport entre le pas de la bobine et le pas normal

ε : Epaisseur des tôles (mm)

η : Le rendement (%)

θ_{bi} : L'inclinaison des encoches (rad)

ν : Harmonique considéré

$\rho_{cu}(T)$: La résistivité du cuivre pour une température T ($\Omega \cdot m$)

$\rho_{al}(T)$: La résistivité de l'aluminium pour une température T ($\Omega \cdot m$)

λ : Paramètre qui permet de déterminer la valeur du facteur de correction X_c

λ_g : Coefficient utilisé pour le calcul de K_g

τ : Le pas polaire (mm)

\emptyset : Flux par pôle (Wb)

Φ_t : Flux total (Wb)

Ω : Vitesse de rotation du rotor (rad/s)

Ω_s : Vitesse de synchronisme (rad/s)

θ, X, A, z, B, H, Y : Symboles utiles pour le calcul des encoches

Introduction Générale

Introduction Générale

La machine électrique tournante est un dispositif électromagnétique destiné à transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique (fonctionnement en générateur) ou, inversement, à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement en moteur). La conception de ces machines est l'une des plus prestigieuses découvertes du siècle dernier et reste aujourd'hui un thème de recherche très prisé par les laboratoires de recherche. L'objectif visé par cette recherche est toujours l'optimisation et la conception de nouvelles machines adaptées à la demande du marché. La caractérisation de ces machines entraîne à formuler des méthodes de dimensionnement qui s'appuie sur les équations tenant compte des divers phénomènes électromagnétiques et qui aboutit à une définition globale.

Dans l'industrie, particulièrement dans les pays développés, plus de la moitié de l'énergie électrique totale produite est convertie en énergie mécanique dans les moteurs électriques. Parmi plusieurs types de moteurs électriques, les machines asynchrones triphasées occupent une place prépondérante.

La machine asynchrone triphasée, connue également sous le terme «anglo-saxon» de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Les machines possédant un rotor « en cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage ou machines à cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager...etc. Pour fonctionner en courant monophasé, les machines asynchrones nécessitent un système de démarrage. Pour les applications de puissance, au delà de quelques kilowatts, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des systèmes de courants triphasés.

Dans ce mémoire on s'intéresse au dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil à partir d'un cahier de charge bien défini, en utilisant une méthode de calcul canadienne et de comparer nos résultats à un moteur asynchrone de marque Electro-Industrie.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre on présentera des généralités sur le fonctionnement des moteurs asynchrones triphasés en général et les moteurs à cage en particulier.
- En deuxième chapitre on évoquera les différentes procédures et démarches entreprises lors d'un calcul de moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil en vue de son dimensionnement et son optimisation.
- Dans le troisième chapitre on présentera la force magnétisante ainsi les différentes pertes dans le moteur, ensuite nous développerons son circuit équivalent, afin de démontrer des relations et les caractéristiques du moteur.
- Dans le quatrième chapitre on abordera le processus de fabrication d'un moteur asynchrone à l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA. En suite on présentera une application numérique afin d'exploiter les différentes formules de dimensionnement et de faire une comparaison entre les valeurs calculées avec cette méthode et un moteur réel réalisé à l'entreprise d'Electro-Industrie puis on a établi un calcul par élément finis en appliquant le logiciel F.e.m.m.

Enfin on présentera une conclusion générale qui résume les résultats de nos travaux.

CHAPITRE I

Généralités sur les moteurs asynchrones triphasés

I.1. Introduction

Le moteur asynchrone triphasé transforme l'énergie électrique apportée par le courant alternatif triphasé en énergie mécanique. Il est caractérisé par des grandeurs d'entrées qui sont électriques et des grandeurs de sorties qui sont mécaniques. Ces moteurs s'imposent en effet dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'ils présentent : simplicité de construction, faible coût, robustesse, facilité de démarrage...etc.

Vu l'importance de ces moteurs, ce chapitre est consacré à la présentation des moteurs asynchrones triphasés pour étudier leur construction et leur principes fondamentaux.

I.2. Constitution d'un moteur asynchrone triphasé

Dans cette partie, on se propose de donner quelques précisions sur les éléments de constitution des machines asynchrones triphasés. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le moteur est réalisé.

La machine asynchrone triphasée qui est représentée sur la figure I.1 peut se décomposer du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation l'arbre du moteur [1].

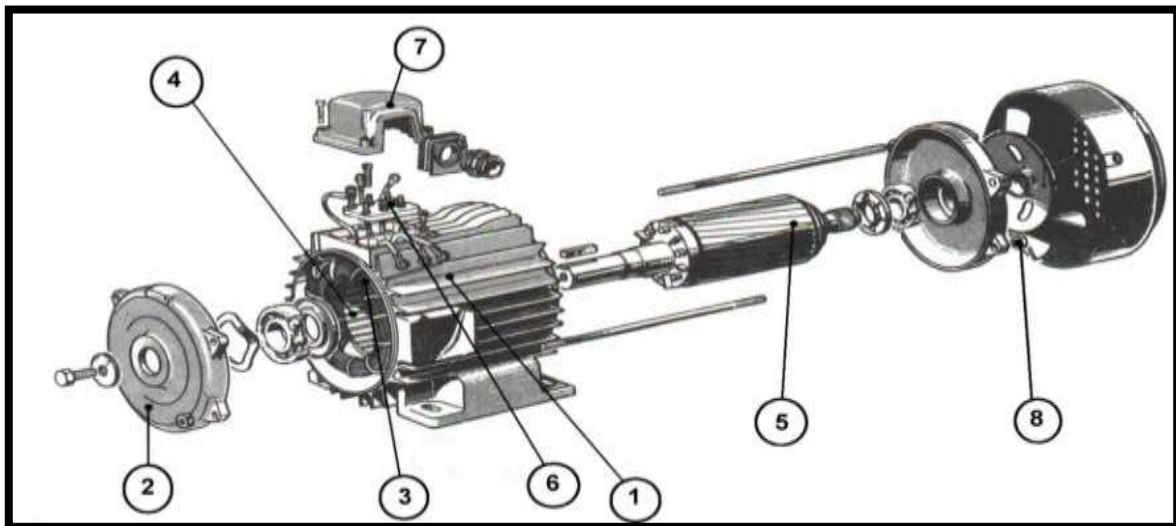




Figure I.1 : Construction d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil

Tableau I.1. Tableau récapitulatif des éléments constituant un moteur asynchrone triphasé

N°	Désignation	Fonction	Matière	Aspect
1	Carter à ailette	Supporter l'ensemble des pièces du moteur	Alliage léger	
2	Flasque palier	Supporter l'arbre	Alliage léger	
3	Bobinage statorique	Produire le champ magnétique tournant	Fil de cuivre émaillé	
4	Circuit magnétique du stator	Supporter le bobinage et canalise le champ magnétique	Tôles magnétiques	
5	Rotor	Transmettre le couple moteur	Empilage de tôles ferromagnétiques (rotor à cage d'écuruil). Fil de cuivre plus tôles ferromagnétiques (rotor bobiné)	 

6/7	Boîte à bornes	Protège la plaque à bornes et permet le raccordement électrique	Alliage léger, Plastique	
8	Ventilateur	Refroidir le moteur	Alliage léger, Plastique	

I.2.1. Stator

Il est représenté sur la figure I.2, et définit comme la partie fixe du moteur. Comporte une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0.5 mm d'épaisseur) en acier et silicium dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le feuilletage du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courant de Foucault [9]. Au final, ces tôles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique. Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manières imbriquées, ondulées ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone. Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique [1].



Figures I.2 : Vue du stator d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil avec et sans bobinages

Le stator d'une machine asynchrone comporte aussi une plaque signalétique (figure I.3), qui est la carte d'identité du moteur délivrée et certifiée par le constructeur. Elle contient donc les caractéristiques nominales électriques et mécaniques du moteur.

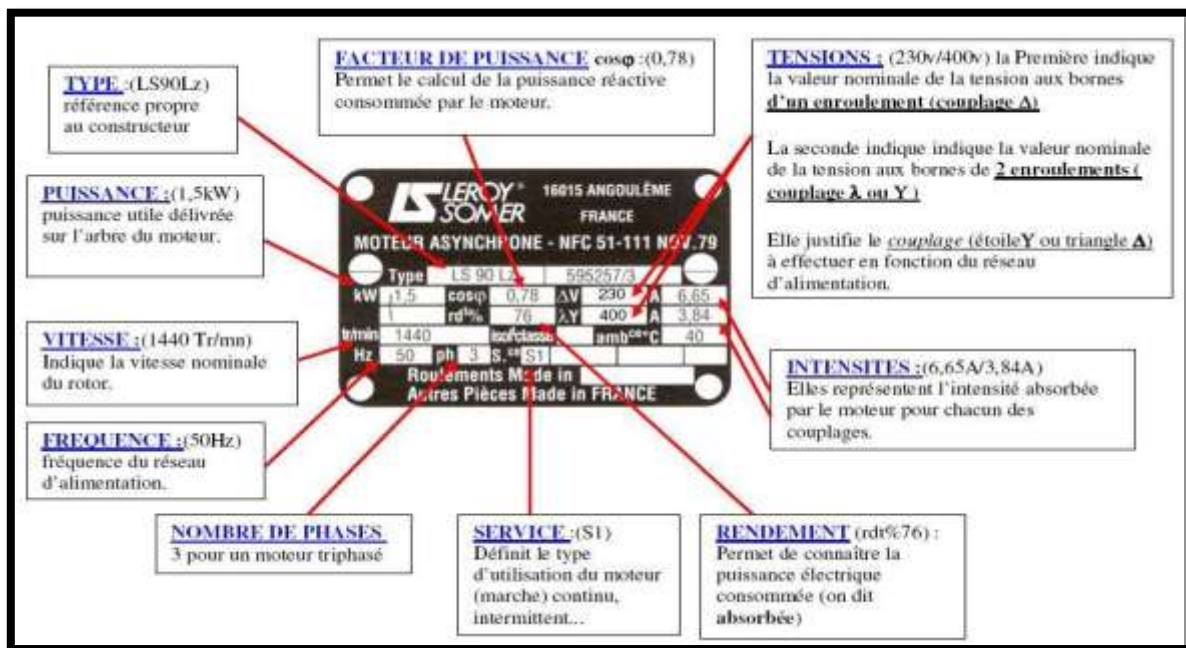


Figure I.3 : Représentation d'une plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé

I.2.2. Rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces, isolées entre elles, et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de plusieurs types différents :

a) Rotor bobiné (à bague)

Dans des encoches pratiquées à la périphérie du rotor sont logés des enroulements identiques à ceux du stator, généralement l'enroulement du rotor est en triphasé. Une extrémité de chacun des enroulements est reliée à un point commun (couplage étoile). Les extrémités libres peuvent être raccordées sur un coupleur centrifuge ou sur trois bagues en cuivre isolées du rotor, sur lesquelles frottent des balais en charbon [9]. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles [4].

b) Rotor à cage (rotor en court-circuit)

La figure I.4 montre ce type de rotor qui est constitué de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par deux anneaux de court-circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants induits. Pour les moteurs de faible puissance, les rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées les unes des autres (feuilletages) dans lesquelles on injecte un matériau conducteur de manière à constituer les barres ainsi que les anneaux de court-circuit. Pour les moteurs de forte puissance, les barres sont insérés dans le rotor puis les anneaux de court-circuit sont soudés ou brasés aux barres. Le matériau constituant les barres et les anneaux de court-circuit est généralement un alliage à base d'aluminium, mais on peut aussi rencontrer du cuivre ou du laiton. En général, les barres sont légèrement inclinées suivant l'axe du rotor afin que le nombre de barres présentés sous une phase statorique soit constant quelle que soit la position du rotor. Ce procédé permet de diminuer la variation de la réluctance du circuit magnétique au cours de la rotation du rotor et de diminuer ainsi les oscillations de couple.

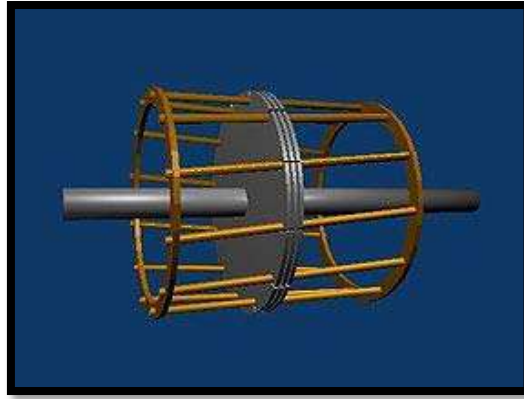


Figure I.4 : Structure d'un rotor à cage d'écureuil

c) Rotor à double cage

Il comporte deux cages concentriques, l'une extérieure de faible section et assez résistante (réalisée en laiton ou en bronze), l'autre intérieure (réalisée en cuivre) de forte section et de résistance plus faible. Au début du démarrage, le courant rotorique de fréquence égale à la fréquence du réseau d'alimentation, l'effet de peau qui en résulte fait que la totalité du courant rotorique circule à la périphérie du rotor. Le couple produit par la cage extérieure résistante est important et l'appel de courant réduit. Au contraire, lorsque le moteur atteint son régime nominal de fonctionnement, normalement caractérisé par un faible glissement, donc une fréquence rotorique basse, la cage interne de faible résistance est parcourue par la presque totalité du courant rotorique ce qui réduit le glissement donc les pertes rotoriques. On peut ainsi, obtenir des couples de démarrage de deux à trois fois supérieurs à ceux du rotor à simple cage sans trop augmenter le glissement nominal [4][9].

d) Rotor à double encoche ou à encoches profondes

Ce sont des rotors à cage (Figure I.5) qui utilisent l'effet de peau dans les conducteurs afin de faire varier la résistance du rotor en fonction de la vitesse de fonctionnement de la machine (l'effet de peau est un phénomène électromagnétique qui fait que plus la fréquence des courants augmentent, plus le courant n'a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs). Le fonctionnement est analogue au moteur à double cage et l'intensité du courant rotorique varie en fonction inverse de sa fréquence tandis que :

- Au début du démarrage, le couple est élevé et l'appel de courant réduit.
- En régime établi, la vitesse est sensiblement celle du moteur à simple cage [9].



Figure I.5 : Coupe d'un rotor à cage à encoches profondes

I.2.3. Paliers

Les paliers, permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre du rotor. Sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage.

I.3. Symboles électriques

La figure I.6 présente les symboles électriques utilisés pour les moteurs asynchrones triphasés (a : rotor bobiné, b : rotor à cage d'écureuil) :

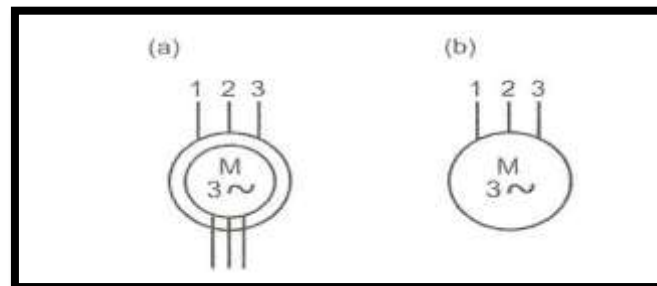


Figure I.6 : Symboles électrique des moteurs asynchrones triphasés

I.4. Classification des moteurs à cage d'écureuil [3][15][17]

Les moteurs à cage d'écureuil sont classifiés par La NEMA (National Electrical Manufacturers Association) comme suit:

Classe A : Moteurs à couple normal et à courant de démarrage normal.

Classe B : Moteurs à couple normal et à faible courant de démarrage.

Classe C : Moteurs à fort couple et à faible courant de démarrage.

Classe D : Moteurs à fort glissement.

Classe F : Moteurs à faible couple et à faible courant de démarrage.

Cette classification est basée sur la variation de la réactance des enroulements et la résistance du rotor. Au moment de démarrage, la réactance d'un conducteur est plus grande. La résistance dépend de la longueur du rotor, de la section des conducteurs et du matériau utilisé. Plus cette résistance est grande, plus le courant de démarrage est petit.

- Pour les moteurs de classe A (figure I.7.a), l'enroulement a une faible résistance. De même, la réactance est faible et presque uniforme pour tout le conducteur, il en résulte que le courant circule dans tout le conducteur. Le couple est normal et le courant de démarrage est suffisamment élevé pour nécessiter, dans la plupart des cas, l'ajout d'un compensateur ou d'un démarreur spécifique comme un autotransformateur, des résistances ou un démarreur électronique. Ce type de moteur ne se fabrique presque plus.
- Le moteur de classe B est souvent le plus utilisé. Ses caractéristiques découlent de l'emploi d'encoches profondes et étroites (figure I.7.b). Au moment du démarrage, la réactance est plus forte dans le bas du conducteur, ce qui force le courant à passer surtout dans le haut du conducteur, ce qui en réduit la surface active et augmente sa résistance. Le courant se trouve ainsi limité et on peut démarrer ce moteur à pleine tension.
- Un moteur de classe C comporte un rotor à double cage d'écureuil (figure I.7.c). On peut construire cet enroulement de plusieurs façons. Son principe consiste à placer un enroulement de forte résistance près de l'entrefer et un enroulement de faible résistance loin de la surface. Durant le démarrage, le conducteur éloigné de l'entrefer a une grande réactance, ce qui force le courant à passer dans le conducteur extérieur. Le courant est donc faible par contre le couple est fort. Lorsque le rotor a atteint sa pleine vitesse, la réactance du conducteur situé le plus loin de l'entrefer devient faible, la répartition du courant est alors à peu près uniforme dans tout le conducteur.
- Un moteur de classe D, à un enroulement d'une grande résistance en raison de sa faible section (figure I.7.d), ce qui lui confère au démarrage un fort couple ainsi qu'un faible courant. Par contre, il a un glissement à pleine charge qui peut atteindre 15 % et même 20%.

- Un moteur de classe F comporte des conducteurs rotoriques qui sont placés loin de l'entrefer (figure. I.7.e). Ce type de moteur a une réactance grande au moment du démarrage, par contre le courant est faible, mais le circuit est très inductif et le couple développé est faible.

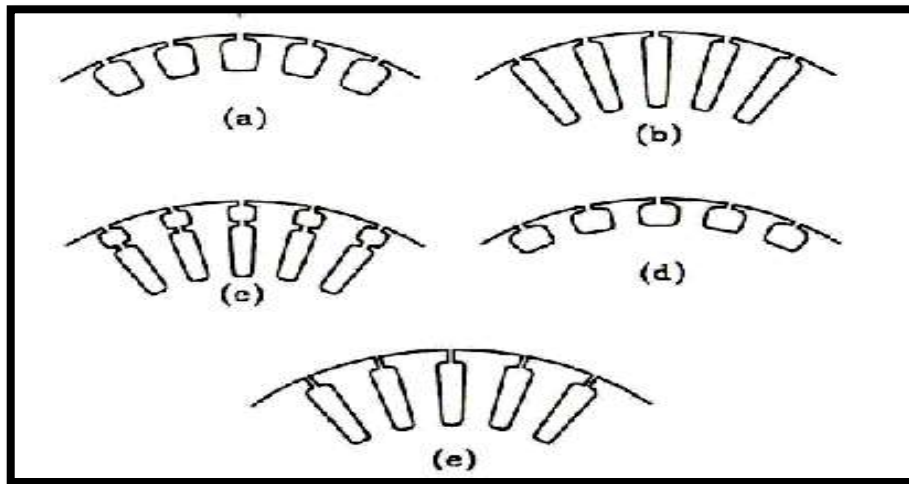


Figure I.7 : Formes d’encoches pour divers classes de moteurs
 a) Classe A, b) Classe B, c) Classe C, d) Classe D, e) Classe F [3]

I.5. Bobinage des moteurs asynchrones

L’enroulement (Figure I.8) est un conducteur électrique isolé et enroulé autour d’un support. Cet enroulement est utilisé pour la réalisation des bobinages des machines électriques et peut être constitué que d’une seule ou de plusieurs spires.

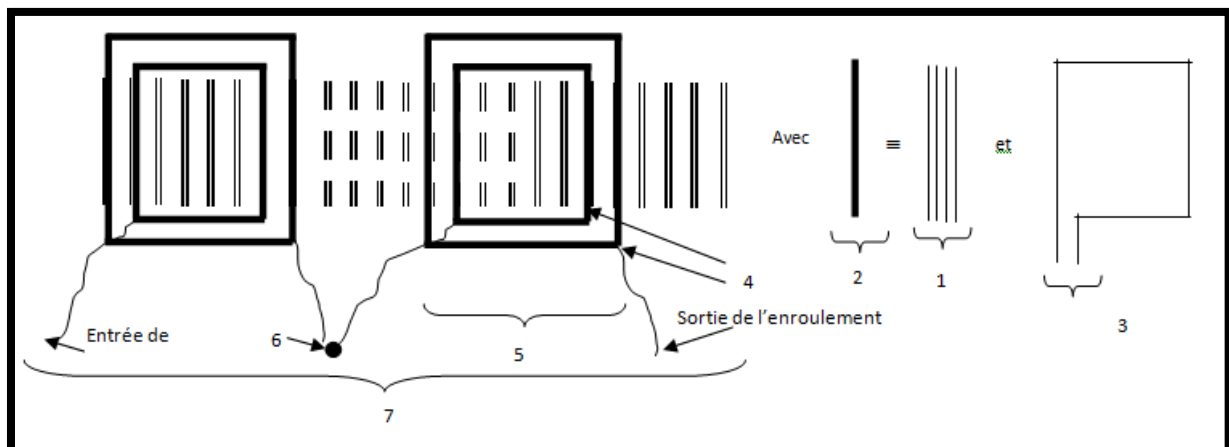


Figure I.8 : Représentation schématique des différents composants constituant un enroulement

Tableau I.2. Tableau récapitulatif des éléments constituant l'enroulement

1	Brins actifs	Conducteurs insérés dans une encoche
2	Faisceaux	Ensemble des brins actifs dans une encoche
3	Spire	Deux brins actifs reliés d'une encoche à l'autre
4	Bobine (ou petite bobine, ou section)	Ensemble de spires
5	Groupe de bobines	Ensemble de bobines réalisées les une à la suite des autres sur un gabarie concentrique et reliées de fait en série
6	Connexion	Liaison des groupes de bobines entre elles, en série ou parallèle
7	Enroulement (ou phase)	Ensemble de groupes de bobines

Le bobinage des machines asynchrones peut être effectué de plusieurs façons, mais généralement on utilise trois types d'enroulements : l'enroulement imbriqué, l'enroulement concentrique et l'enroulement ondulé. L'enroulement imbriqué est utilisé pour le bobinage des stators des moteurs ayant une puissance de quelques dizaines de kilowatts, par contre l'enroulement concentrique s'emploie généralement dans la construction des petits moteurs et l'enroulement ondulé est idéal pour les rotors des moteurs asynchrones à bagues [3].

I.5.1. Enroulement imbriqué à simple couche

Pour ce type d'enroulement chaque bobine occupe deux encoches et le nombre d'encoches doit être un multiple de deux fois le nombre de phases. La figure I.9 montre le cas d'un moteur triphasé à deux pôles dont le stator a 12 encoches. On compte quatre encoches par phase, ce qui indique qu'il faut deux bobines par enroulement. Chaque bobine doit couvrir 180° électriques, ce qui pour un moteur à deux pôles, correspond à 180° mécaniques. Il en résulte que le nombre d'encoches qui séparent les deux côtés d'une bobine doit correspondre à la moitié du nombre total d'encoche, soit six dans notre exemple. Le pas d'encoche montre la distance entre deux côtés d'une même bobine. Cependant le pas d'encoche est dit normal ou entier lorsque les deux côtés d'une bobine sont à 180° électrique. Puisque l'alimentation est triphasé équilibrée (les trois tensions sont de même amplitude et

déphasés de 120° électrique), les trois enroulements doivent présenter la même configuration physique et être décalés de 120° mécanique [3].

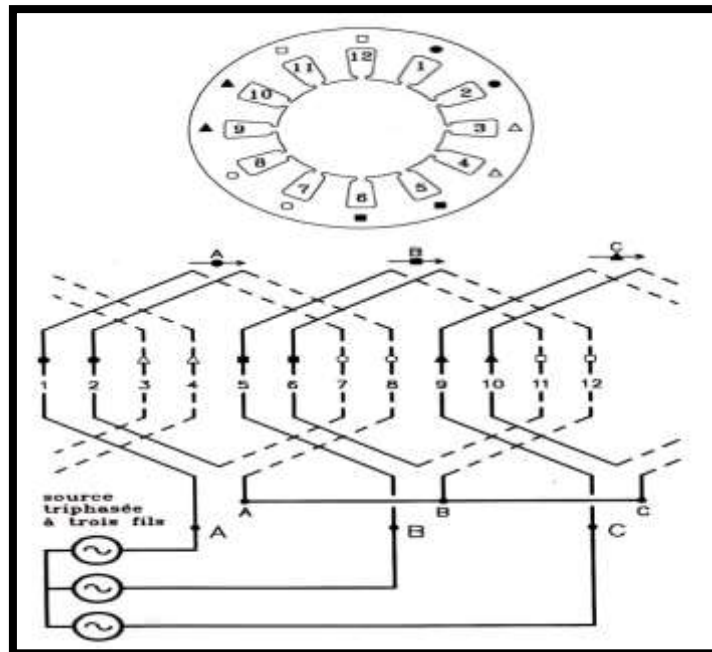


Figure I.9 : Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases d'un moteur à 2 pôles, 12 encoches avec des enroulements, qui ont un pas entier et sont placés à 120° électriques [3]

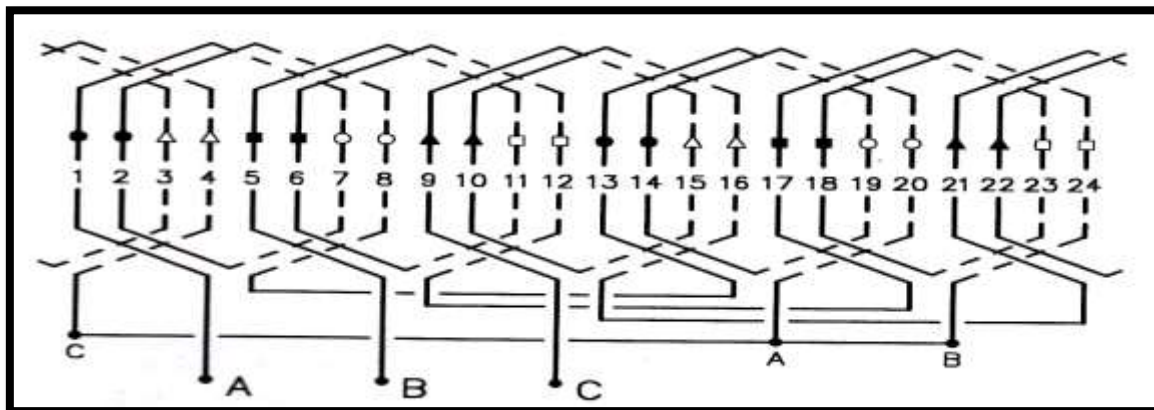


Figure I.10 : Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases d'un moteur à 4 pôles, 24 encoches. Les enroulements ont un pas entier et sont placés à 120° électriques [3]

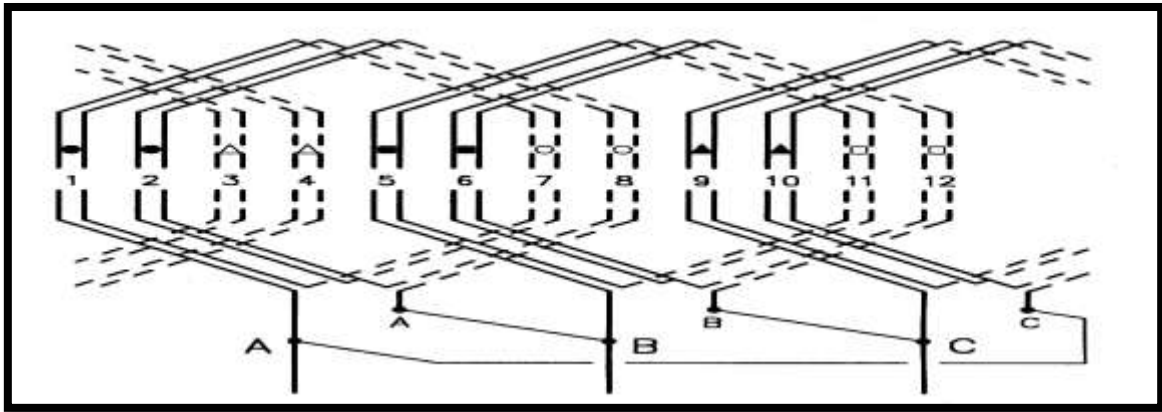


Figure I.11 : Enroulement imbriqué triphasé pour les trois phases d'un moteur à 2 pôles, 12 encoches, avec deux conducteurs par encoche. Les enroulements ont un pas entier et sont placés à 120° électrique [3]

I.5.2. Enroulement concentrique

Comme dans l'enroulement imbriqué à simple couche, chaque bobine occupe deux encoches. La différence réside dans les bobines, au lieu d'être toutes identiques et décalées d'une encoche les une par rapport aux autres, sont à l'intérieur d'une phase, de dimensions différentes et placées les unes autour des autres [3]

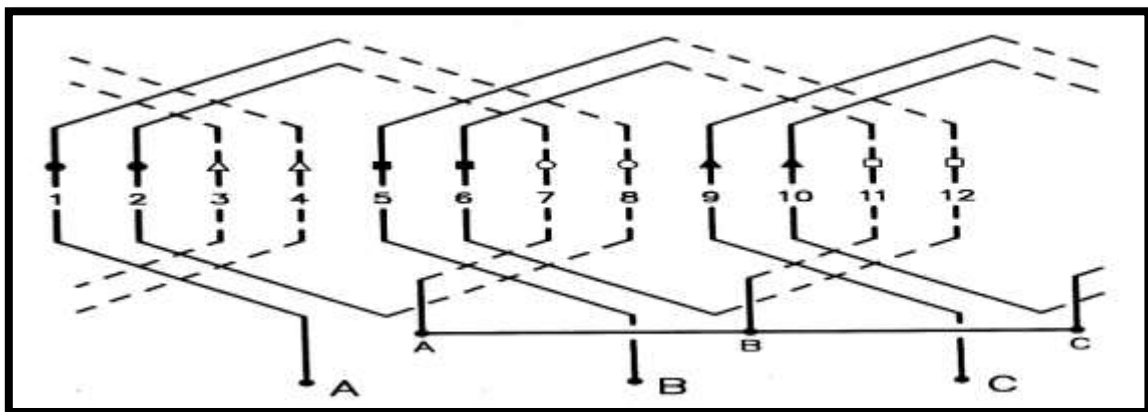


Figure I.12 : Enroulement concentrique triphasé pour les trois phases d'un moteur à 2 pôles, 12 encoches. Avec des enroulements qui sont placés à 120° électriques [3]

I.5.3. Enroulement imbriqué à double couche

Pour ce type d'enroulement chaque bobine est formée de la moitié des conducteurs contenus dans une encoche et disposés de façon que l'un des cotés de la bobine soit dans le haut d'une encoche (coté supérieur) et l'autre dans le fond (coté inférieur). Puisque les bobines de ce type d'enroulement n'occupent que la moitié de l'encoche, on peut modifier la

largeur et les placées dans une paire d'encoche qui ne correspond plus au pas d'encoche normal. Les bobines sont de largeur réduite et donnent un pas dit raccourci ou fractionnaire. Ce type de bobinage présente une amélioration du comportement du moteur [3].

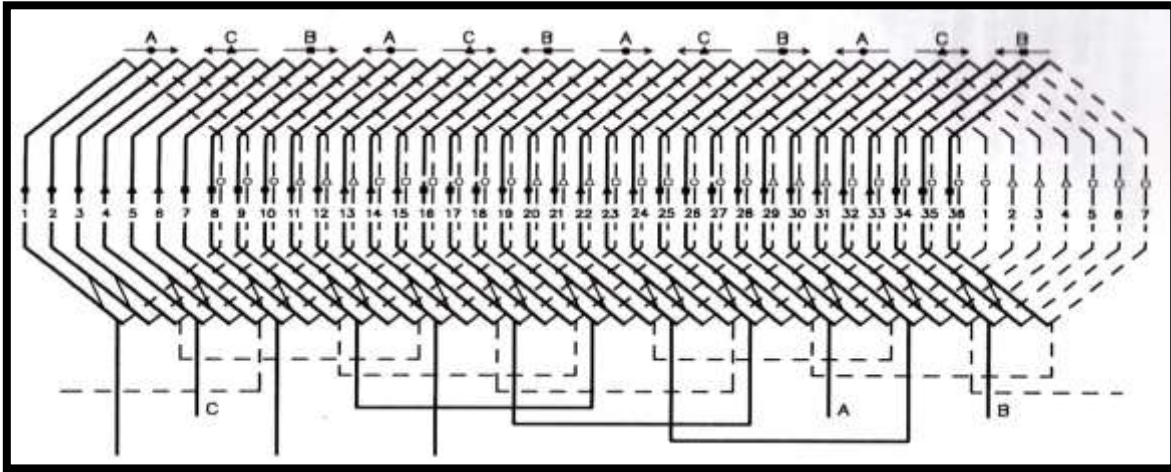


Figure I.13 : Enroulement imbriqué triphasé à double couche, pour les trois phases d'un moteur à 4 pôles, 36 encoches. L'enroulement a un pas fractionnaire de $7/9$, c'est-à-dire 140° électriques. Les enroulements sont placés à 120° électriques [3]

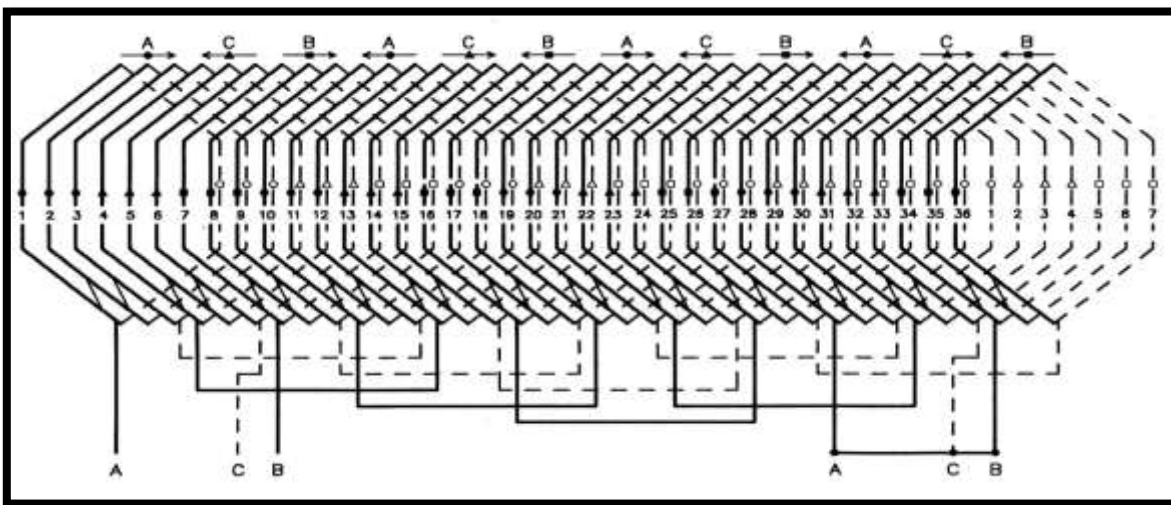


Figure I.14 : Enroulement imbriqué triphasé à double couche, pour les trois phases d'un moteur à 4 pôles, 36 encoches. L'enroulement a un pas fractionnaire de $7/9$, c'est-à-dire 140° électriques. Les enroulements sont placés à 60° électriques [3]

I.5.4. Enroulement ondulé

L'enroulement ondulé est habituellement un bobinage à double couche, le nombre d'encoche active doit être un multiple du produit du nombre de pôles et du nombre de phase.

Les conducteurs qui occupent des places analogues sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. On nomme le tronçon le circuit formé lorsque toutes les encoches d'une même phase contiennent un conducteur. Comme l'enroulement ondulé est à double couche il est possible de superposer un deuxième tronçon au premier, mais ce deuxième doit être bobiné en sens inverse et pour le bobinage des phases il faut toujours les séparer par 120° [3].

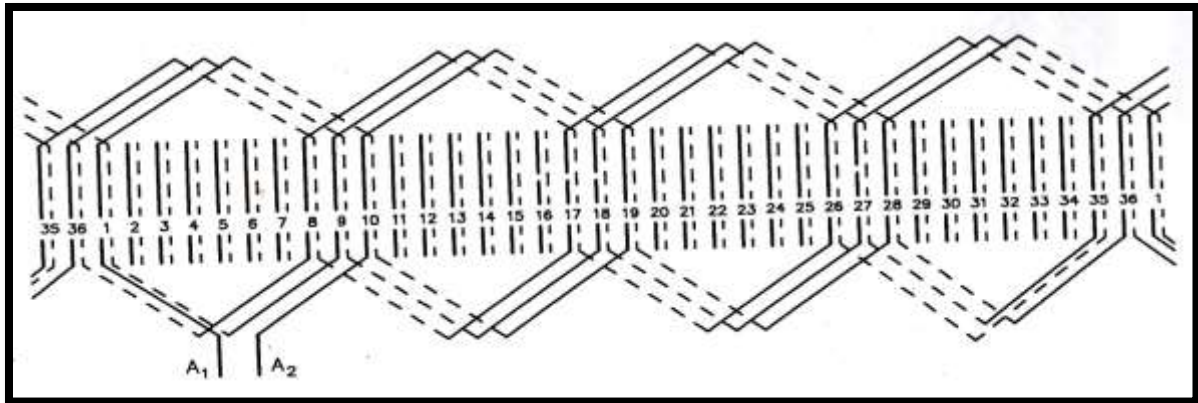


Figure I.15 : Enroulement ondulé pour une phase d'un moteur à 4 pôles, 36 encoches [3]

I.6. Isolation des moteurs asynchrones [3][17]

L'isolation entre les conducteurs, les bobines et le circuit magnétique peuvent s'effectuer en utilisant différents types de matériaux isolants, selon le domaine d'application et la température d'utilisation.

Dans le passé, parmi les principaux isolants on trouvait le coton, la soie, le papier et autre matériaux similaires, imprégnés ou non d'huile. On utilisait aussi des matières inorganiques comme le mica, l'amiante, la fibre de verre ...etc.

Par contre actuellement, en trouvant : le polyvinyle, le polyuréthane, le nylon, l'époxy et le polyester, qui ont des caractéristiques isolants et thermiques spécifiques.

I.7. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique [6].

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation

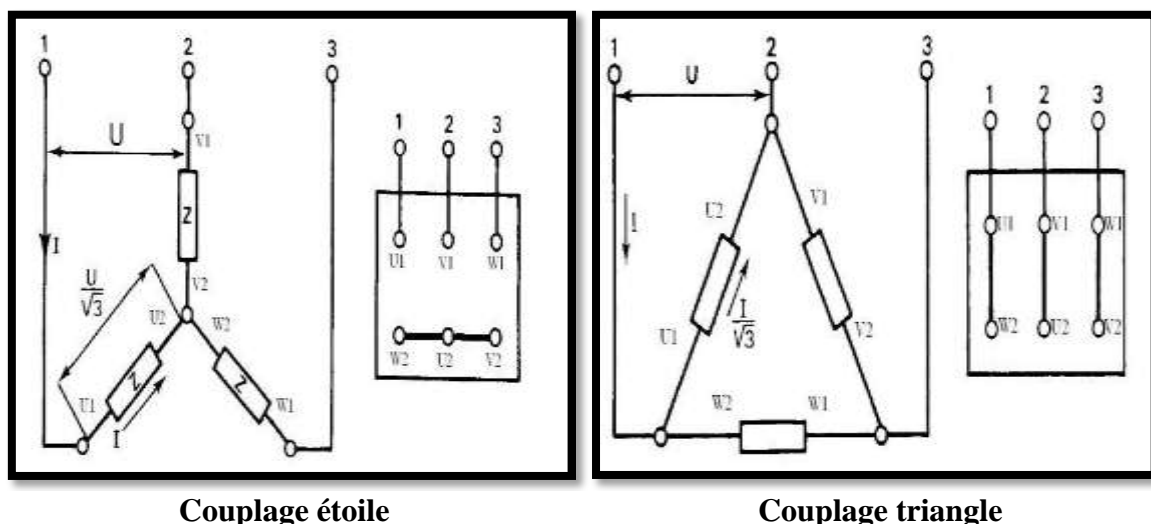
électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme. L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux, une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques, ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux, le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique. La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique, les courants s'annuleraient de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement. Lorsqu'il est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme (fonctionnement hypersynchrone) la machine fonctionne en générateur alternatif. Mais son stator doit être forcément relié au réseau car lui seul peut créer le champ magnétique nécessaire pour faire apparaître les courants rotoriques.

NB : Pour modifier le sens de rotation d'un moteur asynchrone triphasé, il suffit de permuter deux des trois phases.

I.8. Branchement des moteurs asynchrones triphasés

Il ya deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé : Le montage en étoile et le montage en triangle.

Avec un branchement en étoile, la tension aux bornes de chacune des bobines est d'environ 230(V). Par contre dans le montage en triangle, chacune des bobines est alimentée avec la tension nominale du réseau 400 (V).



Figures I.16 : Couplage étoile triangle d'un moteur asynchrone triphasé

I.9. Démarrage d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil

Le rotor d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil est au repos au moment où l'on ferme l'interrupteur pour brancher les enroulements statoriques, sur une ligne triphasée. A ce moment là, le champ tournant qui provient du stator coupe les conducteurs du rotor et il engendre une tension dans ceux-ci. Cette tension est alternative, car les conducteurs sont tantôt devant un pôle nord, tantôt devant un pôle sud du champ tournant. Les conducteurs étant court-circuités à leurs extrémités par les deux anneaux, la tension induite fait circuler des courants. La résistance et l'inductance offertes par la cage sont très faibles et les courants sont intenses (quelques centaines d'ampères pour les machines de moyenne puissance). Les mêmes conducteurs du rotor portant ces courants se trouvent toujours dans le chemin du flux provenant du stator, ils sont alors soumis à des forces électromagnétiques considérables. Les forces ainsi produites tendent à entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ [2].

I.9.1. Problèmes de démarrages

Lorsque en démarre un moteur asynchrone triphasé, la tension induite au rotor est maximale, le courant dans les conducteurs du rotor est élevé. Ce courant produit dans le stator un courant plus grand que le courant nominal. Mais ce courant n'endommage pas le moteur, car le démarrage est de courte durée, mais il entrain toutefois une chute de tension dans tous les appareils branchés en parallèle avec le moteur. Pour cela, il est nécessaire de réduire le courant de démarrage des moteurs [11].

I.9.2. Différents types de démarrages

En fonction des caractéristiques et de la charge d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, plusieurs méthodes de démarrages sont utilisées. Le choix sera détecté par des impératifs électriques, mécaniques et économiques.

I.9.2.1. Démarrage direct

C'est le mode de démarrage le plus simple dans lequel le stator est directement couplé sur le réseau. Au moment de la mise sous tension, le moteur se comporte comme un transformateur dont le secondaire, constitué par la cage du rotor très peu résistante, est en court-circuit. Dans ce cas le courant de démarrage (I_d) est 5 à 8 fois plus grand que le courant nominal (I_n). Ainsi que le couple de démarrage (C_d), est de 0.5 à 1.5 du couple nominal (C_n).

Malgré les avantages qu'il présente : simplicité de l'appareillage, couple de démarrage élevé, démarrage rapide, prix faible...etc. Ce type de démarrage provoque un

démarrage brutal avec un appel du courant qui est important. Le démarrage direct ne peut convenir que dans les cas où :

- La puissance du moteur est faible par rapport à la puissance du réseau, de manière à limiter les perturbations dues à l'appel de courant.
- La machine entraînée ne nécessite pas une mise en vitesse progressive où comporte un dispositif amortisseur qui réduit le choc du démarrage.
- Le couple de démarrage peut être élevé sans incidence sur le fonctionnement de la machine ou de la charge entraînée.

Les figures (B.1 et B.2) présentées dans l'annexe B, indiquent les schémas fonctionnels pour le démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil avec leurs circuits puissances et commandes.

I.9.2.2. Démarrage sous tension réduite

Durant la durée de démarrage du moteur, plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator, ce qui présente un moyen pour limiter l'intensité du courant de démarrage. L'inconvénient est que le couple moteur est diminué et que cela augmente la durée avant laquelle la machine atteint le régime permanent.

a) Démarrage étoile-triangle

Ce type de démarrage consiste à démarrer le moteur en couplant les enroulements en étoile sous la tension du réseau, ce qui revient à diviser la tension nominale du moteur en étoile par $\sqrt{3}$. Dans ce cas la pointe du courant de démarrage est divisée par 3. Le courant de démarrage (I_d) devient égale à 1.5 jusqu'à 2.6 du courant nominal (I_n). En effet, un moteur de 380 V/660 V couplé en étoile sous sa tension nominale 660 V absorbent un courant $\sqrt{3}$ fois plus faible qu'en couplage triangle sous 380 V. Le couplage étoile étant effectué sous 380 V, le courant est divisé une nouvelle fois par $\sqrt{3}$ donc au total par 3. Le couple de démarrage étant proportionnel au carré de la tension d'alimentation, il est lui aussi divisé par 3 ce qui donne un couple de démarrage (C_d) qui varient entre 0.2 à 0.5 du couple nominal (C_n).

La vitesse du moteur se stabilise quand les couples moteur et résistant s'équilibrent, généralement entre 75% et 85 % de la vitesse nominale. Les enroulements sont alors couplés en triangle et le moteur rejoint ses caractéristiques naturelles. Le passage du couplage étoile au couplage triangle est commandé par un temporisateur. La fermeture du contacteur triangle s'effectue avec un retard de 30 à 50 milli secondes après l'ouverture du contacteur étoile, ce qui évite un court-circuit entre phases, les deux contacteurs ne pouvant être fermés

simultanément. Le courant qui traverse les enroulements est interrompu à l'ouverture du contacteur étoile, il se rétablit à la fermeture du contacteur triangle. Ce passage en triangle s'accompagne d'une pointe de courant transitoire très brève mais très importante, due à la force contre-électromotrice du moteur. Ce type de démarrage convient aux machines qui ont un faible couple résistant. Ce démarrage comporte plusieurs avantages : Appel de courant en étoile réduit au tiers de sa valeur en direct, faible complication d'appareillage...etc. Mais il a aussi des inconvénients tandis que un couple réduit au tiers de sa valeur en direct, coupure entre les positions étoile et triangle d'où apparition de phénomènes transitoires.

Les figures (B.4 et B.5) présentées dans l'annexe B, indiquent les Schémas fonctionnels pour le démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil avec leurs circuits puissances et commandes.

b) Démarrage par autotransformateur

Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur. Sa portion de bobinage est en série avec le moteur est court-circuitée, puis l'autotransformateur est mis hors circuit quand le démarrage est terminé. Ce type de démarrage est généralement utilisé pour les moteurs de puissance supérieure à 150 kW. Mais il conduit à des équipements relativement coûteux en raison du prix élevé de l'autotransformateur. Ce type de démarrage s'effectue en trois étapes :

- Au premier temps, l'autotransformateur est d'abord couplé en étoile, puis le moteur est couplé au réseau à travers une partie des enroulements de l'autotransformateur. Le démarrage s'effectue sous une tension réduite qui est fonction du rapport de transformation. L'autotransformateur est généralement muni de prises permettant de choisir le rapport de transformation, donc la valeur de la tension réduite la mieux adaptée.
- Avant de passer au couplage plein tension, l'entoilage est ouvert. La fraction de bobinage raccordée au réseau constitue alors une inductance en série avec le moteur. Cette opération est effectuée lorsque la vitesse d'équilibre est atteinte à la fin du premier temps.
- Le couplage plein tension intervient après le deuxième temps généralement très court.

Le courant de démarrage (I_d) obtenu vaut 1.7 à 4 fois le courant nominal (I_n), par contre le couple de démarrage (C_d) égal 0.5 à 0.85 fois le couple nominal (C_n).

Les figures (B.6 et B.7) présentées dans l'annexe B, montrent les Schémas fonctionnels pour le démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil avec leurs circuits puissances et commandes

c) Démarrage par des résistances statoriques

Ce type de démarrage consiste à démarrer le moteur sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements. Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont éliminées et le moteur est couplé directement sur le réseau. Cette opération est généralement commandée par un temporisateur. La valeur de la résistance est calculée en fonction de la pointe de courant au démarrage à ne pas dépasser, ou de la valeur minimale du couple de démarrage nécessaire compte tenu du couple résistant de la machine entraînée. Ce mode de démarrage convient aux machines ayant un couple résistant croissant avec la vitesse, comme par exemple les ventilateurs ou les pompes centrifuges. Il présente l'inconvénient d'une pointe de courant relativement importante au démarrage. Cette pointe pourrait être réduite en augmentant la valeur de la résistance, mais cela entraînerait une chute de tension supplémentaire aux bornes du moteur, et par conséquent une diminution importante du couple de démarrage. En général, la valeur du courant de démarrage (I_d) égale à 4.5 fois celle du courant nominal (I_n) et le couple de démarrage (C_d) vaut 0.75 fois le couple nominal (C_n).

Les figures (B.8 et B.9) présentées dans l'annexe B, indiquent les Schémas fonctionnels pour le démarrage par des résistances statotique d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil avec leurs circuits puissances et commandes.

d) Démarrage par gradateur de tension

Le gradateur (Figure B.10) est un convertisseur qui permet de transformer une source de tension sinusoïdale alternative de valeur efficace fixe en une tension alternative de valeur efficace variable de même fréquence. Le gradateur se comporte comme un interrupteur. Il permet d'établir ou d'interrompre la liaison entre la source de tension et le récepteur. La tension aux bornes du récepteur évolue en fonction de la commande de l'interrupteur. Le réglage de l'intensité du courant débité par la source permet de moduler l'énergie absorbée par le récepteur.

Le moteur asynchrone triphasé est alimenté par l'intermédiaire d'un gradateur (Figure B.11) qui provoque la montée progressive de la tension. On peut réduire l'intensité de démarrage à une valeur précise en agissant sur l'angle de commande des thyristors.

Pour limiter l'appel de courant au démarrage, on réduit la tension efficace ce qui limite le couple moteur au démarrage. On doit donc s'assurer en permanence que le couple de démarrage soit supérieur au couple résistant du système à entraîner.

I.10. Freinage des moteurs asynchrones triphasés

On peut utiliser plusieurs types de freinage :

I.10.1. Arrêt en roue libre

Dans ce cas on va mettre hors tension le stator du moteur.

I.10.2. Arrêt piloté

Pour ce type de freinage la tension statorique sera passée à une tension nulle progressivement. On peut utiliser deux méthodes :

a) Freinage hypersynchrone

Dans ce cas le moteur est couplé à un variateur de fréquence qui diminue progressivement la vitesse du moteur lorsque la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse du champ tournant. Le couple de freinage est élevé à condition de générer un champ correspondant à la valeur de glissement optimal du fonctionnement en génératrice, et de maintenir la décélération dans ce domaine jusqu'à l'arrêt complet. Cette méthode est particulièrement efficace pour freiner rapidement une machine asynchrone sans dispositif mécanique additionnel.

c) Freinage par injection de courant continu

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement.

I.10.3. Arrêt à contre-courant

Ce type de freinage consiste à inverser deux phases pendant un court instant. Ceci est donc équivalent à un freinage hypersynchrone à fréquence fixe. Le couple résistant est faible et le courant appelé est également très important. La conséquence en est que les enroulements du moteur risquent un sur-échauffement (il est conseillé de prévoir des résistances supplémentaires afin de diminuer l'intensité). Enfin, avec cette méthode, le couple décélérateur reste négatif même lorsque la vitesse est nulle, il faut donc prévoir de couper

l'alimentation quand la vitesse est nulle (temporisation, contact centrifuge), sinon la rotation s'inverse.

I.10.4. Freinage mécanique par électro-frein

Le système est constitué d'un frein à disque solidaire de l'arbre de la machine asynchrone et dont les mâchoires initialement serrées hors tension sont commandées par un électroaimant. Après alimentation de l'électroaimant, les mâchoires se desserrent laissant la rotation libre. La coupure de l'alimentation provoque le freinage. Ce dispositif aussi appelé « frein à manque de courant » est souvent prévu comme dispositif d'arrêt d'urgence.

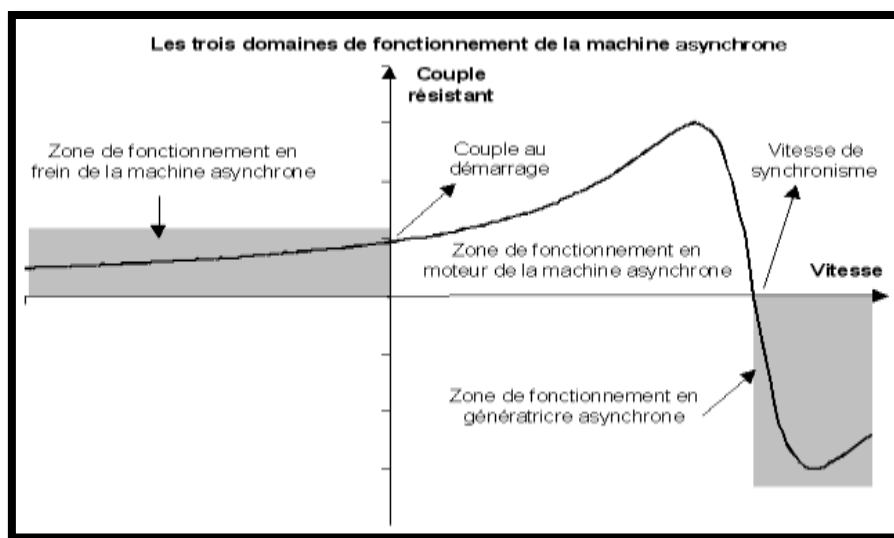


Figure I.17 : Les domaines de fonctionnement de la machine asynchrone triphasé

I.11. La vitesse de synchronisme [9]

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paire de pôles du stator. Cette vitesse est donnée par la relation suivante :

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{I-1})$$

Avec :

n_s : Vitesse de synchronisme en (tr/min).

f : Fréquence en (Hz).

p : Nombre de paires de pôles.

I.12. Le champ tournant [9]

Le stator d'un moteur asynchrone triphasé est composé de trois enroulements, géométriquement décalés de 120° , sont alimentés par un réseau alternatif triphasé (figure I.18). Ils produisent chacun un champ magnétique alternatif sinusoïdal. Ce champ toujours dirigé suivant le même axe, est maximal quand le courant dans l'enroulement est maximal.

Donc les courants statoriques créent un flux magnétique, appelé champ tournant qui tourne à la vitesse de synchronisme Ω_s .

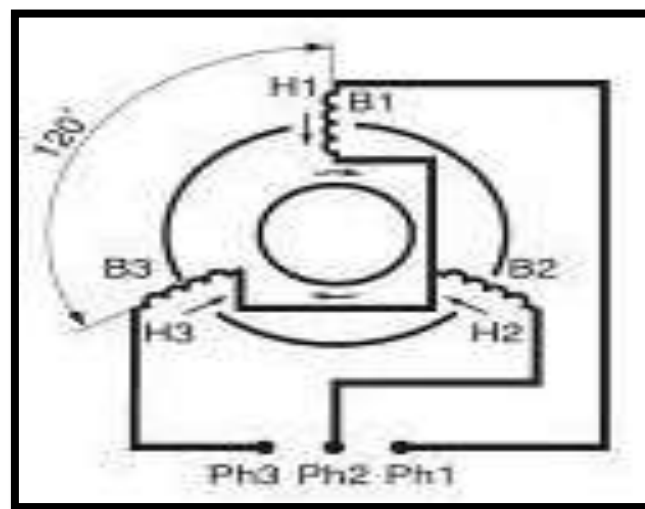


Figure I.18 : principe d'un moteur asynchrone triphasé [9]

I.13. Glissement [8]

Le moteur est dit asynchrone car il est impossible au rotor d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. Le rotor a toujours un temps de retard sur les courants statoriques. Si le rotor arrivait à tourner à la même vitesse que le champ magnétique tournant, l'ensemble des conducteurs constituant le rotor seraient plongés dans un flux magnétique qui pour eux, deviendrait constant. De fait, les courants rotoriques ne seraient pas induits et ne pourraient pas produire de couple. Donc le rotor du moteur ne serait alors plus entraîné.

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée le glissement, nous le noterons s . Le glissement dépend de la charge mécanique du moteur : plus le moteur doit délivrer un couple important, plus le rotor glisse. En effet, on peut imaginer qu'un rotor ayant une charge plus importante ait plus de difficulté à suivre le champ magnétique.

Le glissement est défini par les vitesses de synchronisme et du rotor selon la relation suivante :

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{I-2})$$

Ω_s et n_s : Vitesse de synchronisme.

Ω et n : Vitesse de rotation du rotor.

Ω et Ω_s en (rad/s).

n et n_s en (tr/s) ou bien en (tr/min).

$0 < s \leq 1$: $s = 1$ (moteur à l'arrêt) et $s \approx 0$ (à vide).

I.14. Bilan de puissance et des pertes [8]

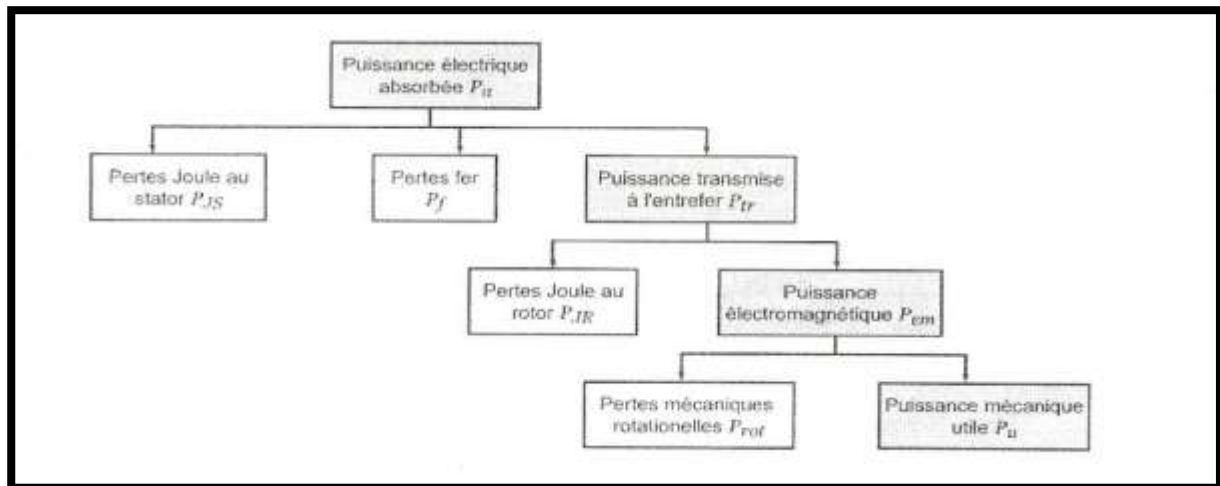


Figure I.19 : Bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée P_a . Une partie P_{js} de cette puissance est dissipée par effet Joule dans les enroulements du stator. Par la suite, le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer P_{fe} , par hystérésis et par courant de Foucault. Le reste de la puissance P_{tr} est transmis au rotor à travers l'entrefer. La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromagnétique P_{em} , tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet Joule P_{jr} . La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile P_u qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission ou d'une courroie de distribution. Toutefois, dans le mouvement du rotor, une partie de la puissance est perdue par divers mécanismes de frottements, c'est ce que l'on appelle les pertes rotationnelles P_{rot} .

I.14.1. La puissance absorbée

La puissance absorbée par un moteur asynchrone est une puissance active électrique. Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé, P_a est donné par la relation suivante :

$$P_a = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (\text{I-3})$$

U : La tension composée aux bornes du moteur (V).

I : Le courant de ligne (A).

$\cos \varphi$: Le facteur de puissance du moteur.

I.14.2. Les pertes par effet Joule au stator P_{js}

Le stator peut être câblé en étoile ou en triangle. Puisque le moteur constitue un récepteur triphasé équilibré, alors :

$$P_{js} = \frac{3}{2} \cdot R_1 \cdot I^2 \quad (\text{I-4})$$

R_1 : La résistance entre deux bornes (Ω).

Dans le montage étoile, la résistance entre deux bornes R_1 est reliée à la résistance de chaque enroulement r par la relation :

$$R_1 = 2 \cdot r \quad (\text{I-5})$$

Dans le montage triangle, cette relation devient :

$$R_1 = \frac{2}{3} \cdot r \quad (\text{I-6})$$

I.14.3. Les pertes fer

Les pertes fer sont fonctions du flux magnétique. Elles ne dépendent donc que de la tension d'alimentation et de la fréquence des courants statoriques. Les pertes fer peuvent être considérées comme constantes quelle que soit la charge du moteur.

Dans la pratique, les pertes fer sont mesurées lors d'un essai à vide, en même temps que les pertes rotationnelles.

I.14.4. La puissance transmise dans l'entrefer P_{tr}

P_{tr} représente la puissance transmise au rotor à travers l'entrefer, est la partie de puissance absorbée qui n'est pas perdue dans les enroulements du stator et dans le fer. Cette puissance est donnée par la relation suivante :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fe}) \quad (\text{I-7})$$

I.14.5. Pertes Joule au rotor P_{jr}

P_{jr} représente les pertes Joule au rotor qui dépend du glissement. En effet ces pertes sont représentées par la relation ci-dessous :

$$P_{jr} = s \cdot P_{tr} \quad (\text{I-8})$$

I.14.6. Puissance électromagnétique P_{em} et moment du couple électromagnétique C_{em} :

La puissance électromagnétique P_{em} transmise au rotor est égale à :

$$P_{em} = P_{tr} - P_{jr} = (1 - s) \cdot P_{tr} \quad (\text{I-9})$$

Le rotor tournant à la vitesse Ω , est soumis à un couple électromagnétique C_{em} et reçoit par conséquent une puissance électromagnétique égale à :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega \quad (\text{I-10})$$

On peut montrer que :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \quad (\text{I-11})$$

I.14.7. Pertes mécaniques rotationnelles

Ces pertes dépendent uniquement de la vitesse de rotation du moteur. Dans un moteur asynchrone triphasé, les pertes rotationnelles seront par conséquent considérées comme constantes, et déterminées à l'aide d'un essai à vide.

I.14.8. Puissance mécanique et couple utiles P_u et C_u

Le rotor déploie un couple utile C_u à la vitesse Ω . Il délivre alors la puissance utile P_u telle que :

$$P_u = C_u \cdot \Omega \quad (\text{I-12})$$

I.14.9. Rendement

Le rendement du moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile mécanique qu'il fournit et la puissance électrique qu'il absorbe, de sorte que :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I-13})$$

On peut aussi écrire :

$$\eta = \frac{P_a - \text{Pertes}}{P_a} = \frac{P_a - P_{js} - P_{fe} - P_{jr} - P_{rot}}{P_a} \quad (\text{I-14})$$

I.14.10. Détermination des pertes constantes

Les pertes constantes P_c (pertes collectives), regroupent les pertes fer et les pertes rotationnelles. Pour les déterminer, on réalise un essai à vide. On voit que :

$$P_{uo} = P_{ao} - P_{jso} - P_c - P_{jro} \quad (\text{I-15})$$

On a dans l'essai à vide, le glissement est nul : $s_0 = 0$, donc $P_{jro} = 0$. De plus, le moteur ne délivre pas de puissance utile, donc $P_{uo} = 0$. En remplaçant ces valeurs dans l'équation précédente on obtient :

$$P_c = P_{ao} - P_{jso} \quad (I-16)$$

I.15. Facteur de puissance [7]

φ représente l'angle de déphasage du courant I par rapport à la tension U . Le $\cos \varphi$, appelé facteur de puissance, est le rapport entre la puissance active et la puissance totale (active + réactive). Un $\cos \varphi$ égal à 1 est l'idéal, car il n'y a aucune puissance réactive consommée. La valeur du facteur de puissance d'un moteur asynchrone triphasé baisse beaucoup quand la charge du moteur diminue. Il faut donc éviter d'installer des moteurs plus puissants qu'il est nécessaire. Les moteurs asynchrones triphasés sont réalisés de manière à obtenir un bon rendement et un bon $\cos \varphi$ pour une utilisation proche du point nominal de fonctionnement. En effet, les moteurs asynchrones triphasés sont utilisés en général à leur puissance nominale.

I.16. Caractéristique mécanique

La caractéristique mécanique présente la variation du couple en fonction de la fréquence de rotation du moteur. Cette caractéristique présente trois points importants :

- Un point qui correspond au couple de démarrage.
- Un point qui correspond au couple maximum.
- Un point qui correspond au fonctionnement à vide, dans ce cas le couple est nul et le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

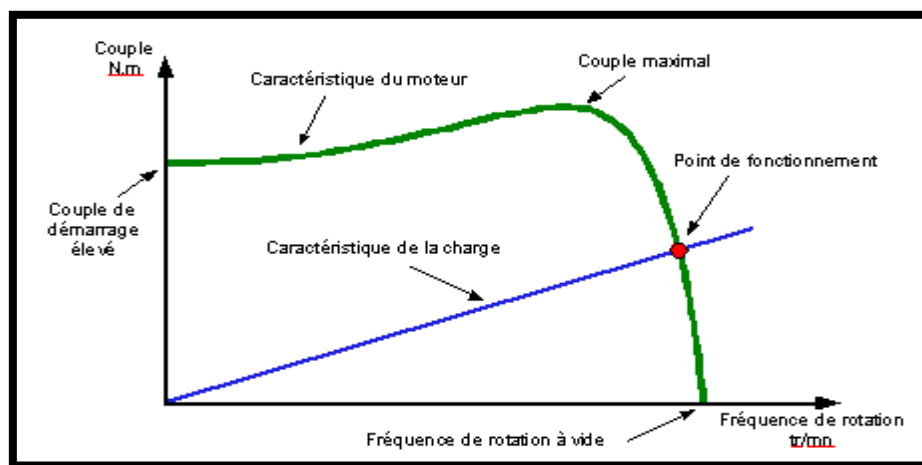


Figure I.20 : Caractéristique mécanique d'un moteur asynchrone triphasé

I.17. Caractéristique de courant $I = f(\Omega)$ [10]

L'intensité du courant de démarrage est supérieure à l'intensité nominale I_n . Ainsi que cette intensité du courant diminue lorsque la vitesse de rotation Ω augmente, autrement on peut dire que l'intensité du courant en ligne augmente avec le glissement. Cette figure montre l'évolution du courant I en fonction de la vitesse de rotation Ω .

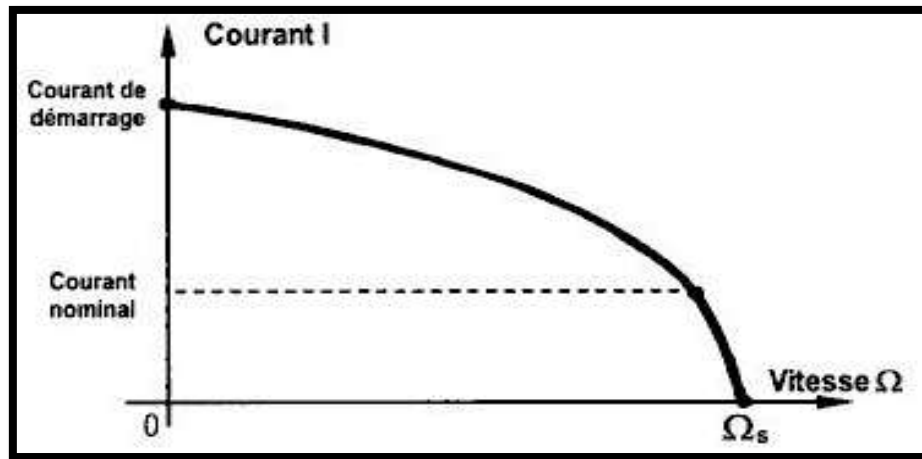


Figure I.21 : Variation de l'intensité du courant I en fonction de la vitesse Ω [10]

I.18. Essais sur un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil [2]

I.18.1. Essai à vide

Lorsque le moteur tourne à vide, le glissement est pratiquement nul ($s = 0$ et $n = n_s$) en outre le facteur de puissance est très faible ($\cos \varphi < 0,2$), donc le courant absorbé est élevé, ainsi il est composé en majeure partie d'un courant magnétisant qui produit le flux tournant et d'une faible composante active pour fournir les pertes par frottement et aération, plus les pertes dans le fer, par contre la puissance réactive consommée est élevée.

I.18.2. Essai en charge

Lorsqu'en mettant le moteur en fonctionnement avec une charge, il ralentit. Le champ tournant coupe alors les barres du rotor à une vitesse relative plus grande. Il en résulte que la tension induite et le courant dans le rotor augmentent de façon à développer un couple suffisant pour vaincre la charge mécanique à entraîner. La vitesse se stabilise lorsque le couple développé par le moteur est exactement égal au couple imposé par la charge. Notant que la diminution de vitesse est très petite. Même à pleine charge, le glissement du rotor ne dépasse guère 0,5 % de la vitesse synchrone pour les gros moteurs (1000 KW et plus) et 3 % pour les petits (10 KW et moins).

Le tableau A.4 présenté dans l'annexe A montre les caractéristiques des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil.

I.19. Variation de vitesse d'un moteur asynchrone triphasé

Pour faire varier la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé, en agissant sur le couple qu'elle produit, soit si l'on se réfère : le nombre de paires de pôles, la tension d'alimentation de la machine, le glissement ou la fréquence d'alimentation de la machine.

I.19.1. Réglage par variation du nombre de paires de pôles [12]

Ceci donnant une variation non continue de la vitesse ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré.

I.19.2. Réglage par variation de tension [12]

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un gradateur triphasé. Cette solution est le plus souvent utilisée pour le démarrage de charges à caractéristique de couple quadratique.

I.19.3. Réglage par action sur le glissement [12]

L'utilisation de résistances rotorique permet un réglage de la vitesse au dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la cascade hyposynchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné.

I.19.4. Réglage par variation de fréquence

On peut varier la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé, en agissant sur la fréquence de rotation du champ magnétique et donc la fréquence du courant d'alimentation. Pour cela on utilise les variateurs de vitesses qui sont des variateurs de fréquence. Le courant électrique issu du réseau est dans un premier temps converti en courant continu, il est ensuite reconverti en courant alternatif par un onduleur mais avec une fréquence différente. Les variateurs de fréquence permettent :

- Une gamme de vitesses de 5% à 200% de la vitesse nominale.
- Une conservation du couple sur toute la gamme de vitesses.
- Des rampes d'accélération et de décélération.

- Deux sens de rotation.

I.20. Tension et fréquence induite dans le rotor [2]

La tension et la fréquence induites dans le rotor dépendent du glissement. Elles sont données par les relations ci-dessous :

$$f_2 = s \cdot f \quad (\text{I-17})$$

$$E_2 = s \cdot E_{co} \quad (\text{I-18})$$

Avec :

f_2 : Fréquence dans le rotor (Hz).

f : Fréquence du réseau alimentant le stator (Hz).

s : Glissement.

E_2 : Tension induite dans le rotor à circuit ouvert (V).

E_{co} : Tension induite dans le rotor, à circuit ouvert, le rotor étant immobile (V).

I.21. Effet de la résistance du rotor [2]

Si l'on augmente la résistance du rotor, la courbe du couple en fonction de la vitesse change. Le couple de décrochage demeure le même, mais il est développé à une vitesse plus basse.

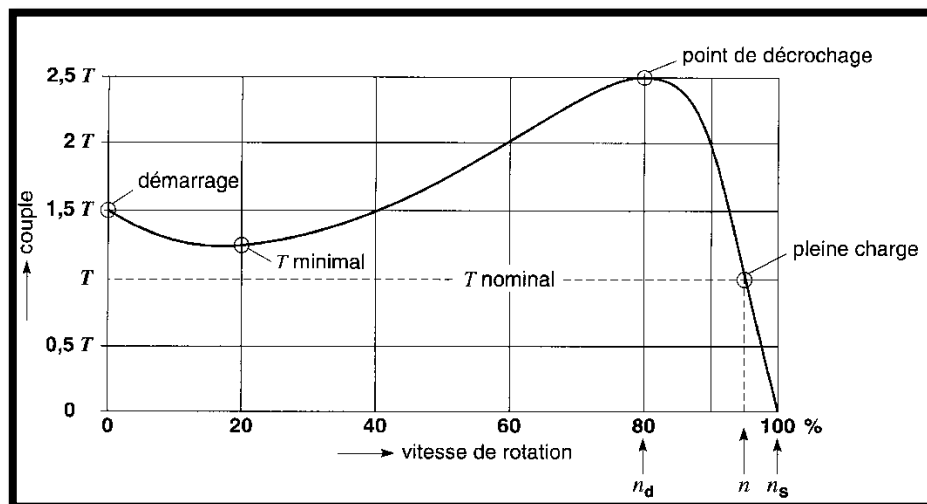


Figure I.22 : Variation du couple en fonction de la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé de 1 KW [2]

I.22. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué d'une manière générale une présentation des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, du point de vue construction à savoir, le stator et les différents types du rotor. Nous avons aussi présenté le principe de fonctionnement ainsi que les différents modes de bobinages, et ces modes de démarrages et de freinages, avec une illustration des différentes caractéristiques du moteur.

Chapitre II

Dimensionnement d'un

moteur asynchrone triphasé

à cage d'écureuil

II.1. Introduction

La conception des machines électriques est en pleine évolution. En effet, l'intensification de la concurrence économique force les entreprises à accélérer le renouvellement de leurs produits et la mise en œuvre de technologies innovantes. Les ingénieurs et chercheurs se trouvent confrontés à ce nouveau défi qui consiste à faire face à une complexité croissante dans des délais d'études toujours plus courts. Dans le domaine des machines électriques, les progrès ont été considérables et se traduisent par une qualité et une quantité de services rendus importantes dans un encombrement réduit. Les machines électriques ont encore une marge considérable d'amélioration du fait des nouveaux matériaux, de l'utilisation croissante de l'électronique de puissance, et de la montée en puissance de la commande en temps réel. L'instrumentation scientifique de la démarche de conception est une activité de recherche importante. Son objectif principal est de permettre l'exploration systématique de l'espace des solutions envisageables par l'emploi d'outils et de méthodologies adaptés.

La démarche de dimensionnement et de conception des machines électriques semble simple et séquentielle. À partir d'un cahier des charges clairement exprimé, le concepteur a la tâche de le traduire dans l'un des formalismes mathématiques qui peut être résolu au moyen d'un algorithme ou méthode d'optimisation. Enfin, l'exploitation et l'analyse des résultats par le concepteur expert permettent de valider la solution optimale obtenue.

Dans ce chapitre on s'intéresse au dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil en vue de son optimisation pour satisfaire un cahier de charge bien déterminé.

II.2. Dimensionnement du moteur

Ils existent plusieurs méthodes pour le dimensionnement des machines électriques. Tout au long de notre recherche nous nous sommes trouvés devant plusieurs sortes de techniques de conception, chacun à sa propre méthode, mais la méthode en général ne change pas puisque on remarque toujours un même cheminement qui autorise à dimensionner le stator suivi par un calcul du rotor [15]. Dans notre mémoire on s'intéresse au dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil en utilisant une méthode canadienne.

II.2.1. Dimensionnement du stator

Cette étude a pour but de calculer, de bien évaluer et de bien choisir le type du stator adéquat qui satisfera les performances imposées par un cahier de charges d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.

II.2.1.1. Coefficient d'utilisation [3][17]

Ce coefficient montre la relation qui existe entre le diamètre extérieur du stator, la longueur physique totale du stator, la vitesse et la puissance utile du moteur. On peut le définir par la relation suivante :

$$K_u = \frac{D_e^2 \cdot l \cdot n}{P_u} \quad (\text{II-1})$$

Cette relation est valable pour les moteurs asynchrones ayant une vitesse constante et des tensions ≤ 600 (V). On peut le définir à partir de la figure B.12 qui est présenté dans l'annexe B.

NB : P_u présente la puissance utile du moteur. On considère l'unité de cette puissance en kilowatts durant tous nos calculs.

II.2.1.2. Le pas polaire [3][14][17]

Le pas polaire est la distance entre deux axes de pôles voisins, sa valeur est donnée par la relation suivante :

$$\tau = \pi \cdot D / 2p \quad (\text{II-2})$$

Pour les moteurs à haute vitesse et à deux pôles n'est pas souvent valable, car le rotor serait trop petit et il n'y aurait pas suffisamment d'acier, car on doit tenir la présence de l'axe.

Les valeurs usuelles du pas polaire qu'on retrouve généralement correspondent à :

$$\tau \approx 112 \cdot (P_u / 2p)^{0,24} \quad (\text{II-3})$$

Pour avoir un facteur de puissance élevé, le rapport entre la longueur physique totale du stator et ce pas se situe entre 1 et 1,25. Et pour qu'on obtienne un bon rendement ce rapport doit être proche de 1,5 ; par contre si on cherche un coût minimal, il doit se situer entre 1,5 et 2.

II.2.1.3. Le rapport entre le diamètre extérieur et le diamètre intérieur

Pour un nombre de pôles donné, on peut montrer le rapport qui existe entre le diamètre extérieur du stator et son diamètre intérieur. Le tableau A.1 présenté dans l'annexe montre ce rapport.

II.2.1.4. Epaisseur de l'entrefer [3][17]

L'entrefer présente l'air qui s'épare le stator et le rotor du moteur, il requiert la plus grande partie du courant de magnétisation. Pour avoir de bonnes performances, le courant de magnétisation devrait être le plus petit possible, ce qui nécessite un entrefer aussi étroit. Par contre un entrefer trop étroit favorise les harmoniques qui peuvent nuire au fonctionnement du moteur, particulièrement au démarrage et durant la période d'accélération.

L'épaisseur minimale admissible pour l'entrefer est donnée par la formule suivante :

$$g = 3,18 \cdot \frac{6600}{D+2300} \quad (\text{II-4})$$

II.2.1.5. La Longueur apparente du stator [3][17]

Si seulement le stator ou le rotor possède des canaux de ventilation la longueur apparente du stator est:

$$l_a = l - \frac{N_v \cdot W_v^2}{W_v + \frac{5 \cdot g}{2}} + g \quad (\text{II-5})$$

➤ Si $250 \leq l \leq 500$ (mm) :

$$N_v = \frac{l - 200}{75} + 1 \quad (\text{II-6})$$

➤ Si $l > 500$ (mm) :

$$N_v = \frac{l - 200}{(60-80)} + 1 \quad (\text{II-7})$$

➤ Si $l < 200$ (mm) on n'inclus pas les canaux de ventilation :

$$l_a = l + g \quad (\text{II-8})$$

Si les deux parties comportent le même nombre de canaux de même largeur, on prend en pratique comme longueur effective ou apparente de l'induit :

$$l_a = l - \frac{N_v \cdot W_v^2}{W_v + 5 \cdot g} + g \quad (\text{II-9})$$

II.2.1.6. Le flux par pôle [3]

Le flux par pôle se détermine comme suit :

$$\Phi = c_1 \cdot \sqrt{P_u \cdot 60 / f} \cdot 10^{-3} \quad (\text{II-10})$$

c_1 : Constante associée au nombre de pôles. Le tableau A.2 (annexe A) donne les plages usuelles pour cette constante.

II.2.1.7. Dimensionnement des encoches [3][17]

Généralement la largeur de l'encoche et la largeur de la dent sont presque identiques. Comme point de départ, on peut poser que la profondeur d'une encoche varie de 4 à 6 fois sa largeur.

Si le diamètre extérieur du circuit magnétique d'un moteur asynchrone est de l'ordre de 350 ou 400 (mm), le pas d'encoche ne devrait pas être inférieur à 10 (mm). Par contre pour les moteurs ayant un diamètre extérieur qui se situe entre 400 et 1000 (mm), le pas d'encoche va de 20 à 30 (mm). Pour les moteurs de grande puissance ce pas généralement se situe entre 25 et 40 (mm).

Une autre remarque intéressante concerne la relation entre la largeur de la culasse et la longueur des dents. Généralement pour les moteurs à 4 pôles, ces deux dimensions sont proches, par contre pour les moteurs à 2 pôles, la largeur de la culasse est de 30% à 50 % supérieur à la longueur des dents. Dans les moteurs à 6 et 8 pôles, la largeur de la culasse est inférieure à la longueur des dents.

Pour obtenir des conditions acceptables pour le fonctionnement du moteur il est nécessaire d'utiliser plus de 15 encoches par paire de pôles, à l'exception en utilisant plus de 9 encoches pour les très petites machines ayant un très grand nombre de pôles.

Pour les moteurs de quelques dizaines de kilowatts et plus, en utilisant des bobines préformées en exploitant des gros conducteurs carrés ou méplats, ce qui nécessite l'usage d'encoches de type ouvert à parois parallèles :

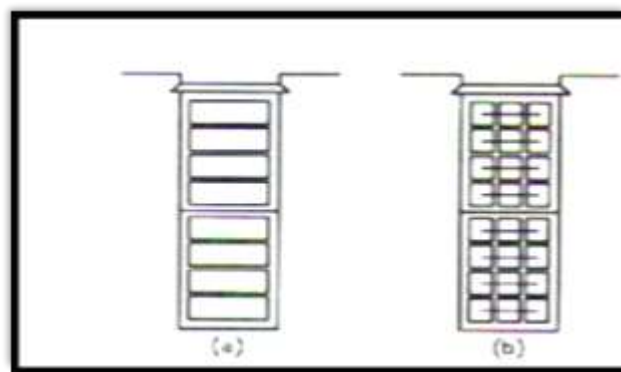


Figure II.1 : Encoche de type ouvert, a) un seul conducteur par couche, b) plusieurs conducteurs par couche [3]

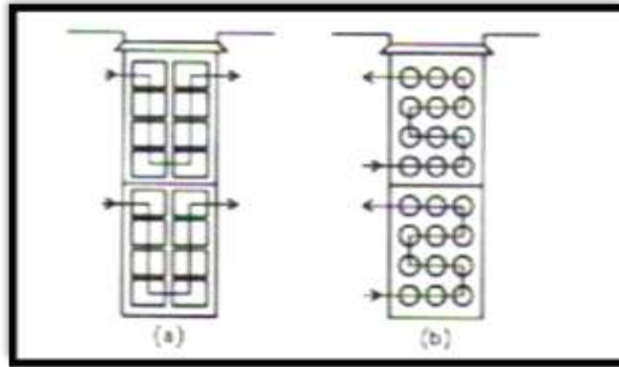


Figure II.2 : Encoche de type ouvert avec plusieurs conducteurs de faible section
 a) deux conducteurs carrés par couche, b) plusieurs conducteurs ronds par couche [3]

Par contre dans les petits moteurs, on utilise habituellement des encoches de type semi-ouvert. On choisit plusieurs conducteurs en parallèle et de section faible (d'environ 1mm^2), avec une ouverture d'encoche de 2 à 3 mm.

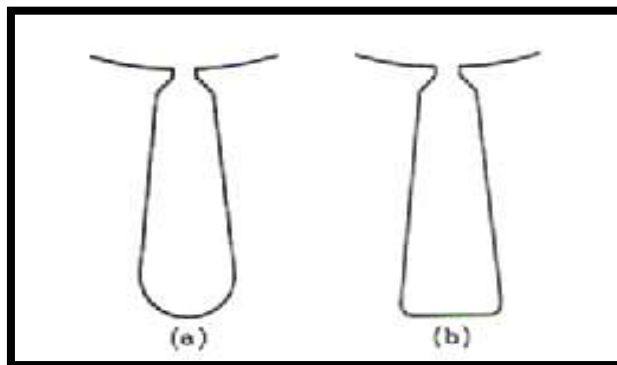


Figure II.3 : Encoche de type semi ouvert, a) à fond rond, b) à fond plat [3]

La valeur du pas d'encoche à l'entrefer du stator pour ce type d'encoche correspond à :

$$ts1 = \frac{\pi \cdot D}{N_{es}} \quad (\text{II-11})$$

II.2.1.8. Facteurs influent sur la tension totale induite du stator [3][14][17]

Plusieurs facteurs influent sur la tension totale induite au niveau du stator, tel que :

a) Facteur de distribution du flux

Ce facteur correspond à :

$$fd = \frac{2}{\pi} \quad (\text{II-12})$$

b) Facteur de forme du flux

Il correspond au rapport entre la valeur efficace et la valeur moyenne de la tension induite du stator. Pour une demi-sinusoïdale, il se détermine comme suit :

$$f_b = \frac{1/\sqrt{2}}{2/\pi} = 1,11 \quad (\text{II-13})$$

c) Facteur de distribution de l'enroulement

En générale ce facteur correspond à :

$$K_d = \frac{\sin\left(\frac{N_{es} \cdot \beta}{2p \cdot m \cdot 2}\right)}{\frac{N_{es}}{2p \cdot m} \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (\text{II-14})$$

$$\beta = \frac{180 \cdot 2p}{N_{es}} \quad (\text{II-15})$$

d) Facteur de pas

La tension induite d'une bobine à pas raccourci est plus petite que celle à pas normal, donc on peut conclure que le raccourcissement du pas influe sur la tension induite. Ce facteur qui tient compte de ce raccourcissement correspond à :

$$K_p = \sin\left[v \gamma \frac{180^\circ}{2}\right] \quad (\text{II-16})$$

γ : Rapport du raccourcissement du pas.

v : Harmonique considéré.

Le Tableau A.3 présenté dans l'annexe A, montre les Valeurs du facteur de pas pour divers harmoniques.

II.2.1.9. Dimensionnement du cuivre du stator [3]**a) Nombre de conducteur en série**

Le nombre de conducteurs en série par phase est déterminé à partir de cette relation :

$$N = \frac{0,97 \cdot E}{2,22 \cdot f \cdot \emptyset \cdot K_d \cdot K_p} \quad (\text{II-17})$$

b) Nombre de conducteur par encoche

Le nombre de conducteurs par encoche correspond à :

$$N_c = \frac{N \cdot q \cdot m}{N_{es}} \quad (\text{II-18})$$

N_c doit être un nombre pair.

c) Section des conducteurs du stator

La section d'un conducteur du stator se détermine comme suit :

$$a_s = \frac{I}{q \cdot J_s} \quad (\text{II-19})$$

J_s : Densité de courant dans le stator (A/mm²). Il faut choisir cette densité dans les conducteurs telle que l'élévation de température ne dépasse pas la valeur admissible par le type d'isolant utilisé. Cette densité varie généralement entre 4 et 5 (A/mm²).

$$I = \frac{P_u \cdot 10^3}{E \cdot m \cdot \eta \cdot F_p} \quad (\text{II-20})$$

L'isolation des conducteurs ronds consiste habituellement en une double couche de vernis (Formvar ou Formex), une double couche de coton ou de papier pour les conducteurs rectangulaires. Pour la gaine qui entoure les bobines à l'intérieur des encoches est constitué de vernis, de coton, de mica, de toile, de papier...etc.

Les valeurs usuelles pour les conducteurs ronds isolés avec du vernis pour le bobinage du stator sont représentées dans le tableau A.5 de l'annexe A.

II.2.1.10. La densité de flux dans l'entrefer [3]

Pour éviter un courant de magnétisation excessif, on doit choisir une densité de flux faible dans l'entrefer. Cette densité variée habituellement entre 0,6 et 0,7 (T) pour les moteurs de grande puissance et à haute vitesse. Pour l'usage général cette densité se situe entre 0,45 et 0,55 (T).

La relation qui montre la valeur de cette densité au niveau de l'entrefer se détermine comme suit :

$$B_g = \frac{\varnothing_t \cdot 10^6}{\Pi \cdot D \cdot l_a} \quad (\text{II-21})$$

$$\varnothing_t = \frac{\varnothing \cdot 2p}{f_d} \quad (\text{II-22})$$

II.2.1.11. La densité de flux dans les dents du stator [3][17]

La densité de flux dans les dents du stator se situe généralement entre 1,15 et 1,55 (T). L'expression analytique de cette densité est donnée par la relation suivante :

$$B_{ds} = \frac{\varnothing \cdot 10^6}{f_d \cdot w_{ds \min} \cdot l_a \cdot K_f \cdot N_{eps}} \quad (\text{II-23})$$

K_f : Coefficient de foisonnement qui vaut 0,93.

II.2.1.12. La densité de flux dans la culasse du stator [3][17]

La densité de flux dans la culasse du stator se situe habituellement entre 0,75 et 1,30 (T). L'expression analytique de cette densité se détermine comme suit :

$$B_{cs} = \frac{\varnothing \cdot 10^6}{2 \cdot d_{cs} \cdot l_a \cdot K_f} \quad (II-24)$$

II.2.1.13. Les encoches semi-ouvertes de type trapézoïdal à fond rond [3][17]

Sont les plus utilisables pour la réalisation des moteurs asynchrone, leurs dents à parois parallèles permet d'obtenir une densité de flux uniforme dans ces dents.

La figure II.4, montre une encoche trapézoïdale à fond rond :

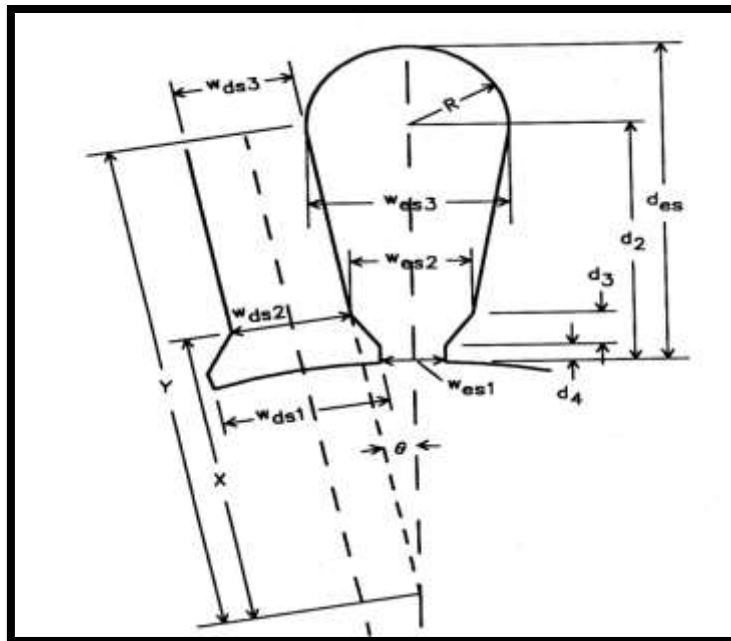


Figure II.4 : Encoche trapézoïdale à fond rond [3]

L'ouverture wes1 égale à 2,5 (mm) pour les petits moteurs, par contre pour les moteurs de plusieurs centaines de kilowatts cette valeur peut atteindre 4 à 5 (mm). d4 présente l'épaisseur de l'isthme des dents qui varie entre 0,75 et 3 (mm). d3 montre la distance entre l'isthme et le début de la partie utile de l'encoche sa valeur se situe entre 0,75 et 1 (mm). Généralement pour les moteurs de faible puissance d3 est nul.

La section nette d'une encoche à fond rond est donnée par la relation suivante :

$$S_{ne} = \left[\frac{w_{es2} + w_{es3}}{2} - i_w \right] \cdot \left[d_2 - i_d + \frac{i_w}{2} \right] + \frac{\pi}{2} \cdot \left[R - \frac{i_w}{2} \right]^2 \quad (II-25)$$

Pour déterminer la valeur de id et de iw en utilisant le tableau A.6 mentionné dans l'annexe A.

Pour les conducteurs formés de plusieurs fils ronds en parallèle, on peut poser :

$$S_{ne} = \frac{N_c \cdot N_{fil} \cdot [\Pi \cdot D^{2_{fil}}]/4}{K_e} \quad (II-26)$$

K_e : Facteur d'espace (section totale des conducteurs isolés / section d'espace net disponible pour le bobinage), il se situe généralement entre 0,70 et 0,75. Pour des fils isolés au vernis, ce facteur ne dépasse pas beaucoup 0,85.

$$w_{es2} = \frac{\Pi \cdot (D + 2 \cdot (d_{4s} + d_{3s}))}{N_{es}} \quad (II-27)$$

$$\theta = \frac{180^\circ}{N_{es}} \quad (II-28)$$

$$X = \frac{w_{es2}}{2 \cdot \sin \theta} \quad (II-29)$$

$$Y = \frac{B + \sqrt{B^2 + 4H}}{2} \quad (II-30)$$

$$B = \frac{A - \frac{Z}{\sin \theta} + \Pi \cdot \frac{iw}{2}}{1 + \frac{\Pi}{2} \cdot \sin \theta} \quad (II-31)$$

$$A = X + id - d_3 - d_4 \quad (II-32)$$

$$Z = \frac{w_{es2}}{2} - iw \quad (II-33)$$

$$H = \frac{S_{ne} + Z \cdot A - \frac{\Pi}{2} \cdot \left[\frac{iw}{2}\right]^2}{\sin \theta \cdot \left[1 + \frac{\Pi}{2} \cdot \sin \theta\right]} \quad (II-34)$$

$$w_{ds1} \approx \frac{D \cdot \Pi - (w_{es1} \cdot N_{es})}{N_{es}} \quad (II-35)$$

$$R = Y \cdot \sin \theta \quad (II-36)$$

$$w_{es3} = 2 \cdot R \quad (II-37)$$

$$d_2 = Y - X + d_4 + d_3 \quad (II-38)$$

$$d_{es} = d_2 + R \quad (II-39)$$

$$l_{ds} = d_{es} - \frac{R}{3} \quad (II-40)$$

Pour les encoches trapézoïdales à fond plat, les termes qui comportent Π disparaissent et $d_2 = d_{es}$, ainsi que la section nette S_{ne} est définie comme suit:

$$S_{ne} = \left[\frac{w_{es2} + w_{es3}}{2} - iw \right] \cdot [d_{es} - id] \quad (II-41)$$

II.2.1.14. Bobinage du stator [3]

Le bobinage utilisé pour les petits moteurs est généralement de type concentrique, par contre on utilise habituellement un enroulement de type imbriqué à double couche pour les moteurs de moyenne et de grande puissance.

II.2.2. Dimensionnement du rotor

L'objectif de cette étude est de faire un calcul, pour obtenir un rotor qui convient aux performances imposées par un cahier de charges d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.

II.2.2.1. Diamètre extérieur et intérieur du rotor [3]

Le diamètre extérieur du rotor correspond à :

$$D_r = D - 2 \cdot g \quad (\text{II-42})$$

Le diamètre intérieur se détermine comme suit :

$$D_{axe} = 12 \cdot (P_u \cdot 2p)^{0,36} \quad (\text{II-43})$$

II.2.2.2. Dimensionnement des encoches du rotor [3]

Lors de la conception des moteurs asynchrones il est très important de bien choisir le nombre d'encoches du rotor afin d'éviter les effets indésirables qui sont principalement causés par la présence d'harmoniques dans le flux de l'entrefer. L'ordre de ces harmoniques est en fonction du rapport entre le nombre d'encoches du stator et le nombre d'encoche du rotor.

Le nombre d'encoches du rotor ne doit jamais être égal à celui du stator, il peut être plus grand mais généralement il est plus petit dans les rotors à cage d'écureuil. Toutefois, le bruit et les vibrations sont habituellement réduits à un niveau satisfaisant si on choisit le nombre d'encoche du rotor N_{er} de sorte que $N_{es} - N_{er}$ ne soit pas égal à ± 1 , à ± 2 , à $\pm (p \pm 1)$ ou à $\pm (p \pm 2)$. Ainsi pour éviter un couple saccadé qui est dû à la variation du couple au démarrage pour différentes positions du rotor, $N_{es} - N_{er}$ ne doit pas être égal à $\pm 3p$ ou tout multiple de $3p$. En plus, il faut éviter les plages de synchronisme si $N_{es} - N_{er}$ est différent de $\pm p$, de $-2p$ ou de $-5p$, (les plages de synchronisme sont les endroits sur la courbe du couple en fonction de la vitesse où le moteur garde une vitesse constante sur une bande de valeur du couple et forme ainsi un genre d'escalier dans la partie basse vitesse).

Le tableau A.7 indiqué dans l'annexe A, montre le nombre d'encoches au rotor recommandé en fonction du nombre de pôles et du nombre d'encoches au stator.

Les encoches d'un rotor à cage d'écureuil sont généralement du type semi-ouvert, avec une largeur de l'ouverture des encoches qui varient entre 1.5 et 3 mm selon le diamètre du rotor. Pour les barres qui sont en cuivre, elles sont généralement de forme arrondie ou rectangulaire et plutôt allongée. Par contre lorsque les barres sont en aluminium coulé, on peut considérer que la forme de base est trapézoïdale.

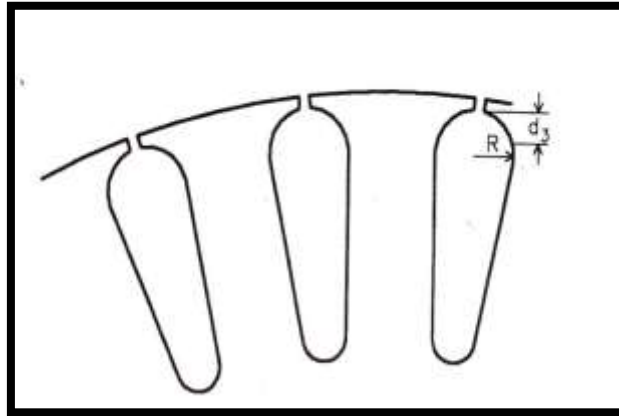


Figure II.5 : Encoches rotoriques avec une forme trapézoïdale [3]

II.2.2.3. Densité de flux dans les dents du rotor [3]

La densité de flux dans les dents du rotor est donnée par sa valeur maximale avec cette relation :

$$B_{dr} = \frac{\varnothing_t \cdot 10^6}{w_{dr \min} \cdot l_a \cdot k_f \cdot N_{er}} \quad (\text{II-44})$$

Pour une encoche rotorique à fond plat, $w_{dr \min}$ correspond à :

$$w_{dr \min} = \frac{\Pi (D_r - 2d_{er})}{N_{er}} - w_{er} \quad (\text{II-45})$$

Toutefois, la densité de flux maximale dans les dents du rotor ne peut être que légèrement supérieur à la densité de flux dans les dents du stator, à cause du nombre d'ampères-tours requis pour faire passer le flux à travers les dents.

II.2.2.4. Densité de flux dans la culasse du rotor [3][17]

La densité de flux dans la culasse du rotor varie dans les mêmes limites que celle de la culasse du stator. Cette densité est donnée par la formule suivante :

$$B_{cr} = \frac{\varnothing \cdot 10^6}{2 \cdot d_{cr} \cdot l_a \cdot k_f} \quad (\text{II-46})$$

II.2.2.5. Calcul type d'une encoche [3][17]

Si les barres rotoriques sont en cuivre ou bien en laiton, il faut accorder assez de jeu pour leurs insertions. Par contre, si les barres sont en aluminium coulé en place la surface brute de l'encoche et les sections des barres sont les mêmes.

Les relations qui permettent le calcul d'une encoche de type trapézoïdale, leurs extrémités sont arrondies avec mêmes largeurs (figure II.5), sont présentées ci-dessous :

$$tr1 = \frac{\Pi \cdot Dr}{Ner} \tag{II-47}$$

$$Ab = N \cdot m \cdot q \cdot Nfil \cdot as \cdot 1,15 \tag{II-48}$$

$$ab = \frac{Ab}{Ner} \tag{II-49}$$

$$\theta = \frac{180^\circ}{Ner} \tag{II-50}$$

$$wer2 = \left(\frac{\Pi \cdot (Dr - 2 \cdot d4)}{Ner} \right) - wdr2 \tag{II-51}$$

$$wer3 = \sqrt{\frac{\frac{Ab \cdot 8 \cdot \text{tg } \theta}{Ner} - (\Pi \cdot \text{tg } \theta + 2) \cdot wer2^2}{\Pi \cdot \text{tg } \theta - 2}} \tag{II-52}$$

$$d3 = \frac{2}{3} \cdot \frac{wer2}{2} \tag{II-53}$$

$$der = \frac{wer2 - wer3}{2 \cdot \text{tg } \theta} + \frac{wer2 + wer3}{2} + d4 \tag{II-54}$$

Pour les autres formes d'encoches, il suffit de décomposer l'encoche en un ensemble de figures géométriques et d'effectuer les calculs.

II.2.2.6. Coefficient de carter [3][13][17]

Dans les machines à courant alternatif, on doit réaliser tout d'abord, un champ normal dans l'entrefer présentant un harmonique d'espace prépondérant. On doit de plus réaliser une densité superficielle de courant qui se propage pour être fixe par rapport à ce champ, et présente de ce fait un harmonique d'espace prépondérant, de même rang que celui de champ.

Carter a étudié le champ entre une surface dentée et une surface lisse, il a déterminé la valeur du coefficient par lequel on doit multiplier la réluctance de l'entrefer pour tenir compte des encoches.

Le coefficient de carter se détermine comme suit :

$$K_c = \frac{t}{(t - w_e) + \frac{w_e}{1 + \frac{w_e}{5 \cdot g}}} = \frac{t}{t - \frac{w_e^2}{5 \cdot g + w_e}} \quad (\text{II-55})$$

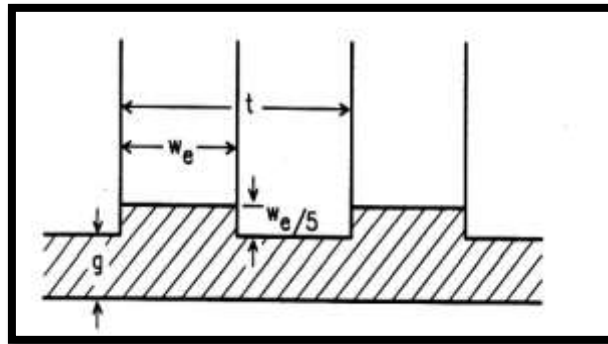


Figure II.6 : Une surface dentée face à une surface lisse au niveau de l'entrefer [3]

Le coefficient de carter peut être intervenu à des encoche de type semi-ouvert lorsque le bec de la dent n'est pas trop effilé c'est-à-dire si le rapport entre sa largeur $(w_{e2} - w_{e1})/2$ et sa hauteur maximale $(d_4 + d_3)$ est inférieur à 2 (figure II.4). Dans l'équation précédente la valeur de w_e prend la valeur de w_{e1} . Par contre si le bec de la dent est effilé et de faible épaisseur et que le rapport précédent est supérieur à 2, dans ce cas la, il faut remplacer w_e par $(w_{e2} - 4 \cdot (d_4 + d_3))$.

II.2.2.7. Longueur réelle du rotor [14]

La relation suivante donne la méthode de calcul qui détermine la longueur réelle du rotor :

$$l_2 = l + N_v \cdot l_v - 2g \quad (\text{II-56})$$

II.2.2.8. Le courant dans les barres et les anneaux de la cage du rotor [3]

Les barres de la cage sont traversées par un courant qui se divise en deux dans les anneaux, une moitié revient par le conducteur situé à un pas polaire en avant et l'autre moitié revient par le conducteur situé à un pas polaire en arrière. Si le courant dans chaque barre est à son maximum I_{max} , le courant maximal dans les anneaux est donné par la relation suivante :

$$I_{a \max} = \frac{I_{\max}}{2} \cdot \frac{N_b}{2p} \quad (\text{II-57})$$

Toutefois, le courant n'est pas maximal dans toutes les barres au même temps, il varie d'une manière sinusoïdale. Dans ce cas, La valeur maximale du courant dans les anneaux se détermine comme suit :

$$I_{a \max} = \frac{I_{\max}}{2} \cdot \frac{N_b}{2p} \cdot \frac{2}{\pi} \quad (\text{II-58})$$

II.2.2.9. Densité du courant dans le rotor [3]

Dans un moteur à cage d'écureuil, la densité de courant du rotor peut être plus grande que celle du stator, car dans ce cas la longueur moyenne d'une spire au rotor est inférieure que celle du stator. On peut admettre au rotor une densité de courant de (6 à 8 A/mm²) si les barres sont en cuivre, par contre pour un rotor avec des barres en aluminium coulé, la densité de courant est de l'ordre de 4 à 6 (A/mm²).

II.2.2.10. Dimensionnement de l'anneau

a) Section de l'anneau [3]

On à :

$$I_{a \max} = \frac{I_{\max}}{2} \cdot \frac{N_b}{2p} \cdot \frac{2}{\pi} \quad (\text{II-59})$$

Et puisque le courant est sinusoïdal, sa valeur efficace est :

$$I_a = \frac{I_{\max}}{2} \cdot \frac{N_b}{2p} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (\text{II-60})$$

Ainsi que le courant efficace dans les barres est donné par la relation suivante:

$$I_b = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (\text{II-61})$$

D'après les deux relations précédentes on peut montrer que :

$$I_a = \frac{I_b \cdot N_b}{\pi \cdot 2p} \quad (\text{II-62})$$

En fin, la section de chaque anneau se détermine comme suit :

$$A_a = \frac{I_a}{J_a} = \frac{I_b \cdot N_b}{\pi \cdot 2p \cdot J_a} \approx \frac{A_b}{\pi \cdot 2p} \quad (\text{II-63})$$

b) Largeur radiale, Epaisseur et Diamètre moyen de l'anneau [18]

➤ La Largeur radiale de l'anneau se d'termine comme suit :

$$d_a = (1,1 \text{ à } 1,25) \cdot d_{er} \quad (\text{II-64})$$

➤ L'épaisseur de l'anneau est le rapport entre la section et la largeur radiale de l'anneau :

$$w_a = \frac{A_a}{d_a} \quad (\text{II-65})$$

➤ Le diamètre moyen de l'anneau correspond à :

$$D_a = D_r - d_a \quad (\text{II-66})$$

II.2.2.11. Section de chaque barre [3]

On a la section totale des barres est :

$$A_b = \frac{I_b \cdot N_b}{J_b} \quad (\text{II-67})$$

Si les barres du rotor sont en aluminium, considérons pour A_b une section légèrement supérieur à celle de A_a , soit 115%. Donc :

$$A_b \approx N \cdot m \cdot q \cdot N_{\text{fil}} \cdot D_{\text{fil}} \cdot 1,15 \quad (\text{II-68})$$

Donc à partir de cette équation on peut montrer la valeur de la section de chaque barre du rotor en utilisant la relation suivante :

$$a_b = \frac{A_b}{N_b} \quad (\text{II-69})$$

II.3. Conclusion

Ce chapitre est consacré aux calculs des différents paramètres géométriques de la machine qui concernent le dimensionnement du stator et du rotor afin d'exploiter ces résultats pour déduire les divers caractéristiques d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.

Le calcul doit satisfaire avant tout les lois de la physique en particulier magnétiques, électriques et mécaniques, d'autres parts il doit en même temps répondre aux exigences du cahier de charge tel que la capacité de surcharge, le facteur de puissance et les conditions de démarrage.

Chapitre III

Caractéristiques d'un

moteur asynchrone triphasé

à cage d'écureuil

III.1. Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons décrit des propriétés importantes du moteur sans avoir recours à un circuit équivalent. Cependant, pour acquérir une meilleure connaissance du comportement du moteur, un circuit équivalent devient indispensable.

Dans la première partie de ce chapitre, nous développerons la force magnétisante ainsi les différentes pertes dans le moteur, ensuite nous développerons le circuit équivalent du moteur à partir des principes de base. Nous pourrions alors démontrer des relations et des caractéristiques importantes.

III.2. Caractéristiques des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil

Afin d'avoir construit un moteur asynchrone triphasé, on doit respecter plusieurs phénomènes et critères. Pour cela dans ce qui suit nous procédons à une étude analytique des différentes caractéristiques du fonctionnement du moteur.

III.2.1. La force magnétisante [3][17]

Pour faire passer le flux dans un moteur asynchrone, il faut que chaque pôle du moteur doive fournir suffisamment de force magnétisante.

III.2.1.1. La force magnétisante à travers l'entrefer

La force magnétisante requise par pôle pour faire passer le flux à travers l'entrefer se détermine comme suit :

$$F_g = 796 \cdot B_g \cdot g \cdot K_c \quad (\text{III-1})$$

NB : Pour déterminer le coefficient de Carter on doit multiplier ce coefficient au niveau du stator avec celui du rotor.

III.2.1.2. La force magnétisante pour la culasse du stator et du rotor

Si le flux au niveau de l'entrefer comporte une distribution sinusoïdale, alors il doit être le même dans la culasse.

- La force magnétisante totale par pôle pour la culasse du stator est donnée par cette relation :

$$F_{cs} = H_{cs} \cdot l_{cs} \quad (\text{III-2})$$

Dans lesquels :

$$l_{cs} = \frac{(D + 2 \cdot d_{es} + d_{cs}) \cdot \Pi}{2 \cdot 2p} \quad (\text{III-3})$$

- En outre, la force magnétisante totale par pôle pour la culasse du rotor est donnée par la relation suivante :

$$F_{cr} = H_{cr} \cdot l_{cr} \quad (\text{III-4})$$

Dans lesquels :

$$l_{cr} = \frac{(D_r - 2 \cdot d_{er} - d_{cr}) \cdot \Pi}{2 \cdot 2p} \quad (\text{III-5})$$

III.2.1.3. La force magnétisante pour les dents statoriques et rotoriques

La force magnétisante pour les dents de forme trapézoïdale, est déterminée de la même manière que la culasse.

- La force magnétisante totale par pôle pour les dents du stator est :

$$F_{ds} = H_{ds} \cdot l_{ds} \quad (\text{III-6})$$

- La force magnétisante totale par pôle pour les dents du rotor se détermine comme suit :

$$F_{dr} = H_{dr} \cdot l_{dr} \quad (\text{III-7})$$

Si on se réfère à la figure II.4, la longueur parcourue par le flux dans les dents est égale à la profondeur des encoches si le fond est plat. Par contre si le fond est rond cette longueur est vaut $(d_2 + 2/3 \cdot R)$.

H_{cs} , H_{cr} , H_{ds} et H_{dr} montrent les forces magnétisantes pour la culasse du stator, la culasse du rotor, les dents statoriques et les dents rotorique. La figure B.12 représentée dans l'annexe B, montre les valeurs de ces forces.

III.2.1.4. La force magnétisante totale

La force magnétisante totale nécessaire pour faire passer le flux à travers le circuit magnétique, est égal à la somme des forces magnétisantes partielle :

$$F_t = F_g + F_{ds} + F_{dr} + F_{cs} + F_{cr} \quad (\text{III-8})$$

III.2.2. Le courant de magnétisation [3][17]

La force magnétisante totale à travers le circuit magnétique est connue, donc on peut déterminer le courant de magnétisation, qui correspond à :

$$I_m = \frac{2 \cdot f_b \cdot 2p \cdot F_t}{m \cdot N \cdot K_d \cdot K_p} \quad (\text{III-9})$$

III.2.3. Volume des dents [3]

Pour déterminer le volume des dents statoriques et rotoriques en utilisant les relations suivantes :

$$V_{ds} = w_{ds}^2 \cdot l \cdot N_{es} \cdot l_{ds} \quad (\text{III-10})$$

$$V_{dr} = w_{dr}^2 \cdot l \cdot N_{er} \cdot l_{dr} \quad (\text{III-11})$$

III.2.4. Evaluation du courant et des pertes à vide [3][17][18]

Le courant à vide d'un moteur asynchrone contient une composante en phase avec la tension qui tien compte des pertes dans le fer (pertes par Hystérésis, pertes par courant de Foucault et pertes par pulsation du flux), des pertes par effet Joule, et des pertes par frottement et ventilation qui sont relativement faibles par rapport aux autres pertes. En plus il comporte une composante en quadrature avec la tension qui constitue le courant de magnétisation.

III.2.4.1. Les pertes fer

Ces pertes incluent les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault qui se produisent dans le noyau magnétique de la machine, auxquelles on doit ajouter des pertes additionnelles. Ces effets causent surtout une diminution de la puissance active de la machine.

a) Pertes de surface

Les pertes de surface sont dues aux variations de la densité de flux dans l'entrefer. Rutenberg à établi une formule qui permet de calculer ces pertes pour un moteur asynchrone avec des encoches de types Semi-ouvert, dont la largeur de l'ouverture est inférieure à la moitié de la largeur des dents opposées :

$$P_{surf} = K_5 \cdot B_g^2 \cdot V^{1,5} \cdot [(K_{cr} - 1)^2 \cdot \frac{tr_1}{\sqrt{10} \cdot w_{er1}} \cdot S_{ds} + (K_{cs} - 1)^2 \cdot \frac{ts_1}{\sqrt{10} \cdot w_{es1}} \cdot S_{dr}] \cdot 10^{-3} \quad (\text{III-12})$$

$$S_{ds} = N_{es} \cdot w_{ds1} \cdot l_a \quad (\text{III-13})$$

$$S_{dr} = N_{er} \cdot w_{dr1} \cdot l_a \quad (\text{III-14})$$

b) Pertes par pulsation dans les dents

Les pertes par pulsation dans les dents sont dues à la non-uniformité du circuit magnétique, on peut les déterminer par la relation empirique ci-dessous :

$$P_p = K_6 \cdot \epsilon \cdot [K_{2s} \cdot (K_{3s} \cdot B_{ds \min})^2 \cdot V_{ds} \cdot \left(\frac{f_{ps}}{100}\right)^{1,5} + K_{2r} \cdot (K_{3r} \cdot B_{dr \min})^2 \cdot V_{dr} \cdot \left(\frac{f_{pr}}{100}\right)^{1,5}] \cdot 10^{-3} \quad (\text{III-15})$$

K_{2s} et K_{2r} : Coefficient de trapézoïdalité des dents, avec :

$$K_2 = 0,82 + 6 \cdot e^{-3,5 \cdot \frac{\text{largeur minimale}}{\text{largeur maximale}}} \quad (\text{III-16})$$

Pour les dents de largeur uniforme, $K_2 = 1$.

K_{3s} et K_{3r} : Coefficients d'ouvertures d'encoches statoriques et rotoriques, dans lesquels :

$$K_{3s} = \left| \frac{w_{er1} - y_r \cdot g}{2 \cdot (w_{ds1} + y_s \cdot g) - 3 \cdot w_{er1} + 3 \cdot y_r \cdot g} \right| \quad (\text{III-17})$$

$$K_{3r} = \left| \frac{w_{es1} - y_s \cdot g}{2 \cdot (w_{dr1} + y_r \cdot g) - 3 \cdot w_{es1} + 3 \cdot y_s \cdot g} \right| \quad (\text{III-18})$$

$$y = 4 \cdot [1 - e^{-(w_{e1} / 5 \cdot g)}] \quad (\text{III-19})$$

f_{pr} et f_{ps} : Fréquences de pulsation dans les dents rotoriques et statoriques, Avec :

$$f_{pr} = \frac{N_{es} \cdot n_s}{60} \quad (\text{III-20})$$

$$f_{ps} = \frac{N_{er} \cdot n_s}{60} \quad (\text{III-21})$$

c) Pertes dans la culasse du stator

L'équation des pertes dans la culasse du stator peut s'écrire comme suit :

$$P_{cs} = G_{cs} \cdot 6 \quad (\text{III-22})$$

$$G_{cs} = \frac{\pi}{4} \cdot [D e^2 - (D + (d_{es} + l_{ds}))^2] \cdot 1,77 \cdot 10^{-6} \quad (\text{III-23})$$

d) Pertes dans les dents du stator

On peut déterminer les pertes dans les dents du stator par la formule suivante :

$$P_{ds} = G_{ds} \cdot 7,4 \quad (\text{III-24})$$

$$G_{ds} = 7,7 \cdot 10^{-6} \cdot V_{ds} \quad (\text{III-25})$$

Enfin, les pertes totales dans le fer sont représentées par la somme des pertes partielles. La relation qui montre la totalité des pertes se détermine comme suit :

$$P_{fe} = P_{surf} + P_p + P_{cs} + P_{ds} \quad (\text{III-26})$$

III.2.4.2. Les pertes mécaniques

Ces pertes prennent en compte tous les frottements dus à la rotation de la partie mobile du moteur. Elles sont données par l'expression suivante :

$$P_{mec} = K_t \cdot (n_s \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_e \cdot 10^{-2})^4 \quad (III-27)$$

K_t : Facteur de majoration

$$2p = 2 \rightarrow K_t = 1,3 \cdot (1 - D_e \cdot 10^{-3})$$

$$2p > 2 \rightarrow K_t = 1$$

III.2.4.3. Les pertes Joule

a) Les pertes Joule statoriques

Ce sont des pertes électriques dissipées dans les enroulements statoriques. La figure ci-dessous montre la forme des têtes des bobines aux extrémités du stator, chaque tête comporte trois parties : Les prolongements de longueur b_1 , les parties droites et inclinées de longueur b_2 et la boucle qui permet de passer de la partie supérieure à la partie inférieure de l'encoche.

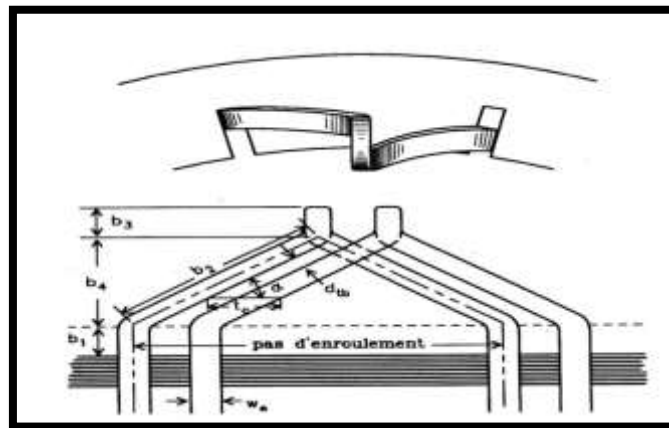


Figure III.1 : Disposition des têtes de bobines dans le cas de bobines rigides préformées [3]

- On peut déterminer l'angle α par la relation suivante :

$$\sin \alpha = \frac{w_e + dt_b}{t_c} \quad (III-28)$$

t_c correspond au pas d'encoche au centre de l'encoche qui vaut :

$$t_c = \frac{\Pi \cdot (D + des)}{N_{es}} \quad (III-29)$$

- La longueur b_2 des têtes se détermine comme suit :

$$b_2 = \frac{\Pi \cdot (D + des)}{2 \cdot 2p \cdot \cos \alpha} \cdot \gamma \quad (III-30)$$

- L'extension de la partie courbée de la tête des bobines b_3 est :

$$b_3 \approx des \quad (III-31)$$

- L'expression de la projection longitudinale de b_2 est donnée par la relation suivante :

$$b_4 = b_2 \cdot \sin \alpha \quad (\text{III-32})$$

Enfin, l'expression de la longueur moyenne d'une demi-spire est montrée par la formule ci-dessous :

$$l_s = l + 2 \cdot b_1 + 2 \cdot b_2 + d_{es} \quad (\text{III-33})$$

d_{tb} et b_1 dépendent de la tension appliquée au moteur, et correspondent généralement aux valeurs indiquées dans le tableau A.8 présenté dans l'annexe A.

Si les bobines sont constituées d'un ensemble de fils ronds de faible section :

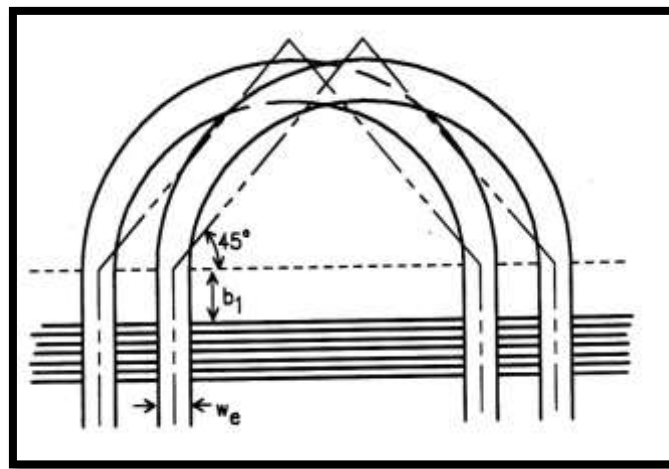


Figure III.2 : Bobine de plusieurs fils rond de faible section [3]

- La partie droite de la bobine excède le circuit magnétique d'une longueur b_1 comme dans le cas précédent et conformément au tableau A.8, b_2 dans ce cas devient :

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + d_{es})}{2p} \cdot \gamma \cdot \cos 45^\circ \quad (\text{III-34})$$

- L'expression de la longueur moyenne d'une demi-spire devient:

$$l_s = l + 2 \cdot b_1 + 2 \cdot b_2 \quad (\text{III-35})$$

- La résistance par phase du bobinage du stator se détermine comme suit :

$$R_1 = \frac{l_s \cdot N \cdot \rho_{cu}(T)}{q \cdot a_s} \cdot 10^3 \quad (\text{III-36})$$

Pour une température T , la résistivité du cuivre est donnée par cette relation :

$$\rho_{cu}(T) = \rho_{cu}(20^\circ\text{C}) \cdot [1 + \alpha_{cu} \cdot (T - 20)] \quad (\text{III-37})$$

$$\rho_{cu}(20^\circ\text{C}) = 0,0178 \cdot 10^{-6} \quad (\Omega \cdot \text{m})$$

$$\alpha_{cu} = 3,81 \cdot 10^{-3} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

- Les pertes attribuables au courant de magnétisation I_m sont données par la formule suivante :

$$P_{jos} = m \cdot I_m^2 \cdot R_1 \quad (\text{III-38})$$

- La composante en phase du courant à vide est montrée par cette relation :

$$I_{or} = \frac{P_{fe} + P_{mec} + P_{jo}}{m \cdot E} \quad (\text{III-39})$$

- Le courant total à vide se détermine comme suit :

$$I_o = \sqrt{I_m^2 + I_{or}^2} \quad (\text{III-40})$$

- Le facteur de puissance à vide correspond à :

$$F_{po} = \frac{I_{or}}{I_o} \quad (\text{III-41})$$

b) Les pertes Joule rotoriques

Le rotor d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, est constitué par des barres qui forment un bobinage spécial. Les courants au niveau des barres sont déphasés, ils appartiennent à des phases différentes. Les pertes Joule du rotor peuvent être exprimées par cette relation :

$$P_{jor} = \frac{2 \cdot m_r \cdot I_r^2}{2p} \cdot \left[R_b + \frac{R_a}{2 \cdot \sin^2 \frac{\pi \cdot 2p}{2 \cdot N_b}} \right] \quad (\text{III-42})$$

- m_r indique le nombre de phases du rotor qui correspond à :

$$m_r = \frac{N_b}{2p/2} \quad (\text{III-43})$$

- I_r est le courant rotorique qui vaut :

$$I_r = \frac{I_b \cdot 2p}{2} \quad (\text{III-44})$$

- R_b représente la résistance d'une barre rotorique qui se détermine comme suit:

$$R_b = \frac{I_b \cdot \rho_{al}(T)}{ab} \cdot 10^3 \quad (\text{III-45})$$

- $\rho_{al}(T)$ est la résistivité de l'aluminium pour une température T , cette résistivité se détermine par l'expression suivante :

$$\rho_{al}(T) = \rho_{al}(20^\circ\text{C}) \cdot [1 + \alpha_{al} \cdot (T - 20)] \quad (\text{III-46})$$

$$\rho_{al}(20^\circ\text{C}) = 0,031 \cdot 10^{-6} \quad (\Omega \cdot \text{m})$$

$$\alpha_{al} = 3,7 \cdot 10^{-3} \quad (^\circ\text{C}^{-1})$$

- R_a montre la valeur de la résistance d'un segment d'anneau :

$$R_a = \frac{\pi \cdot D_a \cdot \rho_{al}(T)}{N_b \cdot A_a} \cdot 10^3 \quad (\text{III-47})$$

- En fin, la relation qui donne la valeur de la résistance par phase du rotor reportée au stator se détermine comme suit :

$$R_2 = \frac{m \cdot K_d^2 \cdot K_p^2 \cdot N^2 \cdot \rho_{al}(T)}{N_b} \cdot \left[\frac{l_b}{a_b} + \frac{2 \cdot N_b \cdot D_a \cdot K_a}{\Pi \cdot (2p)^2 \cdot A_a} \right] \cdot 10^3 \quad (III-48)$$

NB : Les barres rotoriques peuvent être réalisées par d'autres matériaux (le cuivre par exemple), ce qui conduit à un changement de la valeur de la résistivité.

K_a représente le facteur de correction qui est en fonction du nombre de pôles et du rapport du diamètre intérieur sur le diamètre extérieur de l'anneau. La figure B.13 présentée dans l'annexe B, montre la variation de ce facteur.

III.2.4.4. Réactance de fuite

a) Dispersion d'encoche

Pour l'enroulement à pas normal, l'inductance par phase pour la dispersion d'encoche vaut :

$$L_e = 4 \cdot \Pi \cdot \frac{N^2 \cdot m \cdot l_a}{N_{es}} \cdot (F_h + F_b) \cdot 10^{-10} \quad (III-49)$$

F_h et F_b sont des Facteurs qui tiennent compte de la forme du haut et du bas de l'encoche, Leurs valeurs varient selon la forme de l'encoche.

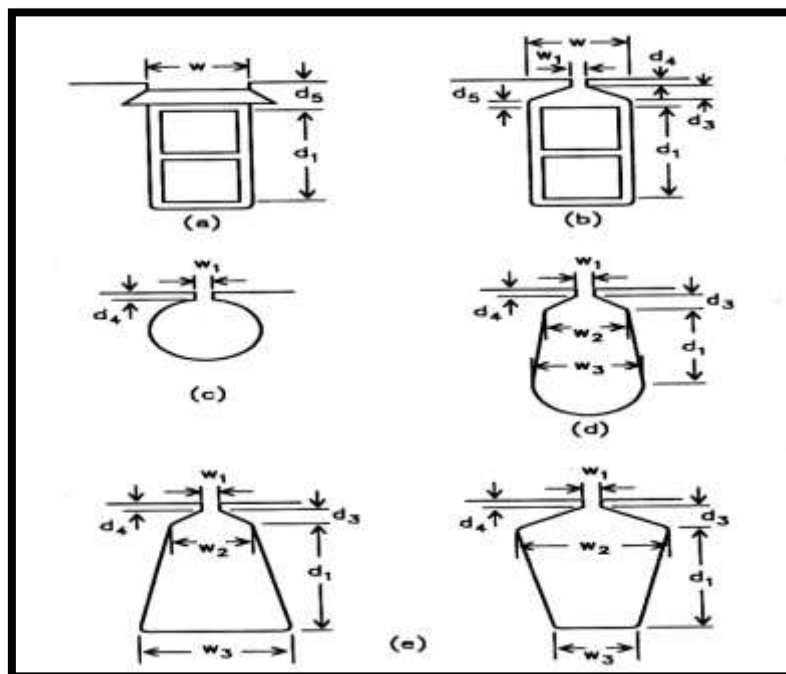


Figure III.3 : Différents types d'encoches, a) type ouvert, b) type semi-ouvert rectangulaire, c) type semi-ouvert ronde, d) type semi ouvert trapézoïdale à fond rond, e) type semi-ouvert trapézoïdale à fond plat [3]

- Pour les encoches de type ouvert (figure : III.3.a) :

$$F_b = \frac{d_1}{3 \cdot w} \quad \text{(III-50)}$$

$$F_h = \frac{d_5}{w} \quad \text{(III-51)}$$

- Pour les encoches de type semi-ouvert rectangulaire (figure : III.3.b) :

$$F_b = \frac{d_1}{3 \cdot w} \quad \text{(III-52)}$$

$$F_h = \frac{d_5}{w} + \frac{d_3}{w + w_1} + \frac{d_4}{w_1} \quad \text{(III-53)}$$

- Pour les encoches de type semi-ouvert rondes (figure : III.3.c) :

$$F_b = 0,625 \quad \text{(III-54)}$$

$$F_h = \frac{d_4}{w_1} \quad \text{(III-55)}$$

- Pour les encoches de type semi-ouvert trapézoïdales (figure : III.3.d et figure : III.3.e) :

$$F_h = \frac{2 \cdot d_3}{w_1 + w_2} + \frac{d_4}{w_1} \quad \text{(III-56)}$$

- ❖ Si le fond de l'encoche est rond (figure : III.3.d) F_b correspond à :

$$F_b = 0,1177 \cdot \left(\frac{w_2}{w_3}\right)^{-0,8436} + 1,178 \cdot \left(\frac{d_1}{w_3}\right) \cdot e^{[-1,258 \left(\frac{w_2}{w_3}\right)]} \quad \text{(III-57)}$$

- ❖ Si le fond de l'encoche est plat (figure : III.3.e) F_b correspond à :

$$F_b = \frac{d_1}{w_3} \cdot 0,326 \cdot \left(\frac{w_2}{w_3}\right)^{-0,964} \quad \text{(III-58)}$$

Pour l'enroulement à pas raccourci, il faut tenir compte un coefficient K_{de} selon les deux cas suivant :

- ❖ Si le facteur de raccourcissement de pas γ est compris entre 0,5 et 0,66 alors :

$$K_{de} = 1,5 \cdot \gamma - 0,25 \quad \text{(III-59)}$$

- ❖ Par contre si γ est compris entre 0,66 et 1 :

$$K_{de} = 0,75 \cdot \gamma + 0,25 \quad \text{(III-60)}$$

Enfin on peut exprimer la réactance de dispersion d'encoche par la formule ci-dessous :

$$X_e = 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot L_e \cdot K_{de} \quad \text{(III-61)}$$

Les réactances dues à la dispersion d'encoche statorique et rotorique sont données par les deux relations suivantes :

$$X_{es} = \frac{8 \cdot \Pi^2 \cdot N^2 \cdot m \cdot f \cdot l_a \cdot K_{des}}{10^{10} \cdot N_{es}} (F_h + F_b) \quad \text{(III-62)}$$

$$X_{er} = \frac{8 \cdot \Pi^2 \cdot N^2 \cdot m \cdot f \cdot l_a \cdot K_{der}}{10^{10} \cdot N_{er}} \cdot \frac{(K_d \cdot K_p)^2}{(K_{dr} \cdot K_{pr})^2} \cdot (F_h + F_b) \quad (\text{III-63})$$

Dans notre cas le moteur est de type à cage d'écureuil, ce qui donne une valeur unitaire pour les paramètres K_{der} , K_{dr} et K_{pr} .

b) Dispersion différentielle

Cette dispersion est due à la présence de champs harmoniques. Les réactances associées à cette dispersion pour le stator et le rotor sont données par les relations suivantes :

$$X_{ds} = \frac{5}{6} \cdot X_m \cdot \left(\frac{2p}{N_{es}}\right)^2 \quad (\text{III-64})$$

$$X_{dr} = \frac{5}{6} \cdot X_m \cdot \left(\frac{2p}{N_{er}}\right)^2 \quad (\text{III-65})$$

X_m est la réactance de magnétisation. Cette réactance par phase égale au rapport entre la tension d'entrée et le courant de magnétisation par phase.

Enfin, la réactance globale de dispersion différentielle est :

$$X_d = \frac{E}{1,2 \cdot I_g} \cdot \left[\left(\frac{2p}{N_{es}}\right)^2 + \left(\frac{2p}{N_{er}}\right)^2 \right] \quad (\text{III-66})$$

I_g est le courant de magnétisation qui correspond à la chute de potentiel magnétique dans l'entrefer, il se détermine comme suit :

$$I_g = \frac{2 \cdot f_b \cdot F_g \cdot 2p}{m \cdot N \cdot K_d \cdot K_p} \quad (\text{III-67})$$

c) Dispersion de boucle

On peut déterminer cette dispersion pour le stator et le rotor, en exploitant les relations suivantes :

$$X_{bs} = \frac{E}{I_g} \cdot K_{bs} \quad (\text{III-68})$$

$$X_{br} = \frac{E}{I_g} \cdot K_{br} \quad (\text{III-69})$$

K_{bs} et K_{br} sont des constantes de dispersion de boucle du stator et du rotor. Pour les moteurs asynchrones à cage d'écureuil, la constante de dispersion de boucle du rotor est nulle. Si le nombre d'encoches par pôle au stator est un nombre entier, alors K_{bs} est nul aussi. Par contre si le nombre d'encoche par pôle au stator n'est pas un nombre entier, on calcule la constante de dispersion de boucle du stator comme pour les moteurs à rotor bobiné.

Pour les moteurs à rotor bobiné, on peut déterminer K_{br} et K_{bs} par la relation ci-dessous :

$$K_b = 0,00115 \cdot \sin \left[\frac{(\gamma - 0,47) \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right)}{0,12} \right] + 0,00155 \quad (\text{III-70})$$

d) Dispersion des têtes de bobines

Au niveau du stator cette dispersion est montrée par la relation suivante :

$$X_{ts} = 3,15 \cdot 10^{-9} \cdot N^2 \cdot m \cdot f \cdot \frac{(K_d \cdot K_p)^2}{2p} \cdot \left[b_1 + \frac{b_4 + \frac{b_3}{2}}{2} \right] \quad (\text{III-71})$$

La figure (III.4) montre une tête de bobine préformée :

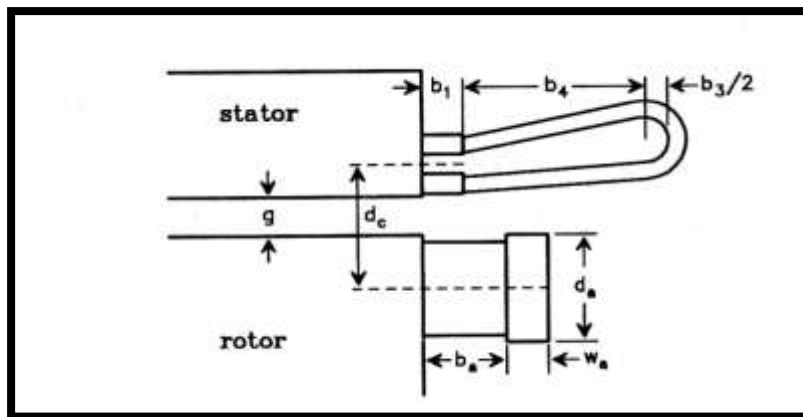


Figure III.4 : Extension d'une tête de bobine préformée au stator et extension des barres au rotor et position de l'anneau [3]

La valeur de b_1 correspond à celle trouvée dans le tableau A.8, et les valeurs de b_3 et b_4 ont été définies précédemment.

Si les bobines sont à plusieurs fils ronds en parallèle par conducteur, on va remplacer $(b_4 + \frac{b_3}{2})$ par $(K_{ch} \cdot b_2 \cdot \sin 45^\circ)$.

K_{ch} est un facteur qui tient compte de l'écrasement des chignons. $K_{ch} = 0,5$ pour les petits moteurs, et $0,8$ pour les gros moteurs.

La valeur de b_2 est donnée par la relation suivante :

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + d_e)}{2p} \cdot \gamma \cdot \cos 45^\circ \quad (\text{III-72})$$

Dans ce cas, la relation de la dispersion des têtes de bobines devient :

$$X_{ts} = 3,15 \cdot 10^{-9} \cdot N^2 \cdot m \cdot f \cdot \frac{(K_d \cdot K_p)^2}{2p} \cdot \left[b_1 + \frac{K_{ch} \cdot \pi \cdot (D + d_e) \cdot \gamma}{4 \cdot 2p} \right] \quad (\text{III-73})$$

Dans un moteur asynchrone à cage d'écurie, la dispersion des têtes de bobines rotorique correspond à :

$$X_{tr} = \frac{N^2 \cdot m \cdot f_{cr} \cdot (K_d \cdot K_p)^2}{10^8 \cdot (2p)^2} \cdot \left[2 \cdot 2p \cdot b_a + \frac{\Pi \cdot D_r \cdot d_c}{1,7 \cdot w_a + 1,2 \cdot d_a + 1,4 \cdot d_c} \right] \quad (III-74)$$

e) Dispersion due à la disposition en biais

Si les encoches sont placées en biais, la dispersion totale augmente. On peut associer une moitié de la réactance due à cette dispersion au stator et l'autre moitié au rotor. La valeur de cette réactance au stator et au rotor correspond à :

$$X_{bi} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{E}{I_g} \cdot \frac{\theta_{bi}^2}{12} \right] \quad (III-75)$$

θ_{bi} : L'inclinaison des encoches en (rd), égal à Π fois le rapport de l'inclinaison en encoches sur le nombre d'encoches par pôle.

f) Réactance totale de fuite

La réactance totale de fuite pour le stator correspond à :

$$X_1 = X_{es} + X_{ds} + X_{ts} + X_{bs} + X_{bi} \quad (III-76)$$

De la même manière, on détermine la réactance totale de fuite pour le rotor :

$$X_2 = X_{er} + X_{dr} + X_{tr} + X_{br} + X_{bi} \quad (III-77)$$

Afin de déterminer la réactance de magnétisation, on devrait poser :

$$X_m = \frac{E}{I_m} - X_1 \quad (III-78)$$

III.2.5. Circuits équivalents [3]

Pour déterminer les caractéristiques d'un moteur, il est nécessaire d'exploiter son circuit équivalent. Les figures ci-dessous montrent ces circuits pour un moteur asynchrone triphasé à simple et à double cage d'écureuil :

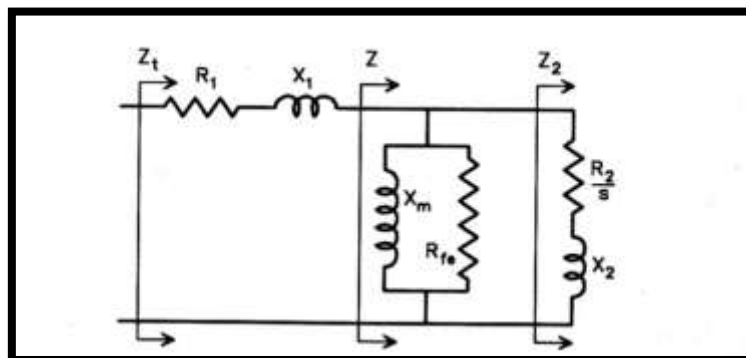


Figure III.5 : Schéma équivalent pour un moteur à simple cage d'écureuil [3]

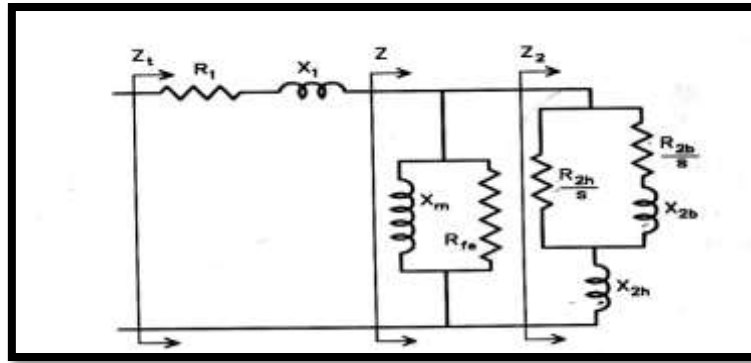


Figure III.6 : Schéma équivalent pour un moteur à double cage d'écureuil [3]

III.2.5.1. Caractéristiques en marche normale

- Pour le moteur à une simple cage :

$$Z_2 = (R_2 / s) + (j \cdot X_2) \quad \text{(III-79)}$$

$$Z = R_{fe} // X_m // Z_2 \quad \text{(III-80)}$$

R_{fe} est la résistance qui tien compte des pertes dans le fer :

$$R_{fe} = \frac{P_{fe}}{m \cdot I_{fe}^2} = \frac{E_i^2}{P_{fe} / m} \quad \text{(III-81)}$$

E_i : La tension induite par phase qui se détermine comme suit :

$$E_i = \frac{\varnothing_t \cdot n \cdot N \cdot f_d \cdot f_b \cdot K_d \cdot K_p}{60} \quad \text{(III-82)}$$

$$Z_t = R_t + jX_t = (R_1 + jX_1) + Z \quad \text{(III-83)}$$

- Pour un moteur asynchrone à double cage, on obtient :

$$Z_2 = jX_{2h} + ((R_{2h} / s) // ((R_{2b} / s) + jX_{2b})) \quad \text{(III-84)}$$

$$Z = R_{fe} // X_m // Z_2 \quad \text{(III-85)}$$

$$Z_t = R_t + jX_t = (R_1 + jX_1) + Z \quad \text{(III-86)}$$

- Le courant du stator (courant de ligne), est :

$$I_1 = \frac{E}{Z_t} \quad \text{(III-87)}$$

- Le courant du rotor reporté au stator correspond à :

$$I_2 = \frac{E - I_1 \cdot (R_1 + jX_1)}{Z_2} \quad \text{(III-88)}$$

- Le facteur de puissance correspond à :

$$F_p = \frac{R_t}{Z_t} \quad \text{(III-89)}$$

- Les pertes dans le cuivre statorique et rotorique :

$$P_{cu1} = m \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad \text{(III-90)}$$

$$P_{cu2} = m \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (III-91)$$

- La puissance à travers l'entrefer correspond à :

$$P_g = \frac{m \cdot R_2}{s} \cdot I_2^2 \quad (III-92)$$

- La puissance disponible à la sortie du moteur est donnée par la relation suivante :

$$P_u = (P_g - P_{cu2} - P_{rot}) \cdot 10^{-3} = ((1 - s) \cdot P_g - P_{rot}) \cdot 10^{-3} \quad (III-93)$$

- Le rendement se détermine comme suit :

$$\eta = \frac{\text{Puissance de sortie}}{\text{Puissance d'entrée}} \quad (III-94)$$

- La vitesse de rotation correspond à :

$$n = (1 - s) \cdot n_s \quad (III-95)$$

- Le couple moteur est :

$$C = \frac{9,55 \cdot P_u \cdot 10^3}{n} \quad (III-96)$$

- Le glissement correspond au couple maximal est donné par la formule ci-dessous :

$$s_m = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (III-97)$$

III.2.5.2. Caractéristiques au démarrage

Lorsqu'on démarre un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, le courant augmente ce qui résulte une saturation du circuit magnétique, ce qui conduit à une augmentation de la résistance du rotor. Cette résistance peut s'exprimer par la formule suivante :

$$R_2 \text{ dém} = \frac{m \cdot K_d^2 \cdot K_p^2 \cdot N^2 \cdot \rho_{al}(T)}{N_b} \cdot \left[\frac{l_b}{a_b} \cdot R_c + \frac{2 \cdot N_b \cdot D_a \cdot K_a}{\Pi \cdot (2p)^2 \cdot A_a} \right] \cdot 10^3 \quad (III-98)$$

On peut réaliser les barres rotoriques avec d'autres matériaux, ce qui conduit à un changement de la valeur de la résistivité.

R_c : Facteur qui multiplie la résistance des barres pour la section contenue dans le circuit magnétique qui correspond à :

$$R_c = \frac{K_m \cdot d_b \cdot \sqrt{f \cdot w_b / w_e}}{100} \quad (III-99)$$

K_m : Constante égale à 1,40 pour le cuivre 1,08 pour l'aluminium et 0,74 pour le laiton.

Si $(K_m \cdot d_b \cdot \sqrt{f \cdot w_b / w_e})$ est inférieur à 100, on considère R_c égale à 1.

Lorsque les barres du rotor excèdent les tôles, il faut calculer la résistance de la barre en deux parties (celle qui se trouve dans l'acier et celle qui est à l'extérieur). Dans ce cas R_c de l'équation précédente sera remplacé par cette relation :

$$\frac{l}{l_b} \cdot R_c + \frac{l_b - l}{l_b} \quad \text{(III-100)}$$

La saturation du circuit magnétique au démarrage entraine une diminution de la dispersion. La force magnétisante par encoche à ce niveau pour un rotor calé correspond à :

$$F_{dém} = I_{rc} \cdot \frac{t_a \cdot C_s}{q} \cdot 0,707 \cdot [K_{de} + K_d^2 + K_p^2 + \frac{N_{es}}{N_{er}}] \cdot \sqrt{\frac{E_i}{E}} \quad \text{(III-101)}$$

Si le bobinage statorique est de type imbriqué à deux couches dans lequel on a deux côtés de bobine par encoche, chaque bobine occupe la moitié de l'encoche. Dans ce cas le produit $(t_a \cdot C_s)$ correspond au nombre de conducteur par encoche.

Puisque la réactance de fuite diminue au démarrage, donc on lui attribue un facteur de correction K_h qui varient entre 1,2 et 1,8 :

$$Z_{dém} = \sqrt{(R_1 + R_2 \text{ dém})^2 + \left[\frac{X_1 + X_2}{K_h} \right]^2} \quad \text{(III-102)}$$

Donc :

$$I_{rc} = \frac{E}{Z_{dém}} \quad \text{(III-103)}$$

➤ Le couple de démarrage correspond à :

$$C_{dém} = \frac{3 \cdot R_2 \text{ dém} \cdot I_{rc}^2}{2 \cdot \pi \cdot n_s / 60} \quad \text{(III-104)}$$

NB : La forme des encoches affecte la saturation du circuit magnétique, ainsi que les facteurs de forme d'encoche F_h et F_b sont affectés par cette saturation. Afin de traiter le haut de l'encoche, il faut modifier le facteur F_h par l'ajout de ΔF_h :

➤ Pour le stator :

Si les encoches statorique sont de type ouvert, alors :

$$\Delta F_{hs} = \frac{d_{2s}}{w_{es1}} \cdot \left[\frac{C_{es}}{C_{es} + w_{es1}} \right] \quad \text{(III-105)}$$

Par contre si les encoches statoriques sont de type semi-ouvert, on obtient :

$$\Delta F_{hs} = \frac{d_{4s} + 0,58 \cdot d_{3s}}{w_{es1}} \cdot \left[\frac{C_{es}}{C_{es} + 1,5 \cdot w_{es1}} \right] \quad \text{(III-106)}$$

$$C_{es} = (t_{s1} - w_{es1}) \cdot (1 - K_g) \quad \text{(III-107)}$$

K_g : Facteur qui varient en fonction de λ_g .

➤ Pour le rotor :

Si les encoches rotorique sont de type ouvert, alors :

$$\Delta F_{hr} = \frac{d_{2r}}{w_{er1}} \cdot \left[\frac{C_{er}}{C_{er} + w_{er1}} \right] \quad (\text{III-108})$$

Par contre si les encoches rotoriques sont de type semi-ouvert, on obtient :

$$\Delta F_{hr} = \frac{d_{4r} + 0,58 \cdot d_{3r}}{w_{er1}} \cdot \left[\frac{C_{er}}{C_{er} + 1,5 \cdot w_{er1}} \right] \quad (\text{III-109})$$

$$C_{er} = (tr1 - w_{er1}) \cdot (1 - K_g) \quad (\text{III-110})$$

Si les encoches du rotor sont très profondes, on doit corriger la valeur de Fbr. Le facteur de correction Xc dépend de la valeur de λ qui correspond à :

$$\lambda = K_m \cdot db \cdot \sqrt{f \cdot (wb/we)} \quad (\text{III-111})$$

Pour $\lambda \leq 225$:

$$X_c = 1,0 - 6,0 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^2 - 1,8 \cdot 10^{-9} \cdot \lambda^3 \quad (\text{III-112})$$

Pour $\lambda \geq 225$:

$$X_c = \frac{10}{0,0419 + 0,0656 \cdot \lambda} \quad (\text{III-113})$$

Enfin, les réactances de fuite pour la dispersion d'encoche au démarrage sont données par ces relations :

➤ Pour le stator :

$$X_{es \text{ dém}} = X_{es} \cdot \left[\frac{F_{hs} - \Delta F_{hs} + F_{bs}}{F_{hs} + F_{bs}} \right] \quad (\text{III-114})$$

➤ Pour le rotor :

$$X_{er \text{ dém}} = X_{er} \cdot \left[\frac{F_{hr} - \Delta F_{hr} + F_{br} \cdot X_c}{F_{hr} + F_{br}} \right] \quad (\text{III-115})$$

La saturation au démarrage affecte aussi la réactance pour la dispersion différentielle, il on résulte que :

$$X_{ds \text{ dém}} = X_{ds} \cdot K_g \quad (\text{III-116})$$

$$X_{dr \text{ dém}} = X_{dr} \cdot K_g \quad (\text{III-117})$$

On peut déterminer la valeur du coefficient Kg par les formules suivante :

$$\lambda_g = \frac{F_{dém}}{g \cdot \left[\sqrt{\frac{6,25 \cdot g}{ts1 + tr1}} + 0,64 \right]} \quad (\text{III-119})$$

Pour $\lambda_g \leq 3750$:

$$K_g = 1 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda_g + 8,5 \cdot 10^{-9} \cdot (\lambda_g)^2 - 5,7 \cdot 10^{-12} \cdot (\lambda_g)^3 \quad (\text{III-119})$$

Pour $\lambda_g \geq 3750$:

$$K_g = \frac{1}{0,553 + 0,000187 \cdot \lambda_g} \quad (\text{III-120})$$

Les réactances totales de fuite au démarrage pour le stator et le rotor correspondent à :

$$X1 \text{ dém} = X_{es \text{ dém}} + X_{ds \text{ dém}} + X_{ts} + X_{bs} + X_{bi} \quad (\text{III-121})$$

$$X2 \text{ dém} = X_{er \text{ dém}} + X_{dr \text{ dém}} + X_{tr} + X_{br} + X_{bi} \quad (\text{III-122})$$

On constate que la réactance des têtes de bobines ne change pas, car ces têtes sont dans l'air. Ainsi on ne corrige pas la dispersion de boucle et la dispersion due à la disposition en biais, parce que sont peu affectées.

III.3. Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour la mise en œuvre des équations qui permettent le calcul des performances et les caractéristiques du moteur à induction dont nous avons procédé à son dimensionnement en utilisant son circuit équivalent. Ce qui permettra aussi de renforcer et de donner un aperçu plus détaillé aux équations illustrés dans le chapitre précédent.

CHAPITRE IV

Application

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéressera principalement aux diverses procédures et démarches entrepris lors de conception des moteurs asynchrones par l'entreprise d'ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA. Ensuite nous présentons un exemple de calcul pour un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil de 3 (KW) en utilisant la méthode précédente, et le résultat obtenu par la suite sera simulé grâce à l'outil du F.E.M.M, qui est un moyen de simulation permettant la détermination de ses performances magnétiques et mécaniques à partir des spécifications géométriques, de construction et des conditions d'utilisation. En partant d'un cahier de charges donné, il permet d'explorer automatiquement l'ensemble des solutions possibles.

IV.2. Processus de fabrication d'un moteur asynchrone

L'entreprise ELECTRO-INDUSTRIES est située sur la route nationale N°12, distante de 30 (Km) du chef lieu de la wilaya de TIZI-OUZOU et de 8 (Km) de la commune d'AZAZGA. Cette entreprise est composée de deux unités :

- Unité de fabrication des transformateurs de distribution MT/BT (UTR).
- Unité de fabrication des moteurs électrique et prestation techniques (UMP).

Les produits fabriqués par cette entreprise sont conformes aux normes Allemandes. La production actuelle d'ELECTRO-INDUSTRIES est écoulée sur le marché Algérien et génère un chiffre d'affaire de 1.8 milliard de dinars.

La capacité de la production des transformateurs couvre les besoins du marché Algérien à 70% environ, par contre la vente des moteurs représente 30%.

IV.2.1. Présentation de l'unité des moteurs

L'unité des moteurs s'occupe essentiellement de la fabrication des moteurs asynchrones triphasés et monophasés à différentes hauteurs d'axes, mais sa production est basée surtout sur les moteurs asynchrones triphasés. Pour cela nous limiterons notre processus de fabrication sur ce type de moteurs. Parmi les moteurs électriques fabriqués par l'ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA, les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil de hauteurs d'axe : 71-132 (mm), 160-250 (mm), 280-400 (mm)...etc.

Avant le lancement de la fabrication des moteurs, les pièces et matières d'achats nécessaires pour la réalisation sont soumises à des testes de contrôles. Après cette opération vient le lancement de la production des moteurs, suivant le programme de production. Les

étapes de production des moteurs électriques à l'ELECTRO-INDUSTRIES se déroulent dans deux bâtiments de l'UMP.

IV.2.1.1. Bâtiment 2a

Dans ce bâtiment, on trouve les ateliers de découpage, encochage, emballage, fonderies sous pression de soudage.

A. Ateliers de découpage, encochage et emballage

Dans cet atelier sont réalisés tous les travaux de transformation des tôles utilisées pour la fabrication des différentes pièces, à noter :

- Découpage et encochage des tôles statoriques et rotoriques.
- Fabrication des capots ventilateurs.
- Découpage et emboutissage des agrafes.
- Emballage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques.

a) Fabrication des tôles statoriquee et rotoriques

L'atelier reçoit des rouleaux de tôles magnétiques achetées par l'ELECTRO-INDUSTRIES de nature :

- isolés aux vernis pour les moteurs à la hauteur d'axes variant de 183 à 404 (mm).
- Non isolé, leurs isolation se fait dans des fours par oxydation pour les moteurs à hauteur d'axe allant de 70 à 163 mm.

Il existe trois procédés de découpage :

- Découpage automatique successif.
- découpage automatique par outils à encocher.
- découpage semi-automatique par outils à encocher.

Le procédé le plus répandu dans cet atelier, est celui de découpage automatique successif avec la presse rapide. Ce procédé permet de découper et d'encoher dans le même cycle les tôles statoriques et rotoriques pour certains types de moteurs de forte commande. Tous ces procédés aboutissent au même résultat à savoir la fabrication des tôles statoriques.

b) Emballage des feuilles de tôles statoriques et rotoriques

Cette opération se fait sur presse à emballer, pour la réalisation des paquets statoriques et rotoriques à partir de tôles magnétique, l'ensemble est fixé à l'aide d'agrafes pour les paquets statoriques et à l'aide de rivets pour certains paquets rotoriques.

c) Fabrication des capots de ventilateurs

Ils sont réalisés à partir des tôles, soit galvanisées soit d'acier laminé à froid. Les ventilateurs sont achetés en plastique pour les hauteurs d'axes de 70 à 160 (mm) et en fonte pour les hauteurs d'axes de 180 à 220 (mm). Ces ventilateurs sont achetés brutes ensuite usinées. Pour les hauteurs d'axes supérieures à 220 mm, le noyau est en fonte achetée brute et finie à l'usinage fixé à l'aide des boulons à une roue en acier laminé à froid fabriqué à 2a à l'aide de deux couronnes différentes, assemblées avec des ailettes en formes de Z, l'ensemble est lié par une soudure.

d) Découpage des barres de cuivre pour les rotors à cage d'écureuil

Lorsqu'il s'agit d'un moteur à enroulement rotorique avec barres, celles-ci sont découpées à des longueurs appropriées au type de moteur. Elles sont de nature en cuivre plat pour le remplissage des encoches rotoriques des moteurs à une seule cage, et de celles de la cage intérieure des moteurs à double cage (les extrémités sont court-circuitées à l'aide des anneaux en cuivre).

B. Atelier de moulage sous pression

Dans cet atelier se fait :

- La fabrication des pièces en aluminium et en alpac (alliage d'aluminium).
- Injection d'aluminium dans les encoches rotoriques pour former la cage d'écureuil.

IV.2.1.2. Bâtiment 2

Dans ce bâtiment, on trouve les ateliers d'usinage, de bobinage et de montage.

A. Atelier d'usinage

Dans cet atelier sont réalisés tous les travaux de fabrication des arbres rotoriques et l'usinage des différentes pièces en fonte et en alpac.

a) Fabrication des arbres rotoriques**❖ Découpage**

Les arbres rotoriques sont réalisés à partir des ronds d'acier découpés à l'aide d'une scie mécanique à des longueurs brutes correspondantes aux types de moteurs à fabriquer.

❖ Centrage et dressage

Ils se font sur une machine à tour parallèle qui fait la mise en longueur, le perçage des trous de centrage et de taraudage.

❖ Tournage

Il se fait sur un tour parallèle d'ébauche et de finition, pour réaliser les cotes fonctionnelles (bout d'arbre, logement de roulement et la partie conique d'emmanchement).

❖ Fraisage des logements de clavettes

Il se fait sur des fraises verticales.

NB : Une fois l'arbre est réalisé, il envoyé au bâtiment 2a pour l'emmancher dans le paquet rotorique.

b) Usinage des différentes pièces en fonte et en alpax (alliage d'aluminium)**❖ Carcasse**

Usinage de diamètre intérieur de la carcasse à l'aide des tours verticaux, pour les pièces en fontes et tours à commande numérique pour celle en alpax, pour recevoir le paquet statorique.

❖ Flasques (AS, BS)

- Tournage des bords de centrage et du logement de roulement et de sa profondeur.
- Perçage et taraudage des trous (de fixation, d'entrée des câbles).
- Fraisage des surfaces d'appuis de fixations du moteur.

B. Atelier de bobinage

Cet atelier est réparti en trois secteurs :

a) Secteur préparation isolation

Dans l'industrie de fabrication des moteurs électriques, les conducteurs doivent toujours être isolés par mesure de sécurité afin d'éviter les courts circuits qui diminuent la qualité de la matière et apporter le maximum de sécurité aux personnes, pour cela on a besoin de matériaux isolants de haute qualité et supportant les effets thermiques engendrés par le fonctionnement de la machine. C'est dans ce secteur que sont préparés tous les isolants pour

tous les types de moteurs : caniveaux d'encoches, lames intermédiaires, cales de fermeture, gaines isolantes, séparateurs de phases, câbles de raccordement.

b) Secteur préparation des bobines

Une fois le cuivre est contrôlé, il transite au magasin pour être remis aux bobineurs pour la confection des bobines qui se fait à l'aide des gabarits montés sur les machines rotatives (bobineuses) qui sont réglés selon le nombre de spires par faisceaux.

c) Secteur bobinage du paquet statorique

C'est dans ce secteur que l'on dispose les bobines contrôlées et conformes dans le parquet statorique, déjà isolé avec des caniveaux d'encoche, suivant un schéma de bobinage délivré par le constructeur pour chaque type de moteurs. C'est pendant cette opération que l'on intègre les lames intermédiaires pour le bobinage à doubles couche ainsi que les cales de fermeture.

Une fois les bobines introduites, on place les séparateurs de phases pour éviter les courts circuits entre phases.

❖ Connexion des bobines

Les bobines de chaque phase sont liées entre elles de façon précise en conformité avec le schéma de bobinage afin d'obtenir trois grands enroulements, chacun d'eux a une entrée et une sortie. Les points de connexion sont brasés et isolés avec des gaines isolantes déjà placées.

❖ Connexion des bobines avec les câbles de raccordement

Les entrées et les sorties de chaque phases sont connectées et soudées à des câbles de raccordement qui assurent la liaison électriques avec la boîte à bornes entrée et sortie de chaque phase, qui sont distinguées des autres avec des couleurs. Exemple :

Entrée1 ↔ Sortie1 / (Orange).

Entrée2 ↔ Sortie2 / (Noir).

Entrée3 ↔ Sortie3 / (Rouge).

❖ Fretage et pressage des câbles

Le stator subit à la main à l'aide d'un fil isolant, une fois fait, le stator passe à la presse hydraulique pour donner la forme et les dimensions définitives des têtes de bobines coté AS et BS.

d) Contrôle**❖ Contrôle visuel**

- Contrôle des séparateurs de phase et les têtes par rapport au diamètre extérieur du paquet statorique.
- Vérification des caniveaux d'encoches, séparateur de phase et les réglottes de fermeture.

❖ Contrôle électrique

- Mesure de résistance ohmique entre phase et entre phase et masse à haute tension (2000V).
- Contrôle de la polarité des trois phases en cas d'anomalies, en vue de localiser les trois entrées et les trois sorties.

e) Imprégnation

Cette opération consiste à mettre le stator dans la résine pour le rendre plus compact et solidaire, deux méthodes sont utilisées :

- Imprégnation goutte à goutte (pour les petites hauteurs d'axes) .
- Imprégnation dans un bain de résine, puis séché dans des fours à 150°C (pour les moyens et grands d'axes).

C. Atelier de montage

Cet atelier est réparti en trois secteurs essentiels :

a) Secteur équilibrage du rotor

Il a pour but d'assurer une rotation uniforme et de compenser les balourds pouvant provenir des cas suivant :

- Manque d'homogénéité de la matière.
- Défaut d'usinage.
- Malformation des barres de cuivre.

b) Secteur pré montage

Les opérations réalisées dans ce secteur sont :

- Huiler l'intérieure de la carcasse pour faciliter l'insertion du paquet statorique dans celle-ci.

- Emmanchement du paquet avec une presse.
- Mise en longueur et tournage des bords de centrage de la carcasse, coté AS et BS.
- Fraisage des pattes pour retrouver la hauteur d'axe exacte.

c) Secteur montage final

Dans ce secteur sont effectuées les opérations suivantes :

- Mise en place du couvercle de palier intérieur coté BS pour assurer une bonne étanchéité.
- Emmanchement des roulements déjà graissés coté AS et BS avec une presse verticale et emplacement des clavettes coté AS pour les petits et moyens moteurs et à la main une fois chauffé pour les grands moteurs.
- Visser le couvercle de palier sur le flasque, cela permet de cerner le roulement entre ces deux pièces.
- Emplacement de la clavette coté BS et emmanchement du ventilateur, puis insertion de la bague d'arrêt (serre clips) pour le ventilateur.
- Intégration du rotor complet dans le stator et fixation de flasque coté BS avec des vices.
- Emplacement des rondelles (rondelle de compensation et rondelle élastique) sur le flasque coté AS pour éviter le jeu axial du rotor.
- Fixation du flasque sur la carcasse ainsi que le montage du capot du ventilateur.
- Préparation de la boîte à bornes et fixation des câbles de raccordement sur la plaque à bornes.

d) Contrôle final

Une fois le montage est fini, le moteur sera remis aux plates-formes d'essais. Les différentes opérations de contrôle effectuées dans chaque essai sont les suivant :

d.1) Essai série

Les moteurs qui arrivent à cette plate-forme d'essais subissent les contrôles suivants :

❖ Contrôle visuel

Cet essai a pour objectif de contrôler le bon montage du moteur (vis, plaque signalétique et le raccordement des fils).

❖ Essai à vide

Le moteur est alimenté sous une tension nominale U_n , on mesure le courant à vide I_o , la puissance à vide P_o , et le facteur de puissance à vide $\cos\varphi_o$.

Dans cet essai, on effectue le contrôle des bruits électriques et mécaniques, qui s'effectue à l'aide d'un tournevis que l'opérateur déplace sur différentes parties extérieures du moteur pour écouter et distinguer les bruits étranges.

❖ Essai en court-circuit (à rotor bloqué)

Le moteur à rotor bloqué, est alimenté sous un courant nominal I_n , on mesure la tension de court-circuit U_{cc} , la puissance de court-circuit P_{cc} et le facteur de puissance $\cos\varphi_{cc}$.

❖ Essai de haute tension

Cet essai a pour objectif de contrôler la bonne isolation entre phase, et la masse à 2000V, cette tension est choisie en fonction de la puissance du moteur.

d.2) Essais spéciaux

Les essais effectués dans cette plate-forme sont :

❖ Mesure des résistances

- Mesure des résistances des enroulements et la comparer à la résistance de consigne (elle ne doit pas dépasser 3% de R_n).
- Mesure des résistances entre phases et les comparer entre elles (la différence ne doit pas dépasser les 2%).

❖ Essai à vide

A la tension nominale, on prélève : Le courant I_o , la puissance P_o et le facteur de puissance $\cos\varphi_o$.

❖ Essai en court-circuit

Sous le courant nominal, on mesure : La tension U_{cc} , la puissance P_{cc} et le facteur de puissance $\cos\varphi_{cc}$.

❖ Essai de haute tension

Contrôle de bonne isolation entre phase, et la masse à 2000V.

❖ Essai en charge

Appelé aussi essai d'échauffement, il a pour objectif de juger la bonne tenue de la classe d'isolation du moteur et de déterminer la température limite à puissance nominale.

- On prélève la température de la carcasse froide.
- On fait tourner le moteur sous sa tension nominale.
- Au fur et à mesure que le moteur tourne, il s'échauffe, les pertes augmentent et la puissance utile chute, pour compenser cette puissance, on agit sur les charges afin de rendre cette puissance constante.
- L'essai durera jusqu'à ce que la température limite de la carcasse soit atteinte et stable, à ce moment précis, toutes les données électriques et mécaniques sont prélevées (I_n , $\cos\phi_n$, η) et les comparer à la plaque signalétique.

Dans le cas où le moteur contrôlé présente une anomalie d'après les résultats d'un essai quelconque, celui-ci est envoyé vers le poste de réparation mécanique où il va être démonté et réparé si la panne est mécanique, si non le paquet statorique bobiné est envoyé à son tour vers le poste de réparation électrique pour réparer ou refaire le bobinage.

Dans les deux cas de panne que pourrait avoir le moteur, parmi les causes qui provoquent cette non-conformité, la mauvaise matière rentrant dans la constitution d'une partie quelconque du moteur (tôle magnétique, fil en cuivre, isolants).

IV.3. Application

Les moteurs asynchrones couvrent un nombre important de structures de moteurs. La puissance de la gamme industrielle de ces moteurs s'étend de quelques watts à plusieurs mégawatts. Nous limiterons notre étude aux moteurs asynchrones à cage de taille moyenne, ce qui correspond à des spécifications bien précises en termes d'alimentation et de technologie. Nous allons prendre pour exemple de calcul, un moteur asynchrone triphasé à simple cage, avec des encoches de type trapézoïdale à fond rond de puissance moyenne de 3kW [15].

IV.3.1. Cahier de charge

Un cahier des charges d'un moteur est composé de deux parties complémentaires :

- La spécification des performances qui définira les caractéristiques électromécaniques du moteur.
- Les contraintes de dimensionnement et le mode de fonctionnement qui sera imposé par l'application à laquelle on le destine lorsque celle-ci est connue [15].

Pour ce qui suit nous présentons un exemple de calcul pour un moteur asynchrone triphasé à cage dont le cahier de charge est le suivant [16] :

- ✓ Puissance utile : 3 (KW) ou bien 4 (CV)
- ✓ Hauteur d'axe (mm) : 100 L (L : indice correspond à l'industrie donné par l'Electro-Industrie)
- ✓ Type du moteur : 107-4
- ✓ La fréquence : 50 (Hz)
- ✓ Vitesse de synchronisme : 1500 (tr/mn)
- ✓ Rendement : 0,79
- ✓ Facteur de puissance : 0,83
- ✓ Tension d'alimentation entre phase : 400 V
- ✓ Courant nominal : 7 (A)
- ✓ Courant de démarrage : 42 (A)
- ✓ Couple nominal : 20 (N.m)
- ✓ Couple de démarrage : 52 (N.m)
- ✓ Couple maximal : 54 (N.m)
- ✓ Le poids total : 24 (Kg)

IV.3.2. Calcul est simulation du moteur

Les calculs pour le dimensionnement du moteur sont effectués sous environnement Matlab. Le programme fait l'objet d'évaluations des différents paramètres de la machine :

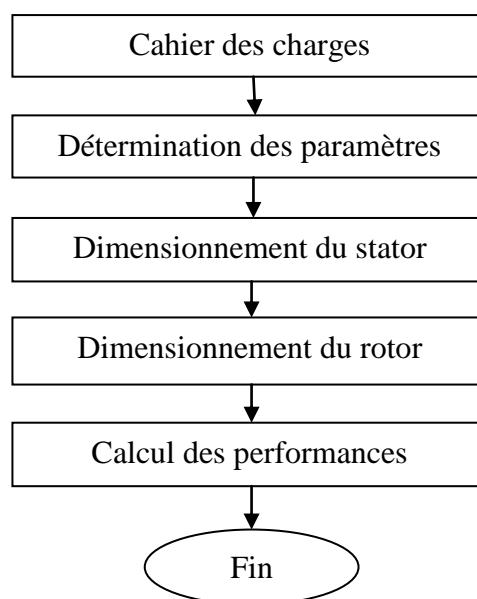


Figure IV.1 : Organigramme de Calcul

IV.3.2.1. Dimensionnement du stator

Dans cette application on cherche à améliorer le rendement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil de marque Electro-Industrie. Pour cela, on pose comme point de départ le rapport entre la longueur physique totale du stator et le pas polaire égal à 1,35.

Les valeurs numériques qui correspondent au dimensionnement du stator, sont représentées dans le tableau IV.1 :

Tableau IV.1. Calcul analytique des paramètres du stator

Désignations	Symboles	Valeurs calculées	Unités
Nombre de pôles	$2p$	4	-
Coefficient d'utilisation	K_u	$2,5140 \cdot 10^9$	-
Le pas polaire	τ	103	mm
Diamètre intérieur du stator	D	131,1437	mm
Le rapport entre les diamètres du stator	D_e/D	1,45	-
Diamètre extérieur du stator	D_e	190,1583	mm
Longueur totale du stator	l	139,05	mm
Longueur de l'entrefer	g	0,4652	mm
Longueur apparente du stator	l_a	139,5152	mm
Constante associée au nombre de pôles	c_1	2,25	-
Flux par pôle	\emptyset	0,0043	Wb
Tension d'alimentation du moteur	E	400	V
Nombre d'encoches du stator	N_{es}	36	Encoches
Pas d'encoche à l'entrefer du stator	ts_1	11,4444	mm
Facteur de distribution du flux	f_d	0,6366	-
Facteur de forme du flux	f_b	1,11	-
Facteur de distribution de l'enroulement du stator	K_d	0,9598	-
L'angle électrique qui sépare deux encoches	β	20	°
Rapport du raccourcissement du pas statorique	γ_s	1	-
Harmonique considéré	ν	1	-
Facteur de pas du raccourcissement	K_p	1	-
Nombre de conducteurs en série par phase	N	864	-
Nombre de chemins parallèles	q	1	-
Nombre de conducteurs par encoche	N_c	72	-
Flux par pôle	\emptyset	0,0043	Wb
Courant par phase	I	3,8127	A
Densité de courant dans le stator	J_s	4,6	A/mm ²
Section d'un conducteur du stator	a_s	0,8289	mm ²
Flux total	\emptyset_t	0,0265	Wb
Densité de flux dans l'entrefer	B_g	0,4608	T
Densité maximale de flux dans les dents statoriques	B_{ds}	1,55	T
Coefficient de foisonnement	K_f	0,93	-

Nombre d'encoches par pôle au stator	Neps	9	encoches
Largeur minimale de la dent du stator	wds min = wds2 = wds3	3,6581	mm
Densité de flux dans la culasse du stator	Bcs	1,3114	T
Epaisseur de la culasse du stator	dcs	12,3869	mm
Epaisseur de l'isthme des dents statoriques	d4	0,75	mm
La distance entre l'ouverture et la partie utile de l'encoche du stator	d3	0,75	mm
Largeur de l'encoche du stator à l'entrefer	wes1	2,5	mm
Largeur des dents du stator à l'entrefer	wds1	8,9444	mm
Augmentation d'épaisseur pour la largeur de l'encoche	iw	1,9	mm
Augmentation d'épaisseur pour la profondeur de l'encoche	id	6,3	mm
Facteur d'espace	Ke	0,85	-
Nombre de fils en parallèle	Nfil	1	-
Diamètre de chaque fil isolé	Dfil	1,10	mm
Surface nette de chaque encoche	Sne	80,4987	mm ²
Largeur minimale de l'encoche du stator	wes2	8,0481	mm
-	θ	5	°
-	X	46,1709	mm
-	A	50,9709	-
-	z	2,1241	-
-	B	26,0220	-
-	H	1890,7	-
-	Y	58,3983	mm
Rayon du cercle d'une encoche du stator	R	5,0897	mm
Largeur maximale de l'encoche	wes3	10,1795	mm
Distance entre la surface de la dent et le centre du cercle formant le fond de l'encoche	d2	13,7273	mm
Profondeur d'une encoche du stator	des	18,8171	mm
Longueur du chemin parcouru par le flux dans les dents du stator	lds	17,1205	mm

θ , X, A, z, B, H, Y : Symboles utiles pour le calcul des encoches du stator.

IV.3.2.2. Dimensionnement du rotor

Le dimensionnement du rotor est représenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.2. Calcul analytique des paramètres du rotor

Désignations	Symboles	Valeurs calculées	Unités
Diamètre du rotor	Dr	130,2132	mm
Diamètre d'axe	Daxe	29,3553	mm
Nombre d'encoches du rotor	Ner	24	Encoches

Largeur minimale des dents du rotor	$w_{dr\ min} = w_{dr2}$	6,3001	mm
La densité de flux dans les dents du rotor	Bdr	1,35	T
La densité de flux dans la culasse du rotor	Bcr	1,12	T
Epaisseur de la culasse du rotor	dcr	14,5032	mm
Pas d'encoche à l'entrefer du rotor	tr1	17,0449	mm
Epaisseur de l'isthme des dents rotoriques	d4	1	mm
Largeur de l'encoche du rotor à l'entrefer	wer1	1,5	mm
Section totale des barres du rotor	Ab	2470,6	mm ²
Section d'une barre du rotor	ab	102,9434	mm ²
-	θ	7,5	°
Largeur des dents du rotor à l'entrefer	wdr1	15,5362	mm
Largeur de l'encoche du rotor près de l'ouverture	wer2	10,4830	mm
largeur du fond de l'encoche du rotor	wer3	9,9423	mm
La distance entre l'ouverture et la partie utile de l'encoche	d3	3,4943	mm
Profondeur d'une encoche du rotor	der	13,2660	mm
Coefficient de carter au stator	Kcs	1,1276	-
Coefficient de carter au rotor	Kcr	1,0357	-
Coefficient de carter	Kc	1,1678	-
Section de l'anneau	Aa	196.6074	mm ²
Largeur radiale de l'anneau	da	14,5926	mm
Epaisseur de l'anneau	wa	13,4796	mm
Diamètre moyen de l'anneau	Da	115,6202	mm

IV.3.2.3. Détermination des caractéristiques du moteur

Le tableau ci-dessous illustre les performances d'un moteur asynchrone triphasé à simple cage d'écureuil :

Tableau IV.3. Calcul analytique des performances du moteur

Désignations	Symboles	Valeurs calculées	Unités
Force magnétisante par pôle pour l'entrefer	Fg	199,2815	At
Force magnétisante pour la culasse du stator	Hcs	0,6	At/mm
Longueur du chemin parcouru par le flux dans la culasse du stator	lcs	71,1433	mm
Force magnétisante totale par pôle pour la culasse du stator	Fcs	42,6860	At
Force magnétisante pour la culasse du rotor	Hcr	0,3	At/mm
Longueur du chemin parcouru par le flux dans la culasse du rotor	lcr	35,0201	mm
Force magnétisante totale par pôle pour la culasse du rotor	Fcr	10,5060	At
Force magnétisante pour les dents du stator	Hds	2,4	At/mm

Force magnétisante totale par pôle pour les dents du stator	Fds	46,8734	At
Force magnétisante pour les dents du rotor	Hdr	0,7	At/mm
Longueur du chemin parcouru par le flux dans les dents du rotor	ldr	11.6089	mm
Force magnétisante totale par pôle pour les dents du rotor	Fdr	8,1263	At
La force magnétisante totale à travers le circuit magnétique	Ft	307,4732	At
Courant de magnétisation	Im	1,0975	A
Volume des dents statoriques	Vds	357640	mm ³
Volume des dents rotoriques	Vdr	244070	mm ³
Coefficient variant entre 0,8 et 1,0	K5	0,8	-
Vitesse périphérique du rotor	V	10,2269	m/s
Surface de toutes les dents du stator	Sds	44924	mm ²
Surface de toutes les dents du rotor	Sdr	52021	mm ²
Pertes de surface	Psurf	12.1724	W
Coefficient variant entre 0,4 et 0,5	K6	0,4	-
Epaisseur des tôles	ε	0,47	mm
Coefficient de trapézoïdalité des dents statoriques	K2s	1	-
-	yr	1.9011	-
-	ys	2.6345	-
Coefficient d'ouverture d'encoches statoriques	K3s	0.0333	-
Fréquence de pulsation dans les dents statoriques	fps	600	-
Coefficient de trapézoïdalité des dents rotoriques	K2r	1	-
Coefficient d'ouverture d'encoches rotoriques	K3r	0.0439	-
Fréquence de pulsation dans les dents rotoriques	fpr	900	-
Pertes par pulsation	Pp	6,9858	W
Masse du fer de la culasse du stator	Gcs	6,2504	kg
Pertes dans la culasse du stator	Pcs	37,5023	W
Masse du fer des dents du stator	Gds	2.7538	kg
Pertes dans les dents du stator	Pds	20,3784	W
Pertes dans le fer	Pfe	77,0389	W
Pertes mécaniques	Pméc	30	W
Extension de la partie droite des bobines	b1	18	mm
Longueur de la partie inclinée de la tête	b2	83,2823	mm
Longueur moyenne d'une demi-spire	ls	341,6146	mm
La résistivité du cuivre à 25°C	ρ _{cu} (25)	1,8139*10 ⁻⁸	Ω . m
Résistance par phase du stator à 25°C	R1	6,4593	Ω
La résistivité du cuivre à T = 40°C	ρ _{cu} (40)	1,9156*10 ⁻⁸	Ω . m
Résistance par phase du stator à 40°C	R1	6,8216	Ω
Pertes dues à l'effet Joule au stator	Pjos	24,6502	W
Composante réelle du courant à vide	Ior	0.1097	A

Courant à vide	I_o	1,1029	A
Le facteur de puissance du moteur à vide	F_{po}	0.0995	-
La résistivité de l'aluminium pour une température de 25 °C	$\rho_{al\ 25\ ^\circ C}$	$3,1573 \cdot 10^{-8}$	$\Omega \cdot m$
Longueur d'une barre	l_b	139,05	mm
Nombre de barres	N_b	24	-
Facteur de correction pour la résistance de l'anneau	K_a	0,95	-
Résistance par phase du rotor reportée au stator à 25 °C	R_2	5,1139	Ω
La résistivité de l'aluminium pour une température de 40 °C	$\rho_{al\ 40\ ^\circ C}$	$3,3294 \cdot 10^{-8}$	$\Omega \cdot m$
Résistance par phase du rotor reportée au stator à 40 °C	R_2	5,4646	Ω
Résistance d'une barre rotorique à 40°C	R_b	$4,4972 \cdot 10^{-5}$	Ω
Résistance de l'anneau à 40°C	R_a	$2,5629 \cdot 10^{-6}$	Ω
Facteur tenant compte de la forme du bas des encoches statoriques	F_{bs}	0,6669	-
Facteur tenant compte de la forme du haut de l'encoche statorique	F_{hs}	0,4422	-
Facteur de réduction de dispersion d'encoche pour le stator	K_{des}	1	-
Réactance due à la dispersion d'encoche au stator	X_{es}	3,8	Ω
Facteur tenant compte de la forme du bas des encoches rotoriques	F_{br}	0,1771	-
Facteur tenant compte de la forme du haut de l'encoche rotorique	F_{hr}	1,2499	-
Facteur de réduction de dispersion d'encoche pour le rotor	K_{der}	1	-
Facteur de distribution de l'enroulement du rotor	K_{dr}	1	-
Facteur du pas rotorique	K_{pr}	1	-
Réactance due à la dispersion d'encoche au rotor	X_{er}	6,7562	Ω
Courant de magnétisation correspond à la chute de potentiel magnétique dans l'entrefer	I_g	0,7113	A
Réactance de magnétisation pour la dispersion différentielle	X_m	562,3329	Ω
Réactance due à la dispersion différentielle au stator	X_{ds}	5,7853	Ω
Réactance due à la dispersion différentielle au rotor	X_{dr}	13,0170	Ω
Réactance due à la dispersion de boucle au stator	X_{bs}	0	Ω
Réactance due à la dispersion de boucle au rotor	X_{br}	0	Ω
Facteur qui tien compte de l'écrasement des chignons	K_{ch}	0,5	-

Réactance due à la dispersion des têtes de bobines du stator	Xts	2,6581	Ω
-	cr	0,228	-
Extension des barres du rotor	ba	0	mm
La distance radiale entre le centre de l'anneau et le centre de l'ensemble des conducteurs du stator dans une encoche	dc	17,9201	mm
Réactance due à la dispersion des têtes de bobines du rotor	Xtr	1,6447	Ω
L'inclinaison des encoches	θ_{bi}	0,3491	rad
Réactance due à la disposition en biais	Xbi	2,8549	Ω
Réactance du stator par phase	X1	15,0984	Ω
Réactance du rotor par phase	X2	24,2729	Ω
Réactance de magnétisation pour la branche shunt	Xm	349,3645	Ω
La tension induite par phase	Ei	388	V
La résistance qui tien compte des pertes dans le fer	Rfe	5862,4	Ω
Caractéristiques en charge			
Impédance rotorique du moteur	Z2	94,2556 \angle 14,92°	Ω
-	Z	84,5394 \angle 28,22°	Ω
Impédance totale du moteur	Zt	98,2090 \angle 34,11°	Ω
Courant du stator	I1	4,0729 \angle -34,11°	A
Le facteur de puissance du moteur	Fp	0,8279	-
Le courant rotorique reporté au stator	I2	3,6531 \angle -20,80°	A
La puissance à travers l'entrefer	Pg	3646,3	W
Les pertes dans le cuivre du rotor	Pcu2	218,7764	W
La puissance utile du moteur	Pu	3397,5	W
Les pertes dans le cuivre du stator	Pcu1	339,4882	W
Les pertes additionnelles	Padd	16,9875	W
La puissance entrante	Pin	4079,8	W
Le rendement	η	83,28	%
Glissement à pleine charge	s	5,298	%
Vitesse à pleine charge	n	1420,5	tr/min
Couple à pleine charge	C	20,1685	N.m
Caractéristiques au couple maximal			
Glissement qui correspond au couple maximal	s	13,68	%
Impédance rotorique du moteur	Z2	46,7526 \angle 31,27°	Ω
-	Z	43,2125 \angle 37,12°	Ω
Impédance totale du moteur	Zt	58,3047 \angle 44,93°	Ω
Courant du stator	I1	6,8605 \angle -44,93°	A
Le courant rotorique reporté au stator	I2	6,3410 \angle -39,08°	A
La puissance utile du moteur	Pu	4130,8	W
Vitesse au couple maximal	n	1294,9	tr/min
Couple maximal	C	30,4658	N.m
Caractéristique au démarrage			
-	Km	1,08	-

Paramètre utile pour la détermination du facteur de correction X_c	λ	93,6724	-
Facteur qui multiplie la résistance des barres pour la section contenue dans le circuit magnétique	R_c	1	-
Résistance rotorique au démarrage à 25 °C	$R_2 \text{ dém}$	5,1139	Ω
Facteur de correction pour la réactance de fuite au démarrage	K_h	1,2	-
L'impédance équivalente au démarrage pour le stator	$Z_1 \text{ dém}$	14,1432 \angle 62,82°	Ω
L'impédance équivalente au démarrage pour le rotor	$Z_2 \text{ dém}$	20,8638 \angle 61,63°	Ω
L'impédance équivalente au démarrage du moteur	$Z_{\text{dém}}$	34,7907	Ω
Courant à rotor calé	I_{rc}	11,4973	A
La tension induite par phase	E_i	240	V
Force magnétisante par encoche pour le courant de démarrage à rotor calé	$F_{\text{dém}}$	4008,6	At
Coefficient utilisé pour le calcul de K_g	λ_g	4981,11	-
Facteur qui varier en fonction de λ_g	K_g	0,4479	-
Facture utilisé pour la détermination de la valeur ajoutée afin de traiter le haut de l'encoche du rotor	C_{er}	8,5817	-
Facture utilisé pour la détermination de la valeur ajoutée afin de traiter le haut de l'encoche du stator	C_{es}	4,9379	-
Valeur ajouté afin de traiter le haut de l'encoche du stator	ΔF_{hs}	0,2694	-
Valeur ajouté afin de traiter le haut de l'encoche du rotor	ΔF_{hr}	1,5987	-
Réactance due à la dispersion d'encoche au stator au démarrage	$X_{es} \text{ dém}$	2,8770	Ω
Réactance due à la dispersion d'encoche au rotor au démarrage	$X_{er} \text{ dém}$	-0,8581	Ω
Réactance due à la dispersion différentielle au stator au démarrage	$X_{ds} \text{ dém}$	2,5915	Ω
Réactance due à la dispersion différentielle au rotor au démarrage	$X_{dr} \text{ dém}$	5,8308	Ω
La réactance totale de fuite au démarrage pour le stator	$X_1 \text{ dém}$	10,9814	Ω
La réactance totale de fuite au démarrage pour le rotor	$X_2 \text{ dém}$	9,4724	Ω
Impédance rotorique du moteur	Z_2	10,7647 \angle 61,63°	Ω
-	Z	10,4708 \angle 62,36°	Ω
Impédance totale du moteur	Z_t	23,2041 \angle 60,80°	Ω
Courant à rotor calé	I_{rc}	17,2383	A
Le courant rotorique reporté au stator	I_2	16,7677	A
Couple de démarrage	$C_{\text{dém}}$	28.22	N.m

IV.3.3. Comparaison des résultats calculés avec ceux réels

Dans cette étape, on présentera une comparaison des résultats obtenus par le calcul et ceux réels :

Tableau IV.4. Comparaison des résultats

Désignations	Symboles	Valeurs calculées	Valeurs réelles	Unités
Diamètre extérieur du stator	De	190,1583	145	mm
Diamètre intérieur du stator	D	131,1437	88,5	mm
Epaisseur de l'entrefer	g	0.4652	0.4167	mm
Diamètre du rotor	Dr	130,2132	87.6664	mm
Diamètre intérieur du rotor	Daxe	29,3553	37	mm
Longueur totale du stator	l	139,05	130	mm
Le pas polaire	τ	103	69.47	mm
Nombre d'encoches du stator	Nes	36	36	Encoches
Nombre d'encoches du rotor	Ner	24	28	Encoches
Surface nette de chaque encoche	Sne	80,4987	75,1838	mm ²
Nombre de conducteurs par encoche	Nc	72	54	-
Section d'un conducteur du stator	as	0.8289	0.4923	mm ²
Tension d'alimentation du moteur	E	400	380	V
Courant par phase nominal	I	3,8127	4.0133	A
Flux par pôle	\emptyset	0,0042	0.0053	Wb
Densité de flux dans l'entrefer	Bg	0,4608	0.91	T
Densité maximale de flux dans les dents statoriques	Bds	1,55	1.722	T
Densité de flux dans la culasse du stator	Bcs	1,3114	1.536	T
Les pertes dans le cuivre du stator	Pcu1	339,4882	232.75	W
Les pertes dans le cuivre du rotor	Pcu2	218,7764	191.74	W
Pertes dans le fer	Pfe	77,0389	208.45	W
Pertes mécaniques	Pmec	30	26.80	W
Courant à rotor calé	Irc	17,2383	42	A
Courant nominal de ligne	In	6.8605	7	A
Résistance par phase du stator à 20°C	R1	6.33	5.81	Ω
La puissance absorbée	Pin	4079,8	3760	W
La puissance utile du moteur	Pu	3397,5	3000	W
Le facteur de puissance du moteur	Fp	0,8279	0,83	-
Le rendement	η	83,24	79	%
Couple nominal	Cn	20,1685	20	N.m
Couple de démarrage	Cd	27,4620	52	N.m
Couple maximal	Cm	30,4658	54	N.m

IV.3.4. Interprétation des résultats obtenus

- On constate que les dimensions du circuit magnétique sont acceptables à l'exception de la section nette de l'encoche, et les densités de flux qui sont légèrement inférieures aux valeurs réelles.
- On remarque aussi que les valeurs des couples sont inférieures à celles de L'ENEL, et ces valeurs correspondent à la classe B des moteurs à cage d'écureuil selon les normes établit par la NEMA [3].

NB : Pour l'objectif tracé par l'entreprise nationale d'Electro-industrie concernant l'amélioration du rendement de la machine en utilisant une tension de 400 V est en quelque sorte réalisé puisque il est passé de 79% à 84%.

IV.4. Procédure de calcul avec éléments finis

Dans cette Partie on s'intéressera à la simulation du moteur à l'aide du logiciel 'F.E.M.M', qui se sert de la méthode des éléments finis bidimensionnels pour la simulation des dispositifs électromagnétiques. L'utilisation du logiciel permet d'obtenir de nombreux renseignements sur les performances du moteur qui sont très utiles pour comprendre le comportement du moteur qui sera construit.

IV.4.1. Modèle du dispositif à étudier

Le modèle électromagnétique basé sur la méthode des éléments finis est appliqué sur le moteur, dont nous avons procédé à son calcul avec le logiciel du F.E.M.M.

Dans notre cas, si on néglige les effets de bords de la machine et en supposant que cette dernière est suffisamment longue, le problème peut être simplifié en 2D puisque le système ne possède aucune variation des grandeurs suivant l'axe (oz) (Figure IV.2). La machine est donc étudiée en coupe (plan xoy).

Nous avons donc :

$$J = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_z(x, y) \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_x(x, y) \\ B_y(x, y) \\ 0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x, y) \end{bmatrix}$$

Le modèle géométrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil est représenté sur la figure (IV.2).

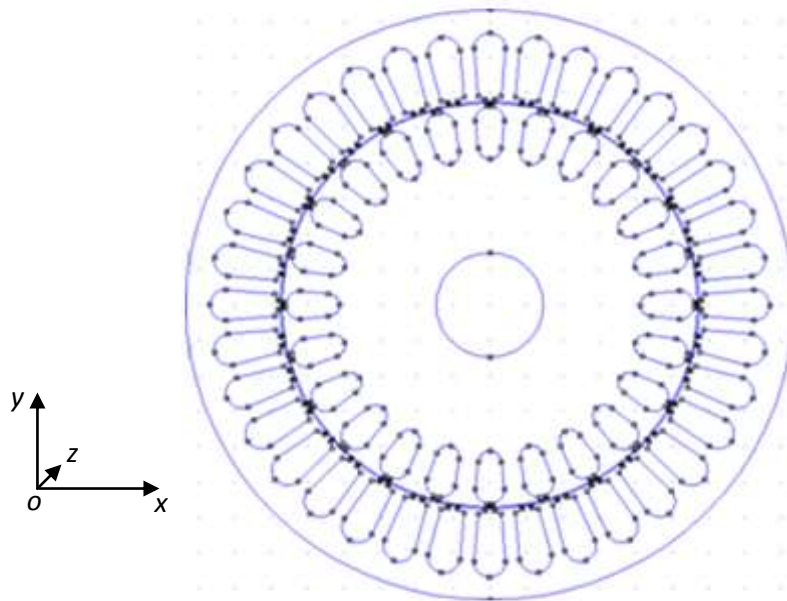


Figure IV.2 : Géométrie du moteur

IV.4.2. Maillage par éléments finis

La figure (IV.3) montre le maillage par éléments finis du domaine d'étude utilisé pour le modèle électromagnétique. Le maillage, qui contient des éléments triangulaires du premier ordre, est généré par F.E.M.M, le nombre de nœuds est égale à (29148). On remarque une intense concentration du maillage dans l'entrefer. Pour résoudre le problème électromagnétique il faut imposer sur le contour extérieur de la machine la condition à la limite de Dirichlet ($A=0$).

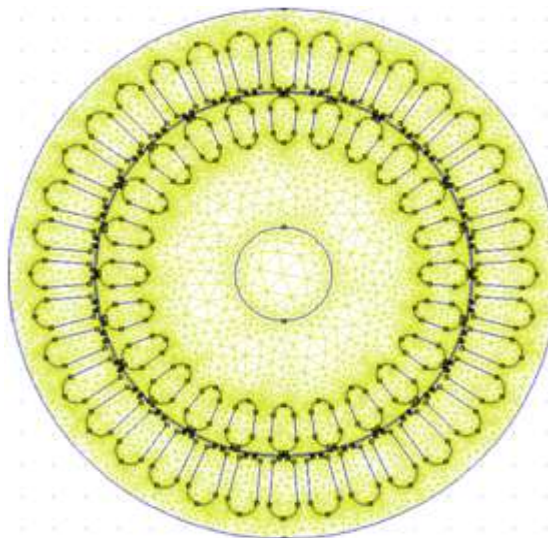


Figure IV.3 : Maillage du domaine d'étude

IV.4.3. Résultats de simulation

Les courants (i_1, i_2, i_3) alimentant les trois phases du moteur sont répartis dans les encoches statoriques s'exprimant comme suit :

$$\begin{cases} i_1 = I \cdot \cos(\omega t) & \rightarrow \text{phase 1} \\ i_2 = I \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \rightarrow \text{phase 2} \\ i_3 = I \cdot \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) & \rightarrow \text{phase 3} \end{cases}$$

La distribution du potentiel vecteur magnétique A en tout point de la machine à l'instant ($t=T/8$) est donné par la figure (IV.4).

On remarque que ces lignes du potentiel A se referment autour d'un pôle du moteur et on constate également une non pénétration de ces lignes au encoches rotoriques. Cela est dû à l'effet de peau accentué lorsque le rotor est calé. En faits, les courants induits rotoriques repoussés vers l'extérieur de la cage crée une sorte d'écran empêchant la pénétration des lignes du potentiel vecteur A du rotor.

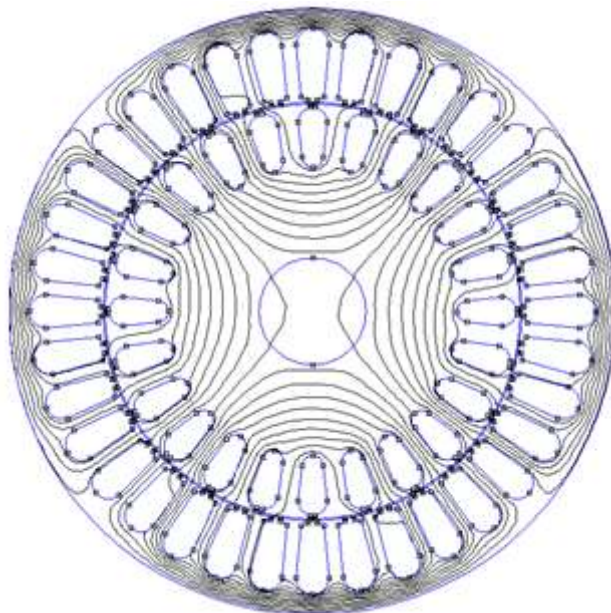


Figure IV.4 : Répartition des lignes du champ

La figure IV.5 montre la répartition de l'induction magnétique B calculé dans le cas linéaire (saturation non prise en compte), la valeur moyenne dans l'entrefer voisine les 0.8Tesla.

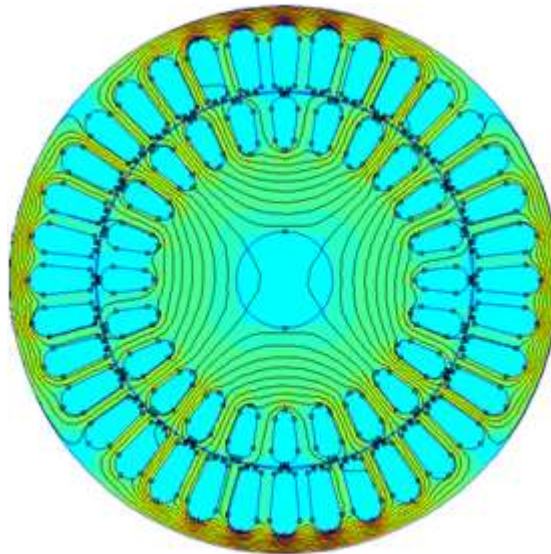


Figure IV.5 : Répartition de l'induction magnétique

IV.5. Conclusion :

Ce chapitre comprend une présentation détaillée du processus de fabrication des moteurs asynchrones à l'entreprise d'Electro-Industrie d'AZAZGA. Il comporte aussi une application sur un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil de 3 KW, et une étude comparative des résultats de calcul théoriques aux résultats pratiques obtenus sur un moteur réel de même puissance. Enfin, un calcul électromagnétique du moteur est effectué à l'aide de la méthode des éléments finis en appliquant le logiciel F.E.M.M, ce calcul nous a permis d'avoir une bonne répartition du potentiel vecteur magnétique A avec des valeurs acceptables ce qui confirme les résultats obtenus par le dimensionnement.

Conclusion Générale

Les objectifs visés au cours de ce travail sont : l'étude, le dimensionnement, et l'amélioration du rendement d'un moteur asynchrone triphasé à simple cage d'écurueil de marque Electro-industrie.

Tout d'abord nous avons décrit le moteur ; sa constitution et son principe de fonctionnement avec une illustration des caractéristiques du moteur, puis nous avons présenté une méthode permettant le dimensionnement géométrique du circuit magnétique, et qui à l'aide du circuit équivalent nous arriverons à déterminer les diverses performances du moteur.

Ensuite un processus de fabrication est présenté, et à partir des données du cahier des charges, une application numérique de la méthode utilisée est effectuée. Les résultats obtenus sont comparés à ceux donnés par l'ENEL. En outre un calcul électromagnétique est réalisé à l'aide de la méthode des éléments finis en exploitant l'outil du F.E.M.M.

Enfin, on peut conclure que le dimensionnement et la conception des machines électriques est une activité de recherche très importante surtout en matière d'optimisation, et l'une des plus prestigieuses découvertes du siècle dernier et reste aujourd'hui un thème de recherche très prisé par les laboratoires de recherches, et vu la différence des méthodes utilisés l'objectif reste le même : c'est l'amélioration des performances des machines.

Conclusion Générale

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **Rafik MERAD**, « Outils de diagnostic appliqué à la machine asynchrone triphasé à cage d'écureuil », thèse magister, université de Constantine 2005/2006.
- [2] **Théodore WILDI**, 3^{ème} édition, Dépôt légal 2000/0074/56.
- [3] **REAL-PAUL BOUCHARD GUY OLIVIER**, « Conception de moteurs asynchrones triphasés », édition de l'école polytechnique de Montréal, 1997.
- [4] **Philippe LE BRUNE**, «Technologie, choix et alimentation des machines asynchrones », lycée Louis ARMAND Strasbourg.
- [5] **Radouane BOUSSEKSOU**, « Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic », thèse de magister, université Mentouri Constantine 2007.
- [6] **Guy Chateigner, Michel Boës, Daniel Bouix, Jacques Vaillant, Daniel Verkindère**, Manuel de génie électrique, « Rappels de cours, méthodes, exemples et exercices corrigés », Paris 2006.
- [7] **J.C.LECOUFLE**, Actionneurs électriques industriels, « technologie et méthodes de choix », Centre technique des industries mécaniques (CTIM), 1993.
- [8] **Cours d'Electricité 2-Électrotechnique**, « Le moteur asynchrone triphasé », I.U.T Mesures Physiques, université Montpellier 2, 2008-2009.
- [9] **Schneider Electric**, « Guide des solutions d'automatisme », 2007
- [10] **ALBERT TERRAS**, Physique appliqué, « précis de physique et électricité appliquées en productique », Bréal 2004.
- [11] **Réal-Paul Bouchard et Guy Olivier**, « Electrotechnique 2^{ème} édition », école Polytechnique de Montréal 1999.
- [12] **Philippe LE BRUN**, variation de vitesse des machines asynchrones, « Étude des solutions de variation de vitesse pour machine asynchrone de puissance inférieure à 1 MW », lycée Louis ARMAND.
- [13] **Bernard LAPORTE**, Machines électriques tournantes, « conception, dimensionnement, fonctionnement), Ellipses édition marketing S.A 2007.
- [14] **CHABOUR Linda, HAMMACHE Samia**, mémoire ingénieur, « Etude et conception d'un moteur asynchrone à encoches profondes en présence d'effet pelliculaire », université de Bejaia 2006.
- [15] **REBBAH REDJEM**, Thèse Magister, « Calcul et Conception Assistée par Ordinateur des Machines Electriques, Application aux moteurs asynchrones », université Mentouri de Constantine 2006.

[16] **Catalogue d'Electro-Industries**, Azazga wilaya de Tizi-Ouzou, 2013.

[17] **Bouzerdoun M^{ed} Salah, Bourouina youcef**, mémoire ingénieur, « Conception et dimensionnement des moteurs asynchrones à cage d'écureuil de petite et de moyennes puissances », université de Jijel 2007.

[18] **HAMROUNE Naguib, KACIMI Mouhand Said, MEBAREK Ahmed**, « Contribution à l'élaboration d'un logiciel de calcul d'une série de machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil », université MOULOUD Mammeri 1998.

Annexes

Annexe A

Tableau A.1. Le rapport entre les diamètres du stator [3] [17] :

Nombre de pôles	De/D
2	1,85 à 1,95
4	1,45 à 1,55
6	1,35 à 1,43
8	1,28 à 1,35
10	1,23 à 1,28
12	1,21 à 1,23

Tableau A.2. Plages usuelles pour c1 en fonction du nombre de pôles [3] [17] :

Nombre de pôles	c1
2	2,95 à 4,30
4	2,25 à 2,85
6	1,95 à 2,45
8	1,80 à 2,20
10	1,70 à 2,10
12	1,60 à 2,00
14	1,55 à 1,90
16	1,50 à 1,85

Tableau A.3. Valeur du facteur de pas pour divers harmoniques [3] :

γ	Kp ¹	Kp ³	Kp ⁵	Kp ⁷
180/180 = 1	1,000	-1,000	1,000	-1,000
170/180 = 0,944	0,996	-0,962	0,906	-0,819
160/180 = 0,889	0,985	-0,866	0,643	-0,342
150/180 = 0,833	0,966	-0,707	0,259	0,259
140/180 = 0,778	0,940	-0,500	-0,174	0,766
130/180 = 0,722	0,906	-0,259	-0,574	0,996
120/180 = 0,667	0,866	0,000	-0,866	0,866
110/180 = 0,611	0,819	0,259	-0,996	0,423
100/180 = 0,556	0,776	0,500	-0,940	-0,174
90/180 = 0,500	0,707	0,707	-0,707	-0,707

22 ½	0,607	0,292	0,0591	0,666	2,65
23	0,574	0,259	0,0666	0,630	2,36
23 ½	0,541	0,232	0,0743	0,597	2,13
24	0,511	0,205	0,0842	0,564	1,87
24 ½	0,483	0,183	0,0941	0,536	1,69
25	0,455	0,162	0,106	0,506	1,48
25 ½	0,429	0,145	0,119	0,480	1,33
26	0,404	0,128	0,135	0,452	1,17
26 ½	0,381	0,114	0,151	0,429	1,05
27	0,361	0,102	0,169	0,406	0,935
28	0,320	0,0804	0,214	0,366	0,740
29	0,287	0,0647	0,266	0,330	0,595
30	0,254	0,0507	0,340	0,295	0,468
31	0,226	0,0401	0,430	0,264	0,372
32	0,203	0,0324	0,532	0,239	0,304
33	0,180	0,0255	0,675	0,213	0,240

Tableau A.6. Valeurs de i_d et de i_w en fonction de la tension et de diamètre extérieur du stator [3][17] :

Tension (V)	Diamètre à l'entrefer (mm)					
	0 à 400		400 à 1000		1000 et plus	
	Augmentation d'épaisseur (mm)					
	i_d	i_w	i_d	i_w	i_d	i_w
0 à 300	6,1	1,5	6,3	1,6	7,9	2,0
300 à 600	6,3	1,9	7,4	2,1	8,6	2,4
600 à 1500			7,9	2,4	9,4	2,8
1500 à 3000			9,1	3,0	11,6	3,8

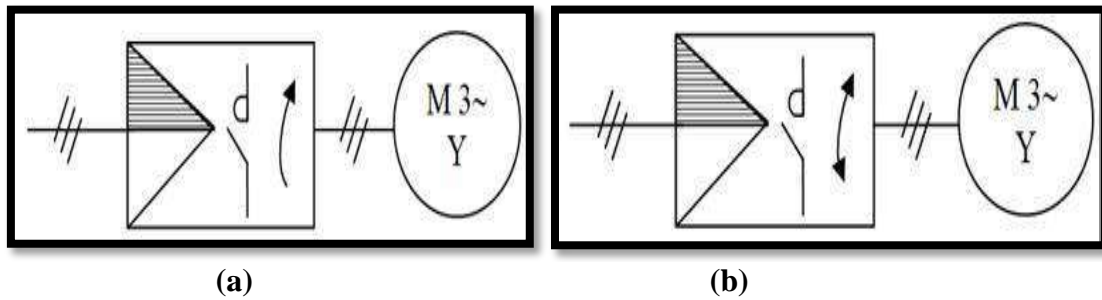
Tableau A.7. Nombre d'encoches au rotor recommandé en fonction du nombre de pôles et du nombre d'encoches au stator [3] :

Nes	Ner				Nes	Ner			
	Nombre de pôles					Nombre de pôles			
	2	4	6	8		2	4	6	8
18	12					72			
	24								
24	18	18			72	48	48	50	50
	30	30				54	54	54	54
30	18					60	60	58	58
	24					66	90	62	60
	36					90		82	84
36	24	24	20					86	86
	30	28	22					88	90
	42	30	26					90	
		42	46		84		60		
		44	50				66		
42	24						72		
	30						96		
	36						102		
	48				90			64	
48	30	30		26				68	
	36	36		30				70	
	60	40		34				72	
		60		36				74	
				38				94	
				60				98	
54	30		34					100	
	36		36					104	
	48		38		96		70		66
	60		40				78		70
	66		44				114		74
			64				118		78
60	36	36							82
	48	42							114
	72	48							118
									120

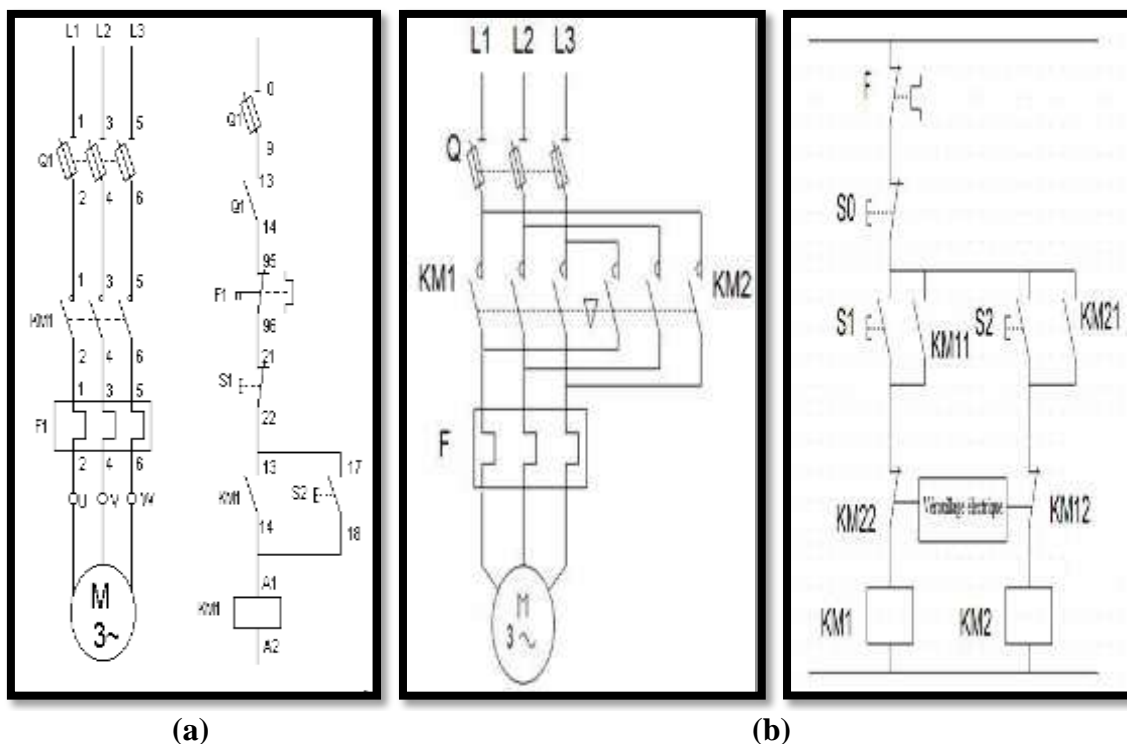
Tableau A.8. Valeurs des paramètres dtb et b1 en fonction de la tension [3] :

Tension (V)	dtb (mm)	b1 (mm)
0 à 300	2,0	12
300 à 600	2,5	18
600 à 1500	3,0	22
1500 à 3000	3,5	25

Annexe B



Figures B.1 : Schémas fonctionnels pour le démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)



Figures B.2 : Circuits puissances et commandes pour le démarrage direct d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)

Avec :

- Q1 : Sectionneurs
- KM1 : Contacteurs
- F1 : Relais thermiques



Q1

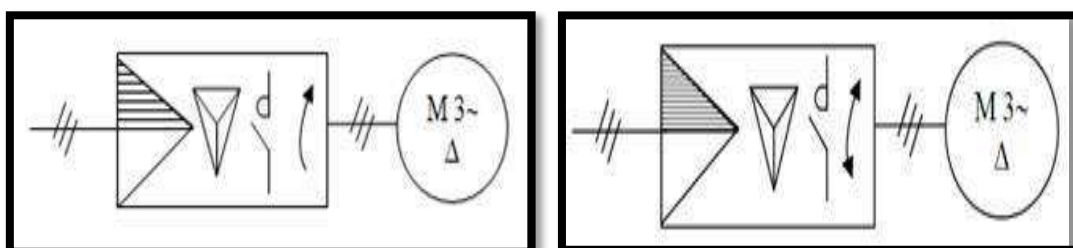
KM1

F1

Figures B.3 : Représentation des composants (Q1, KM1, F1)

- Le sectionneur d'isolement avec fusible permet de déconnecter le moteur du réseau. Il protège également le dispositif contre les risques de court circuit grâce aux fusibles.
- Le contacteur permet d'alimenter le moteur avec une commande manuelle ou automatique avec l'automate programmable.
- Le relais thermique protège le moteur contre les surcharges de courant, l'intensité maximale admissible est réglable. Son action différentielle permet de détecter une différence de courants entre les phases en cas de coupure d'une liaison par exemple.

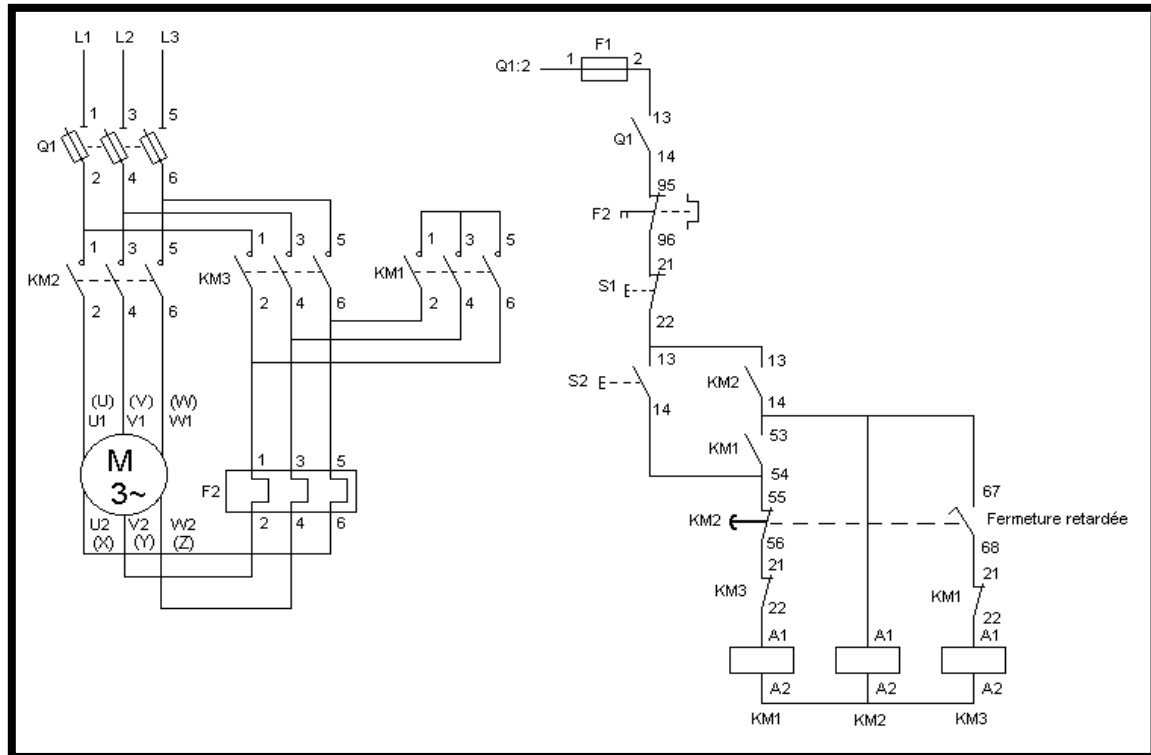
Si on veut démarrer un moteur asynchrone triphasé dans deux sens de rotation, par un bouton poussoir S1, on commande le sens 1 et on démarre le sens 2 par un bouton poussoir S2 et l'arrêter par l'appui sur un bouton poussoir S0.



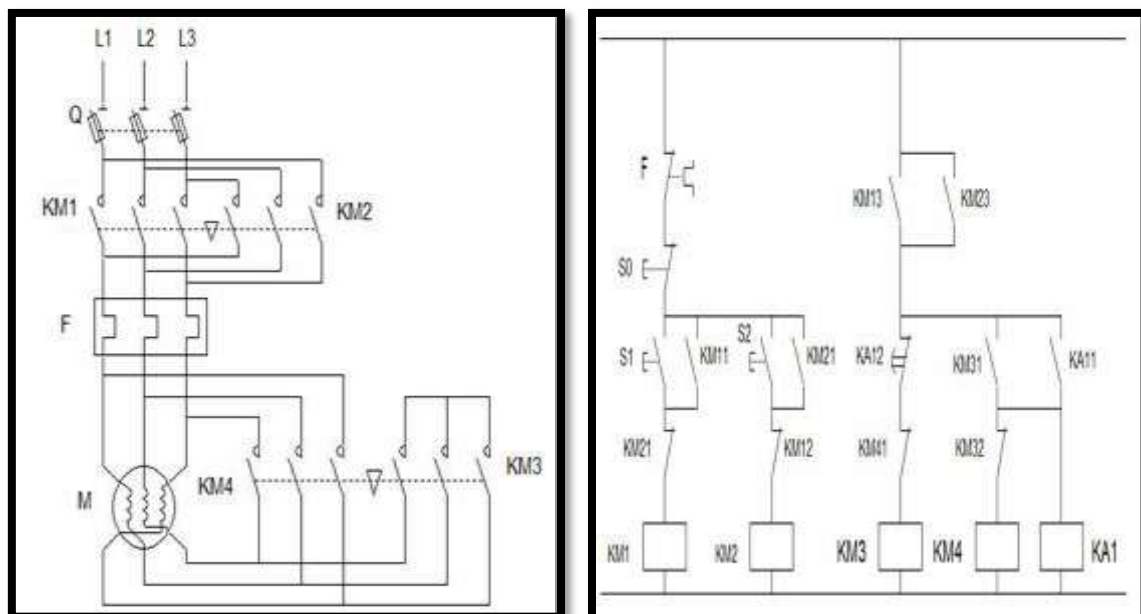
(a)

(b)

Figures B.4 : Schémas fonctionnels pour le démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)

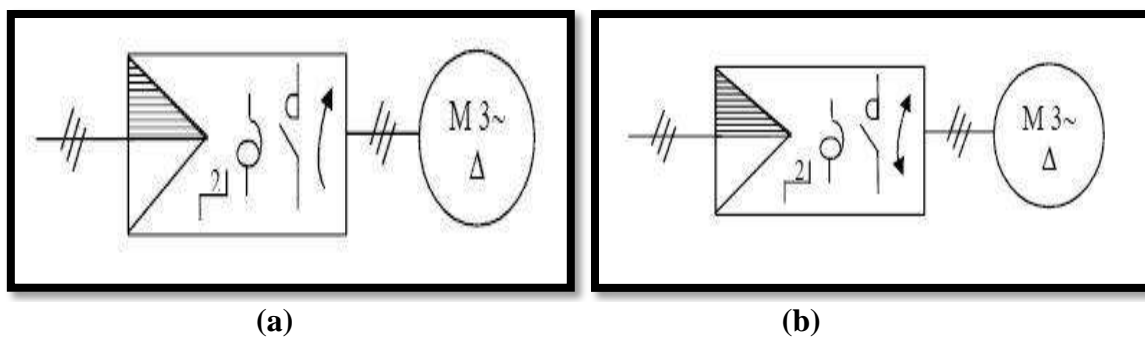


(a)

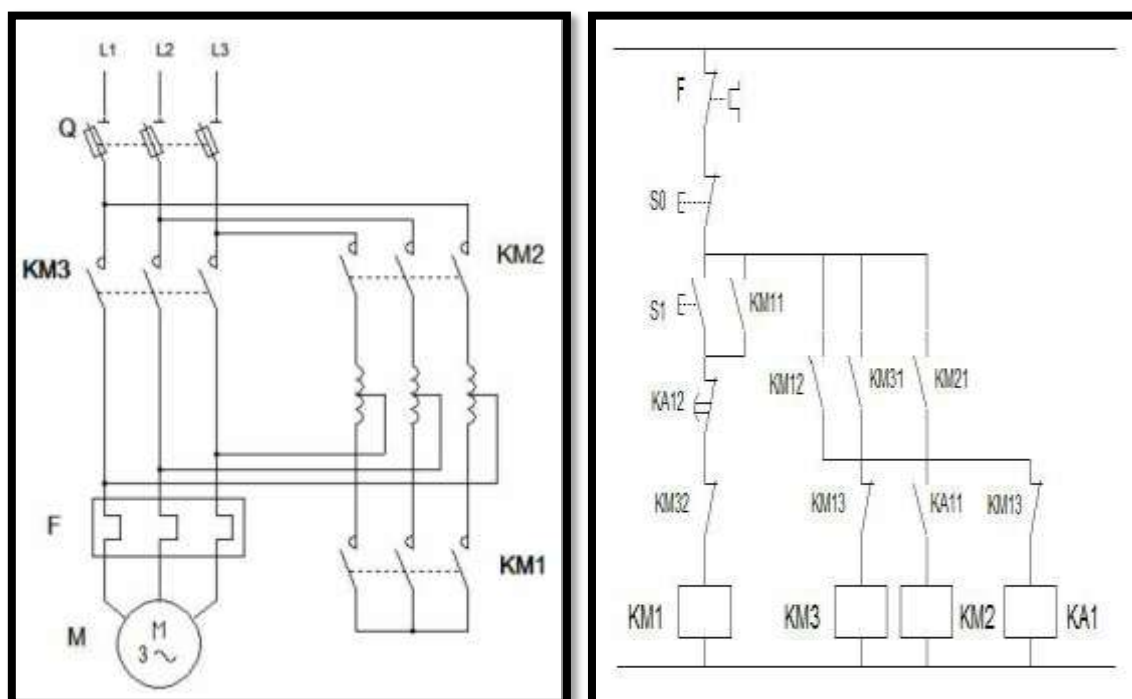


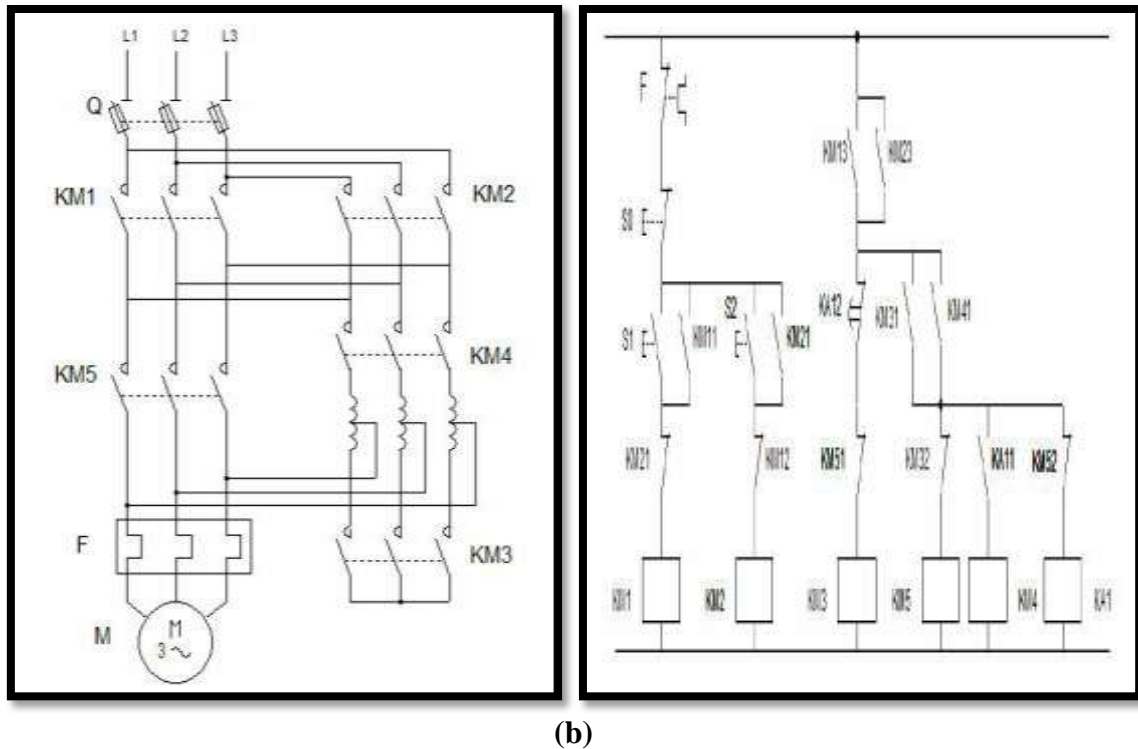
(b)

Figures B.5 : Circuits puissances et commandes pour le démarrage étoile triangle d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)

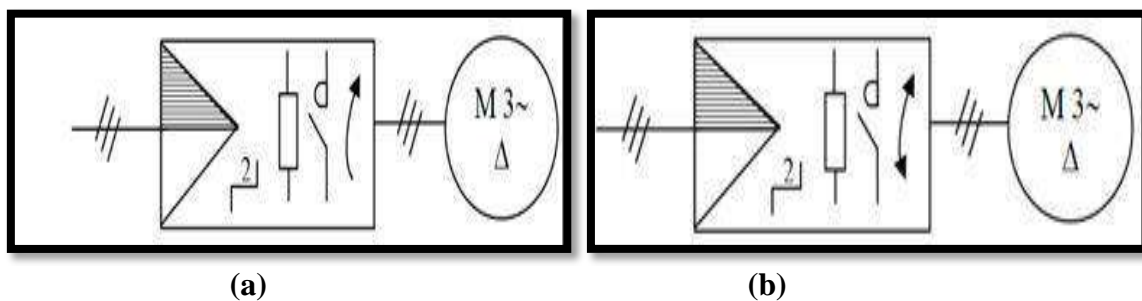


Figures B.6 : Schémas fonctionnels pour le démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écurie (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)

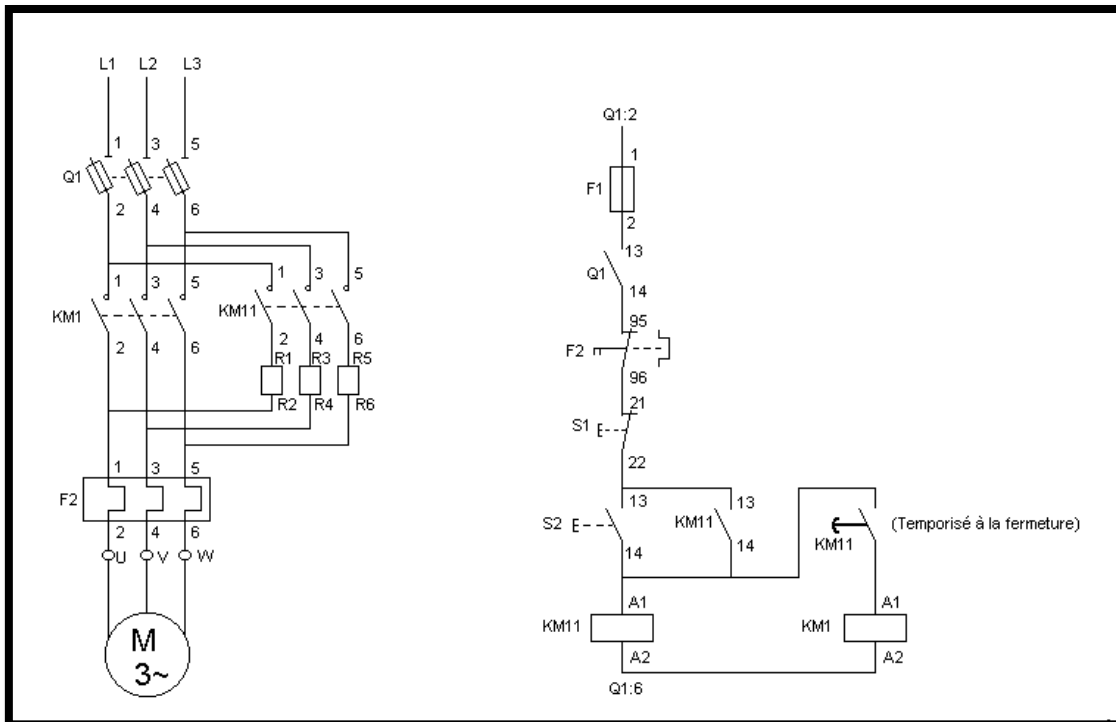




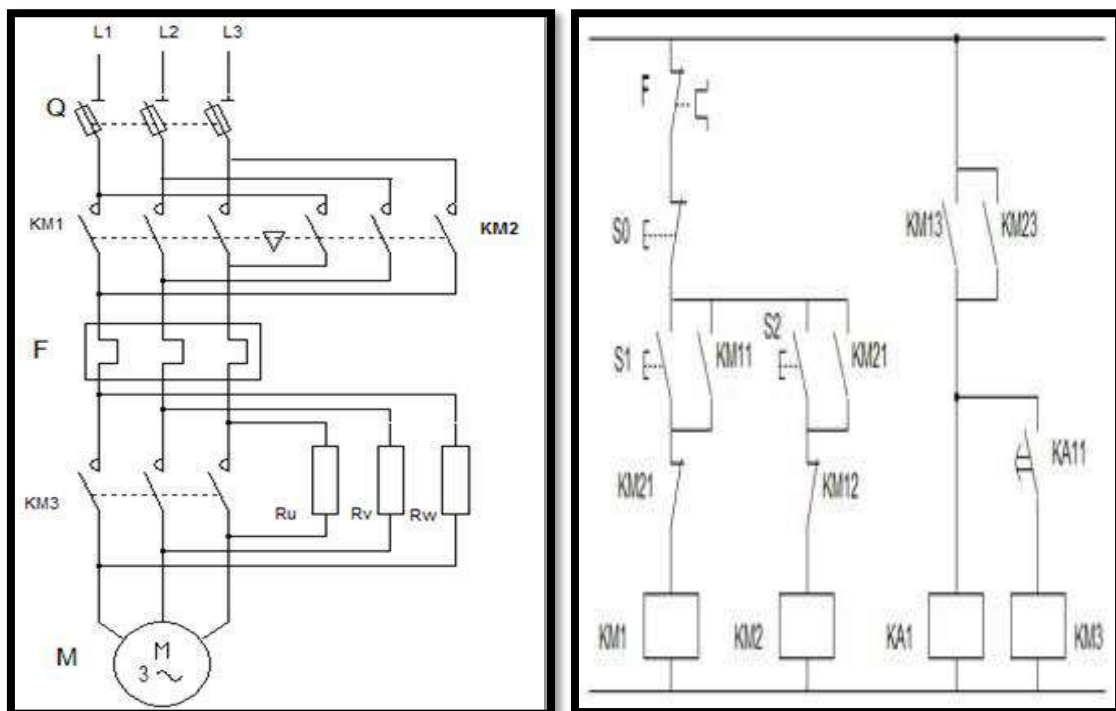
Figures B.7 : Circuits puissances et commandes pour le démarrage par autotransformateur d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)



Figures B.8 : Schémas fonctionnels pour le démarrage par des résistances statotique d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)



(a)



(b)

Figures B.9 : Circuits puissances et commandes pour le démarrage par résistances statoriques d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, (a : un seul sens de marche, b : deux sens de marches)

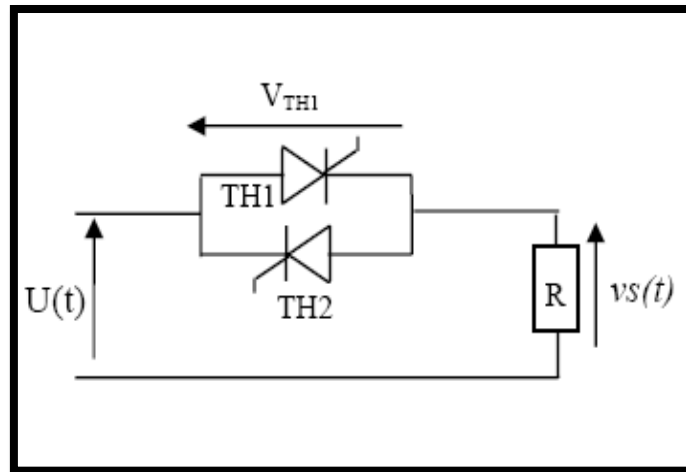


Figure B.10 : Principe de gradateur de tension

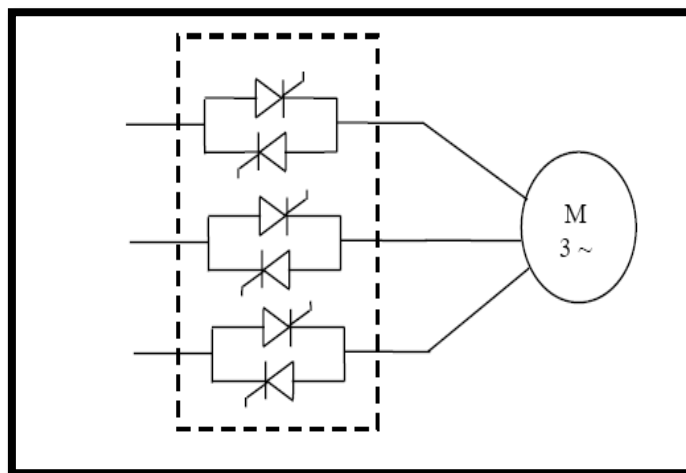


Figure B.11 : Démarrage par gradateur de tension

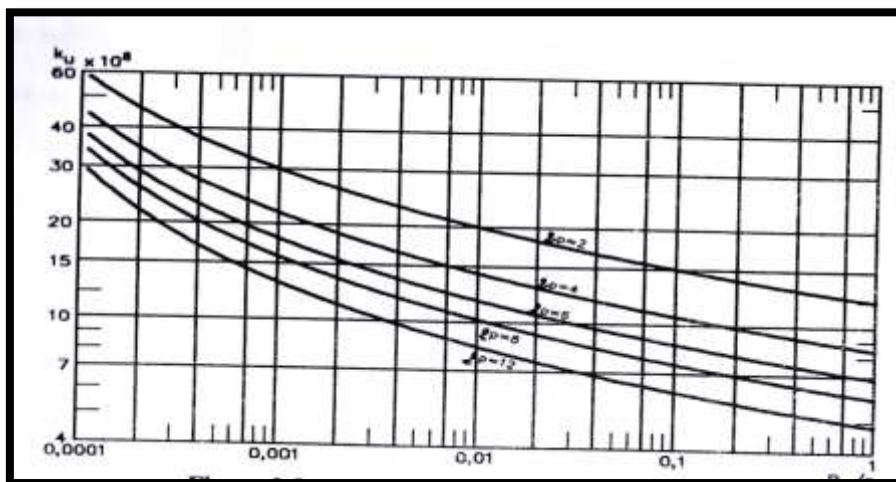


Figure B.12 : Coefficient d'utilisation en fonction du nombre de pôles et du rapport entre la puissance et la vitesse [3]

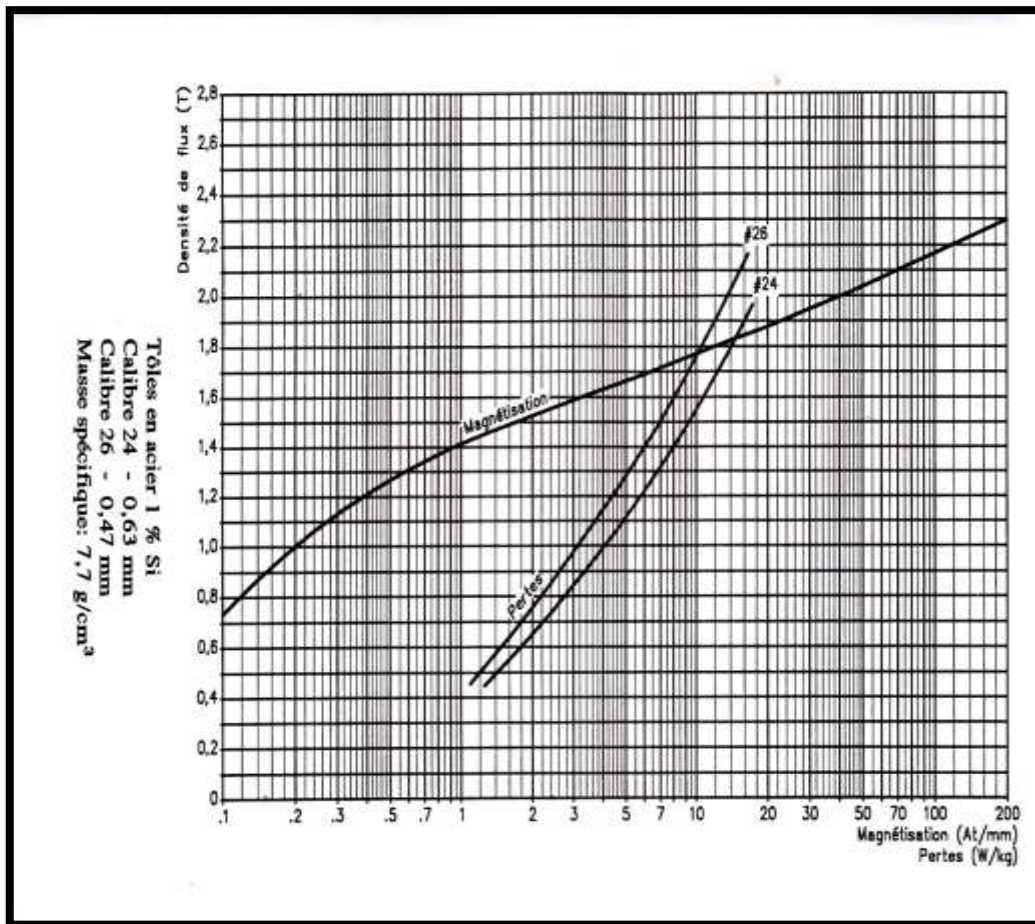
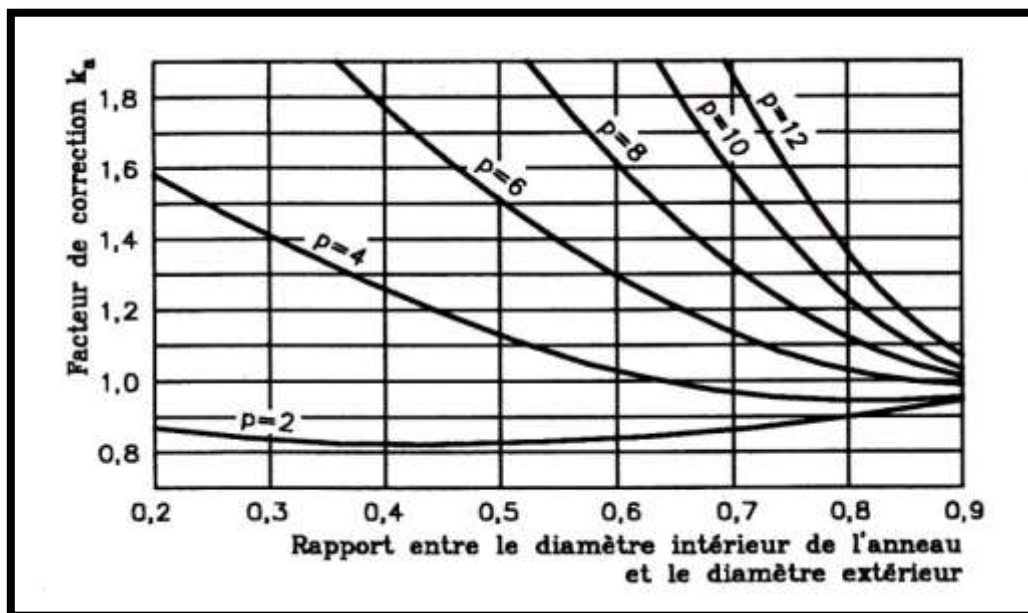


Figure B.13 : Courbe de magnétisation et pertes dans le fer [3]

Figure B.14 : Facteur de correction K_a pour le calcul de la résistance des anneaux [3]