

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*Ministère de l'Enseignement supérieur
et de la Recherche Scientifique*



Faculté de Génie électrique et de l'informatique

Département : Electrotechnique



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

Option : Machines électriques

THÈME :

DIMENSIONNEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE DE GRANDE PUISSANCE ALIMENTÉ PAR 5,5KV

Réalisé par :

➤ Mr :TADRIST Menad

Encadrés par :

➤ Mr : MOHELEBI. H

➤ Mr : AHMEDI Saad

Université de Tizi Ouzou

2010 - 2011

Remerciements

En premier je tiens à remercier mes parents qui se sont tant sacrifié pour mon éducation et mon instruction.

Je tiens également à remercier mon promoteur Mr MOHELEBI et mon Co promoteur Mr AHMEDI pour leurs aide et leurs conseils tout le long de l'élaboration de ce travail.

Enfin, je remercie vivement les membres de jury qui me feront l'honneur d'analyser ce mémoire.

Introduction générale.....	01
-----------------------------------	-----------

Chapitre I : Présentation du champ d'exploitation du gaz de HASSI R'MEL

I-1.Situation géographique	03
I-2.Historique du champ de Hassi R'mel.....	03
I-3.Les activités du champ de HASSI R'MEL.....	03
I-4.Présentation du centre de traitement de gaz de Hassi R'mel sud.....	04
I-5.Le système de distribution électrique du CTG HR-SUD	06

Chapitre II : Aperçu théorique sur la machine asynchrone et sur la turbine à gaz

II-1.Constitution	15
II-1-1.Le stator	16
II.1.2-Le rotor	17
II.1.2-a) Les moteurs asynchrones à rotor bobiné	17
II.1.2-b) Le moteur asynchrone à cage	19
II.1.3-Les organes mécaniques	22
II.1.4- Les conducteurs	23
II.1.5-Bobinages	25
II.1.6-Isolation	28
II.2-Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	31
II.3-Aperçu théorique sur la turbine à gaz	31
II.3.1-Constitution d'une turbine à gaz	33
II.3.2-Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz	33
II.3.3-Maintenance des turbines.....	33

Chapitre III : Calcul du moteur asynchrone

III.1. Choix du nombre d'encoches rotorique et statorique.....	34
III.2. Calcul des dimensions principales du moteur.....	35
III.2-1.Calcul de la longueur active du moteur	35
III.2.2.Coefficient de longueur	38
III. 3. Dimensionnement des feuilles statorique et rotorique.....	38
III.3.1.Dimensionnement de la feuille statorique	38

III.4. Calcul du bobinage statorique	44
III.4.1.Calcul du nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche statorique.....	45
III.4.2.Calcul du nombre de spires d'une branche parallèle d'une phase	46
III.4.3.Calcul de la section effective d'un conducteur de l'enroulement statorique.....	47
III.4.4.Calcul du coefficient de remplissage des encoches statoriques.....	50
III.5.Vérification des charges électromagnétiques	53
III.6.dimensionnement de la feuille rotorique	53
III.7.Dimensionnement de la bague de court-circuit.....	55
III.8. Calcul du circuit magnétique.....	56
III.8.1.Circuit magnétique statorique	57
III.8.2.Force magnétomotrice dans l'entrefer	58
III.8.3.Circuit magnétique rotorique	58
III.8.4.Force magnétomotrice totale par paire de pôles	58
III.8.5.Calcul du coefficient de saturation de la machine	59
III.8.6.Calcul du coefficient de saturation des dents	59
III.8.7.Calcul du courant de magnétisation du moteur	59
III.8.8.Calcul de la réactance de magnétisation	61
III.8.9.Calcul du coefficient de dispersion magnétique de l'enroulement statorique	61
III.8.10.Calcul de la force magnétomotrice à vide.....	62
III.9.Calcul des paramètres électriques des enroulements	65
III.9.1.Résistance active d'une phase de l'enroulement statorique.....	65
III.9.2.Réactance de dispersion d'une phase de l'enroulement statorique.....	66
III.9.3.Résistance active de la barre rotorique	66
III.9.4.Résistance de la partie de la bague qui se situe entre deux barres voisines.....	67
III.9.5.Résistance de la bague ramenée à la barre	69
III.9.6.Résistance d'une phase rotorique.....	70
III.9.7.Résistance de la cage ramenée au stator.....	73
III.9.8.Réactance du rotor	73
III.9.9.Réactance de fuite de l'enroulement rotorique ramenée à l'enroulement statorique	73 74
III.9.10.Paramètres de démarrage	74
Chapitre IV calcul des performances du moteur	74
IV.1. Les pertes électriques dans les enroulements statoriques et rotoriques.....	79
IV.1.1.Les pertes électriques statoriques	79

IV.1-2. Les pertes électriques dans la cage rotorique	79
IV.1.3. Les pertes magnétiques principales	80
IV.1.3-1. Pertes magnétiques dans la culasse statorique	80
IV.1.3.2. Les pertes magnétiques dans les dents statoriques.....	80
IV.1.4. Les pertes mécaniques	81
IV.1.5. Les pertes supplémentaires	82
IV.1.6. Les pertes totales.....	82
IV.1.7. Le rendement de la machine.....	82
IV.1.8. Calcul de la résistance de magnétisation.....	82
IV.2. Calcul des performances du moteur.....	83
IV.2.1. Schéma équivalent en L du moteur.....	84
IV.2.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur.....	85
IV.2.3. Caractéristique mécanique	91
IV.2.4. Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge	92
Chapitre V Elaboration d'un programme de calcul	
V.1. Programme	
Conclusion générale.....	98

Introduction générale

Le gaz naturel est la troisième source d'énergie la plus utilisée dans le monde, après le pétrole et le charbon. L'Algérie possède l'une des plus importantes réserves de cette dernière.

Au début de l'exploitation du gaz la pression aux gisements de Hassi R'mel était de 160 bar, ce qui a conduit à concevoir des unités de traitements fonctionnant à une pression à 100 bar. Au fil des années et avec la consommation de plus en plus excessive de la ressource la pression a connu une baisse importante pour atteindre 80 bar de nos jours, d'où s'est imposé le besoin de la comprimer pour assurer son traitement.

Le compresseur à gaz est l'un des moyens utilisés pour remplir cette tâche. Ce dernier nécessite d'être entraîné et la turbine à gaz répond parfaitement à ce besoin, mais d'un autre côté elle induit un coût de fabrication et de maintenance très excessif.

Le dilemme est alors de trouver un autre moyen d'entraînement pour remplacer la turbine à gaz.

Les moteurs asynchrones s'imposent en effet dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'ils présentent : ils sont robustes, simples d'entretien, faciles à mettre en œuvre et de faibles coûts. C'est dans cette optique que nous nous sommes intéressés au dimensionnement du moteur asynchrone dans ce présent travail.

Dans le premier chapitre nous allons faire une présentation géographique et historique du champ d'exploitation de HASSI R'MEL ainsi que des différentes unités de traitement le constituant.

Dans le second nous allons donner un aperçu théorique sur le moteur asynchrone et sur la turbine à gaz, leur constitution, leur principe de fonctionnement et leur maintenance.

Le troisième chapitre sera consacré au calcul des dimensions du moteur, des forces magnétomotrices et des paramètres du schéma électrique équivalent,

Le quatrième chapitre fera l'objet du calcul des pertes de puissances, du rendement et des performances du moteur asynchrone.

Le cinquième chapitre est réservé à l'élaboration d'un programme informatique sous MATLAB pour la vérification du calcul et l'optimisation des paramètres du moteur calculés dans les chapitres précédents.

I-1.Situation géographique

Hassi R'mel porte du désert se situe à 525km au sud de la capitale ALGER à une altitude de 760m. Le paysage est une vaste plaine rocailleuse et parsemée de «dais ». Le climat est caractérisé par une pluviométrie de 115mm de moyenne annuelle, une humidité de 19% en été et 34% en hiver, la température varie entre -5°C en hiver et 45°C en été, les vents dominants sont de direction nord-ouest et les tempêtes de sables ont un pouvoir d'infiltration et d'érosion important.

Les conditions climatiques influencent énormément le mode de fonctionnement des unités de traitement du gaz.

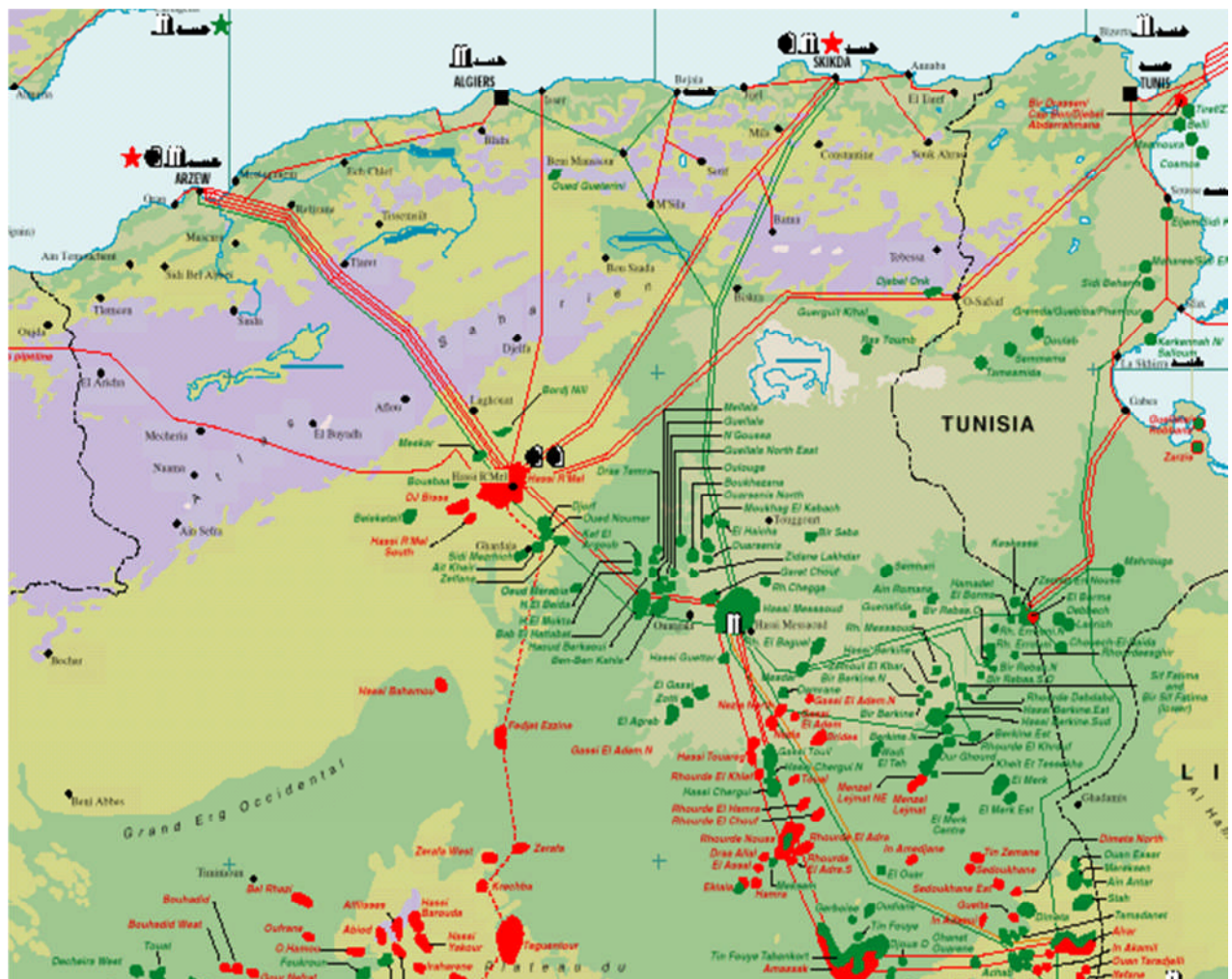


Figure 1 : Représentation géographique de Hassi-R'mel

I-2.Historique du champ de Hassi R'mel

Le gisement de Hassi R'mel a été découvert en 1951. Le forage du premier puit d'exploitation Hassi R'mel 1(HR1) a eu lieu en 1952 à quelques kilomètres de Berriène, ce premier puit a mis en évidence la présence du gaz riche en condensât dans le trias gerseaux à une pression de 310 ATM et une température de 90°C, la profondeur atteinte était de 2332 m où se trouve un important réservoir de gaz humide évalué à plus de 2800 milliards de m^3 .

Entre 1957 et 1960, sept autres puits ont été forés (HR2, HR3, HR4, HR5, HR6, HR7, HR8), exploitant ainsi un gisement qui s'étend sur une superficie de 3500 Km^2 étendue sur 70km du nord au sud et sur 50km de l'est vers l'ouest, avec une énorme réserve de gaz estimée à 2415 milliards de m^3 . Ce gaz se trouve entre 2110 et 2280m de profondeur. Les réserves trouvées en place sont évaluées à plus de $2800.10^9 m^3$.

I-3.Les activités du champ de HASSI R'MEL

La région de HASSI R'MEL possède 10% des ressources mondiales en gaz naturel. L'Algérie se place en cinquième place des pays producteurs de gaz, elle satisfait son besoin et exporte vers l'Europe. Pour une bonne exploitation du gaz la région dispose des structures suivantes :

a-Module : MPP

C'est le diminutif de [Module Processing Plant] qui désigne une unité de traitement de gaz. Il est constitué d'un ensemble d'équipements et d'installations conçues pour le traitement spécifique du gaz, afin d'extraire le condensât, le GPL et le gaz de vente, conformément à un procédé approprié et répondant aux spécifications commerciales. Cinq modules sont implantés à HASSI R'MEL. MPP0, MPP1, MPP2, MPP3 et MPP4. Les quatre derniers ont une capacité unitaire de 60 millions de $m^3/jour$, et le premier MPP0 qui est le plus ancien a une capacité de 30 millions de $m^3/jour$, deux autres modules desservent le petit gisement de Djebel Bissa avec une capacité de 6 millions de $m^3/jour$, et HRSUD (Hassi R'mel sud) avec une capacité de 9 millions de $m^3/jour$.

b-Centre de Stockage et Transfert des hydrocarbures

Tout le condensât et le GPL produit par les différents modules et centres de traitements de gaz sont acheminés vers le CSTF «central Storage and facilities» situé dans la zone centrale de Hassi R'mel qui est un centre de stockage et de transfert des hydrocarbures liquides, là où ils sont soumis à une dernière décantation pour être débarrassés des éventuelles quantités d'eau résiduelles avant de les expédier à travers des systèmes de comptage vers ARZEW au moyen d'un oléoduc de 28 pouces pour le condensât et 24 pouces pour le GPL.

C-LE CNDG (centre de dispatching du gaz)

Il est constitué d'un ensemble d'installations (pipe ligne, vannes automatiques, équipements de régulation, équipement de comptage commandé à partir d'une salle de contrôle ...) permettant la collecte du tout le gaz produit dans le sud algérien et son expédition vers les différents destinataires :

- Les usines de production du gaz naturel à ARZEW et SKIKDA.
- Les centrales de production d'électricité.
- Les gazoducs qui alimentent l'Italie via la Tunisie.
- Les gazoducs qui alimentent l'Espagne via le Maroc.
- Les stations de compression et de réinjection de gaz dans les gisements de Hassi R'mel.
- La consommation domestique et industrielle du pays.

D-Les stations boosting

L'historique de production montre une baisse de pression du gisement conformément au programme de soutirage. Les unités de traitement du gaz sont conçues pour fonctionner à une pression de 100 bars à l'entrée alors que la pression des gaz à la sortie du gisement avoisine les 80 bars, d'où une nécessité incontournable des stations de boosting (stations de compression) pour ramener la pression à celle du fonctionnement des unités de traitement.

E-Stations de compression

Leurs fonction est de comprimer le gaz provenant des unités de traitement pour être réinjecter dans les puits afin de maintenir la pression dans la nappe et de récupérer le maximum de GPL et de condensât la capacité de réinjection de chacune des deux stations de compression nord et sud est de 90 millions $m^3/jour$.

I-4.Présentation du centre de traitement de gaz de Hassi R'mel sud

Le centre de traitement de gaz de Hassi R'mel Sud (CTG HR-SUD) est une usine qui traite le gaz brut provenant des puits de la région sud de Hassi R'mel. Le gaz traité par les installations du centre passe par des stades de traitement et de mise en œuvre pour en extraire les trois produits finis suivants :

- Gaz de vente.

- Gaz associés. L'usine récupère également les gaz associés provenant du centre du traitement des huiles avoisinant et les conditionnent pour leurs transport vers le module 2(MPP2).
- condensât instables.

Pour assurer ces tâches l'usine dispose des installations qui peuvent être classées suivant leurs fonctions dans le process, en quatre sections :

I-4-1.trains de traitement de gaz

Les trois trains procèdent à la séparation et la dissociation du gaz brut permettant de récolter du gaz de vente, gaz associés et condensât instable, les deux derniers produits sont conduits vers leurs sections appropriées. Le gaz de vente est transporté vers la ligne du gaz de vente du module 2(MPP2).

I-4-2.section de compression des gaz associés

Cette section vise à comprimer les gaz associés leur offrant ainsi une pression suffisante pour alimenter le collecteur situé au niveau du module 2. Cette section comporte deux étages de compression dont le premier reçoit le gaz associé du centre de traitement des huiles avoisinant (CTH sud). Elle possède une capacité totale d'un million de mètres cubes par jour.

I-4-3.Section de condensât instabilisé

Le rôle de cette unité est la récupération du condensât en provenance des trains de traitement des gaz sans installation de stabilisation. Le condensât récupéré est pompé vers le module 2 à travers le pipe-line de condensât instabilisé.

I-4-4.Utilités

Cette section regroupe toutes les autres installations ne faisant pas partie des trois sections précédentes. On y trouve les systèmes suivants :

a)Le système de glycol

Un système de glycol en circuit fermé est installé pour éviter la formation des hydrates dans les trains de traitement de gaz. La solution de mono éthylène glycol (MEG) à 80 % en poids est choisie comme agent déshydratant, le glycol est régénéré par simple redistillation.

b) Le système de gaz combustible

Le système de gaz combustible est destiné à alimenter en gaz le four ou le glycol est régénéré, le brûleur pilote de torche et le brûleur pilote de fosse de brûlage. Le gaz combustible est obtenu à l'entrée du pipe-line du gaz de vente. Par mesure de sécurité l'alimentation en gaz

combustible est conçue de telle sorte que toutes les torches soient toujours en service même en cas d'arrêt de toute l'usine jusqu'à sa remise en service.

C) Le système de torche

Ce système sert à la dépressurisation, il comprend deux systèmes de torches haute pression (HP) et basse pression (BP). Le système haute pression couvre les trains B et C et la section du condensât instabilisé, le système basse pression couvre la section du gaz combustible et celle du glycol et sert également à la dépressurisation des compresseurs de gaz associé. Une tuyauterie d'interconnexion des deux systèmes HP et BP est disponible pour permettre d'effectuer la maintenance d'un d'entre eux sans l'arrêt de l'usine.

d) Le système d'air instrument

Ce système est destiné à comprimer l'air nécessaire aux instruments répartis dans toutes les installations de l'usine, de le sécher et de le stocker dans les trois réservoirs d'air instrument .Il comporte deux compresseurs dans l'un est en service et l'autre en attente qui se met en fonctionnement automatiquement en cas de panne du compresseur en service. Le système sert également à fournir de l'air service à toute l'usine.

I-5.Le système de distribution électrique du CTG HR-SUD

Le CTG HR-SUD est alimenté en énergie électrique par une ligne triphasée de 60 KV provenant de la station électrique de HASSI R'MEL centre. La connexion de cette ligne à la sous-station existante à l'intérieur du centre est effectuée par câblage souterrain à partir du pylône adjacent à l'usine. La distribution se fait ensuite selon les schémas unifilaires des figures 2-1 et 2-2.

On y distingue les éléments suivants :

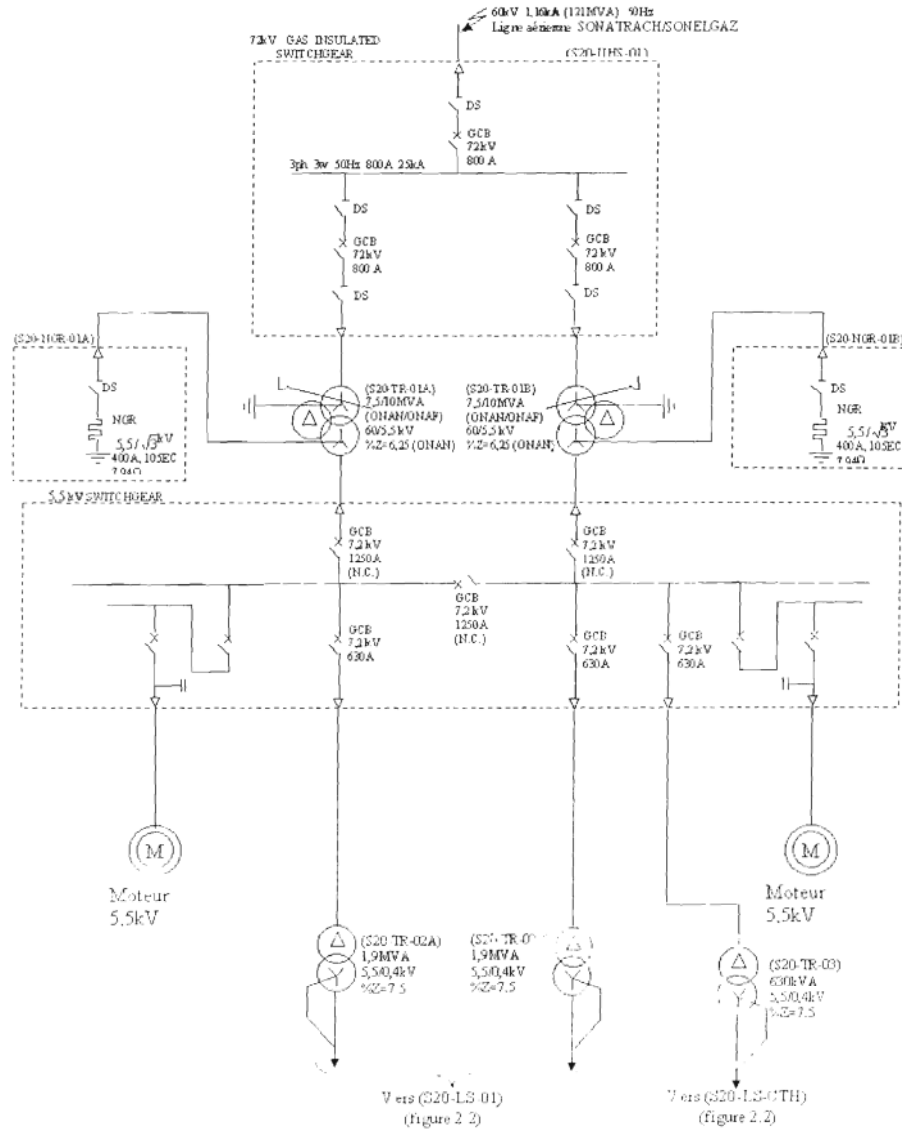
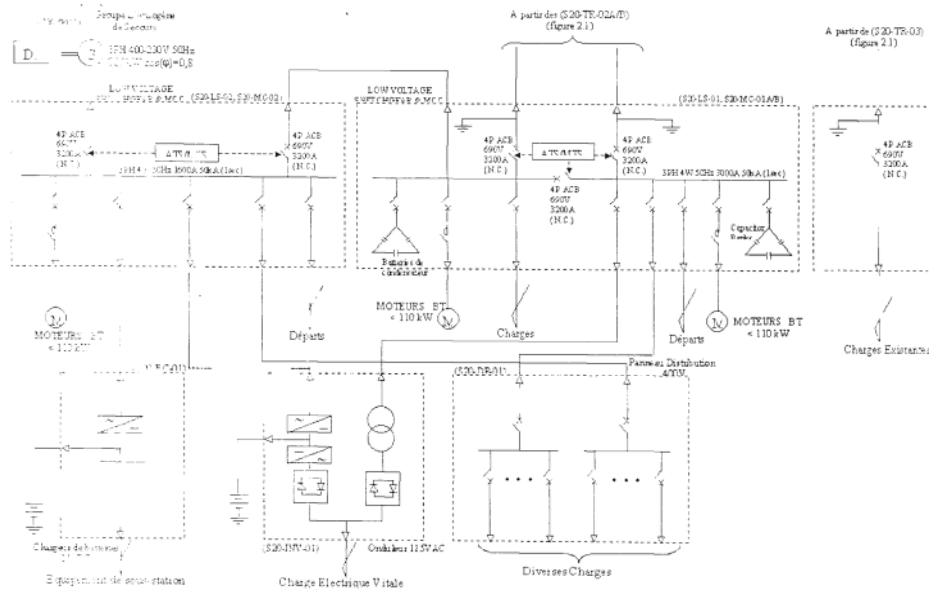


Figure 2.1. Schéma unifilaire de la distribution électrique 60kV et 5,5kV du CTG HR-SUD.

Figure 2.2. Schéma unifilaire de la distribution électrique basse tension (400 V) CTG-HR-SUD.



Appareillage de commutation 60 kV

19

I-5-1) Appareillage de commutation 60kV (GIS: Gas Insulated Switchgear) (S60-USH-01)

I-5-1-1) Caractéristiques générales

Installés à l'intérieur de la sous-station l'appareillage de commutation 60 KV est totalement isolé au gaz d'hexafluorure de soufre (SF_6) dans un blindage métallique. Il comporte l'arrivée de l'énergie électrique et deux départs vers les transformateurs 60/5.5KV (Figure2.3). Les GIS possèdent les caractéristiques de service suivantes :

- Tension nominale : 72KV.
- Nombre de phases : 3.
- Fréquence nominales : 50 Hz.
- Courant nominal : 800A.

- Pression nominale de gaz SF_6 pour isolement à 20°C : 6.2 bar.

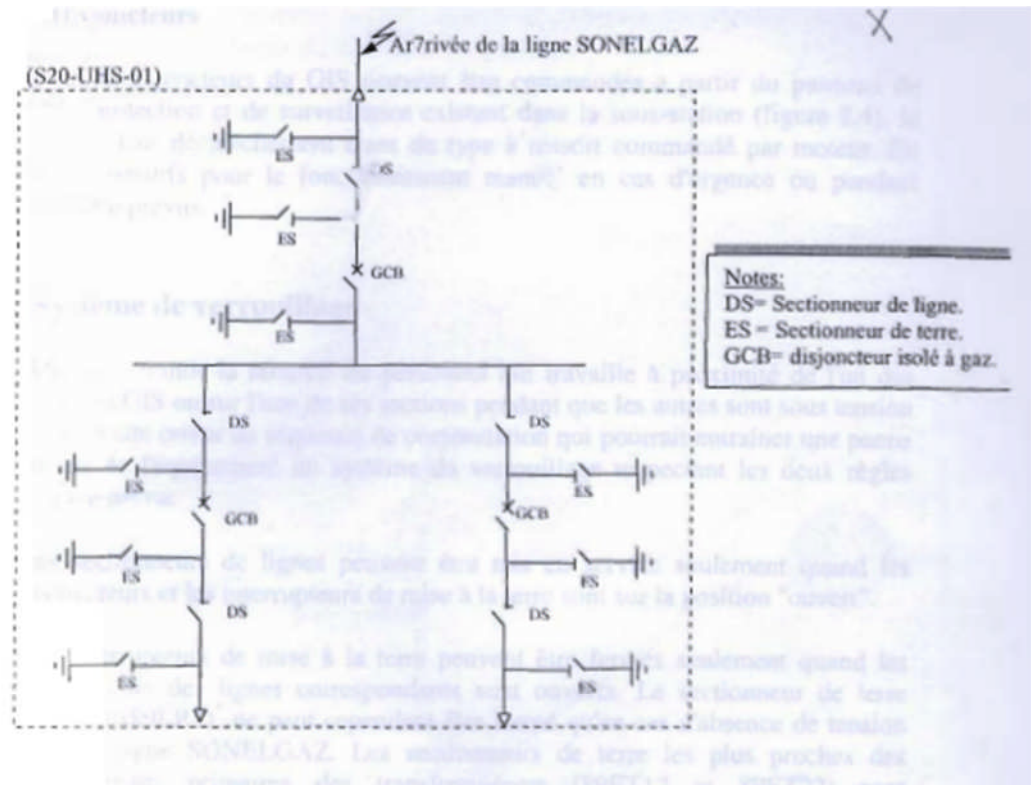


Figure 2.3 : Equipements du GIS.

I-5-2) Transformateurs de puissance à variateur de prise en charge 60/5.5 KV (S20-TR-01A/B) et leurs résistances de terre.

I-5-3) Appareillages de commutation 5.5 kV (S20-HS-01)

a-caractéristiques générales

Installés à l'intérieur de la sous-station les appareillages 5.5KV comportent deux unités d'arrivée, un coupleur de barre omnibus et cinq unités d'alimentation de sortie. Ils servent à la distribution électrique primaire et à alimenter les deux moteurs qui entraînent les compresseurs à gaz du Boosting dont la puissance dépasse 110kW.

Les appareillages 5.5 kV possèdent les caractéristiques de service suivantes :

- Tension nominal : 72 kV.
- Nombre de phases : 3.
- Fréquence nominale : 50 Hz.

- Courant nominal : 1250 A.

L'appareillage de commutation 5.5 kV comportent deux barres omnibus, chacune reliée à un disjoncteur de ligne d'arrivée normalement fermé et connectées ensemble par un disjoncteur de raccordement (ou de couplage) normalement fermé (figure2.4).

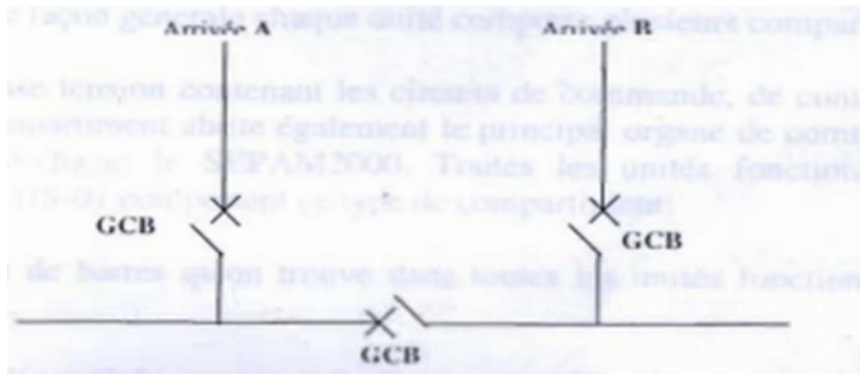


Figure 2.4 : En marche normale les trois disjoncteurs sont fermés.

I-5.3) Transformateur de puissance 5.5/0.4 KV (S20-TR-02A/B).

I-5.4) Premier appareillage de commutation basse tension 400V (S20-LS-01) et les centres de commande des moteurs qui lui sont associés (S20-MC-01A/B)

a-Caractéristiques générales

Installé à l'intérieur de la sous-station, le premier appareillage de commutation basse tension sert à la distribution de l'énergie électrique à la charge basse tension et assure sa protection, son contrôle et sa commande. Il est constitué de deux jeux de barres horizontaux (MC-01A et MC-01B) à neutre mis à la terre (figure2.5). Chaque jeu de barre est alimenté par une arrivée (arrivées A et B) à travers un disjoncteur fermé en marche normale (52 RA et 52RB respectivement). Ils sont interconnectés à travers un disjoncteur de couplage ouvert en marche normale (52AB).

L'appareillage de commutation est pourvu d'un système automatique permettant le transfert de l'énergie d'une des deux arrivées, à travers le disjoncteur de couplage, vers l'autre jeu de barre lorsque l'alimentation de celui-ci devient défectueuse.

L'appareillage de commutation S20-LS-01 et les centres de commande des moteurs S-20-MC02A/B possèdent les caractéristiques de service suivantes :

- Tension nominale : 400-230 V.

- Nombre de phases : 3.
- Fréquence nominale : 50 Hz.
- courant nominal : 3000 A.
- Pouvoir de court-circuit triphasé : 50KA.
- Neutre relié directement à la terre.
- Source de puissance de contrôle fournie du S20-BC-01 :110 V DC.

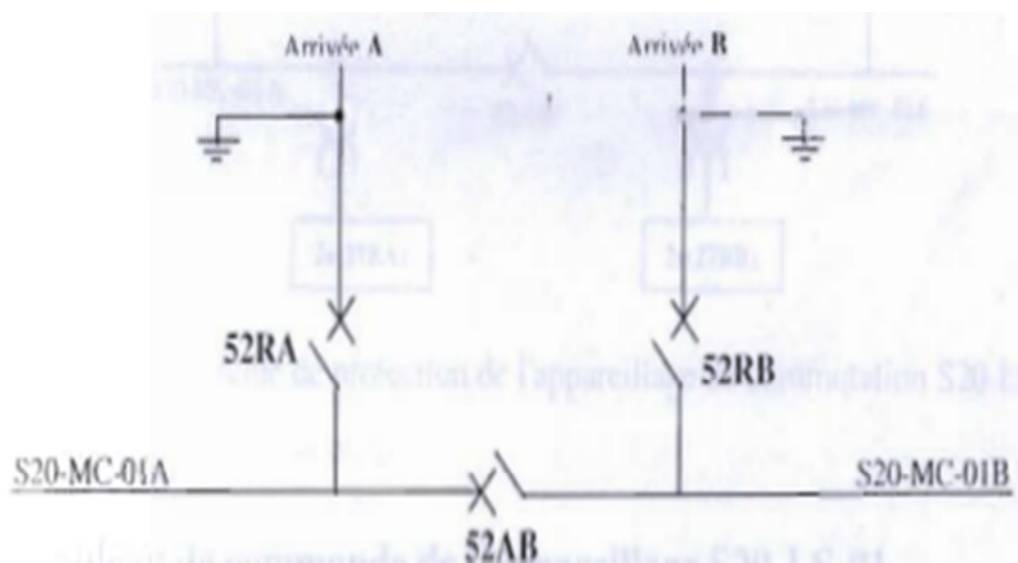


Figure 2.5 : L'appareillage de commutation basse tension S20-LS-01.

I-5.4)Deuxième appareillage de commutation basse tension de secours 400V (S20-MC-02) et les centres de commande des moteurs qui lui sont associé (S20-MC-02)

a-Caractéristiques générales

L'appareillage de commutation basse tension S20-LS-02 est installé afin d'assurer la continuité d'alimentation de certains récepteurs prioritaires. L'appareillage est constitué d'une alimentation normale (à partir du secteur), d'une alimentation de remplacement ou de sécurité (groupe diesel de secours S20-G001) et d'un jeu de barre (point commun aux deux alimentations à partir duquel les récepteurs sont alimentés). L'appareillage de commutation S20-LS-02 et le centre de commande des moteurs S20-MC-20 possèdent les caractéristiques de service suivantes :

- Tension d'alimentation : 400-230 V.
- Nombre de phases : 3.
- Fréquence nominale : 50 Hz.
- Courant nominal : 1600 A.
- Pouvoir de court-circuit triphasé : 50 kA (sym.Cms) à 415 V.
- Neutre directement à la terre.

I-5.5) Groupe électrogène de secours (S20-G001) :

Le groupe diesel de secours possède les caractéristiques suivantes :

- Tension nominale : 400/230 V
- Nombre de phases : 3.
- Fréquence nominale : 50Hz.
- Facteur de puissance : 0.8.
- Puissance nominale : 700 kVA.

I-5.6) Chargeur de batterie (S20-BC-01)

Le chargeur de batterie S20-BC-1 est conçu pour alimenter en tension continue 110 V les circuits de contrôle des disjoncteurs GCB et ACB. Il est composé (figure 2.12) :

- D'un redresseur dont le rôle est de charger les batteries et de réguler la tension de sortie.
- D'un ensemble de batteries.
- D'un circuit de distribution.

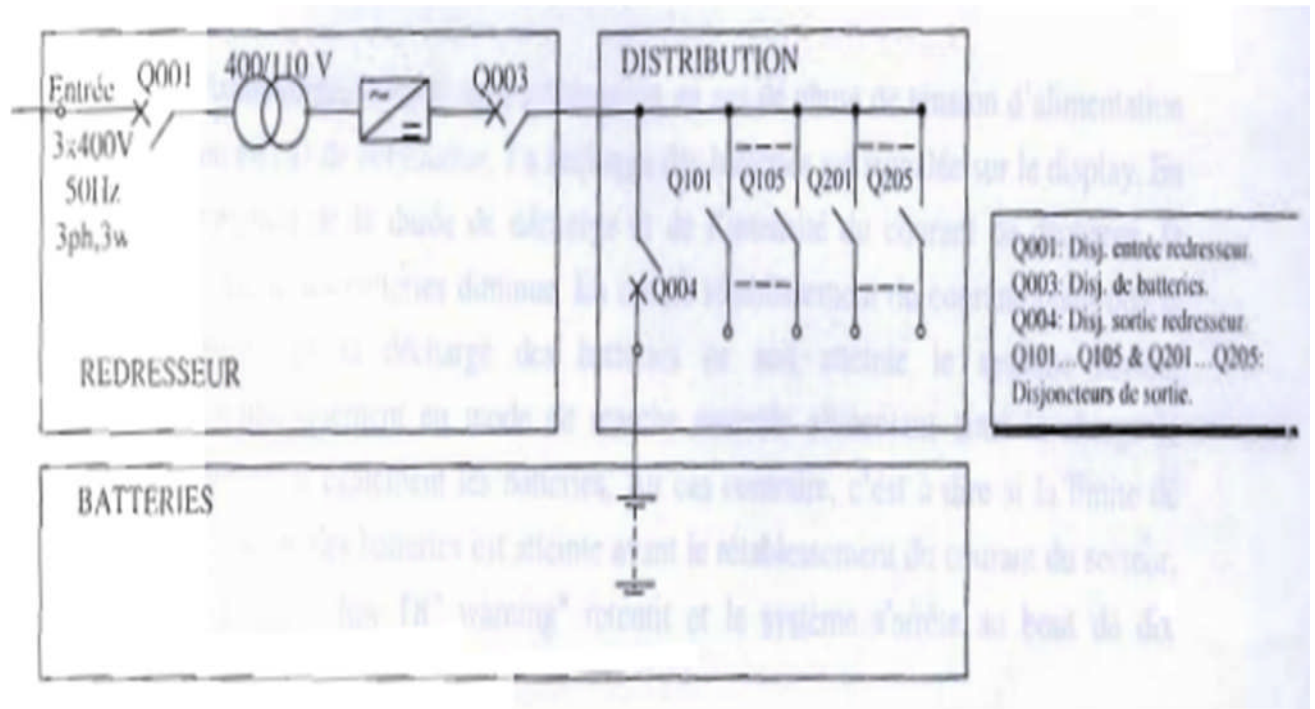


Figure2.12 : Eléments principaux du chargeur de batteries.

I-5.7) Alimentation sans interruption (Uninterruptible Power Supply), (S20-INV-01)

Alimentant la charge vitale de l'installation (système de contrôle distribué D.C.S, Paging system, fire system), le système d'alimentation sans coupure assure la continuité de service et sa qualité en compensant les fluctuations de tension du secteur ainsi que les charges et maintient la tension de sortie stable. La charge est alimentée à travers un système redresseur-onduleur en mode de marche normale alimenté à partir du centre de commande des moteurs S20-MC-02.

Un deuxième système d'alimentation dit «secteur bypass »est prévu en cas de panne de l'alimentation sur le secteur redresseur. Ce deuxième secteur est alimenté à partir du centre de commande des moteurs S20-MC-01B.

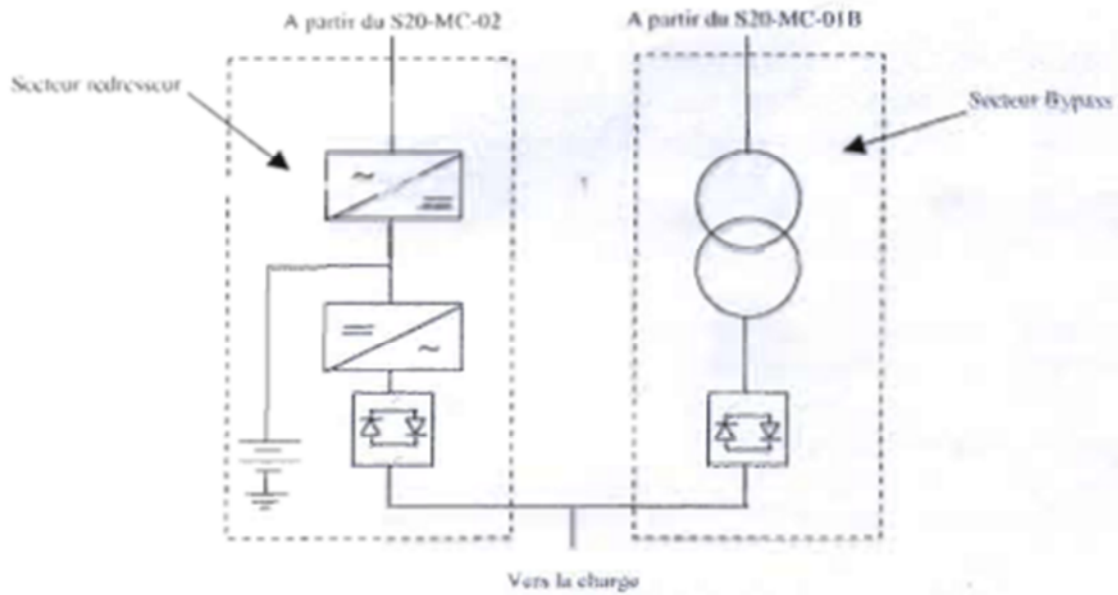


Figure 2.12 : Schéma général de l'alimentation sans coupure.

I-5.8) Panneau de distribution 400V (S20-DP-01)

Il sert à l'alimentation des charges auxiliaires tels que :

- L'éclairage extérieur et intérieur.
- Alimentation des ponts roulants.
- Les prises de courant, nécessaire à l'utilisation lors des travaux de révision.

Introduction

Le moteur asynchrone connu également sous le nom anglo-saxon de induction machine est de beaucoup la machine la plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de sa robustesse, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité faisant d'elle un matériel qui demande peu d'entretien.

II-1.Constitution

Un moteur asynchrone comporte deux parties principales: un inducteur ou stator et un induit ou rotor. En plus des différents organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

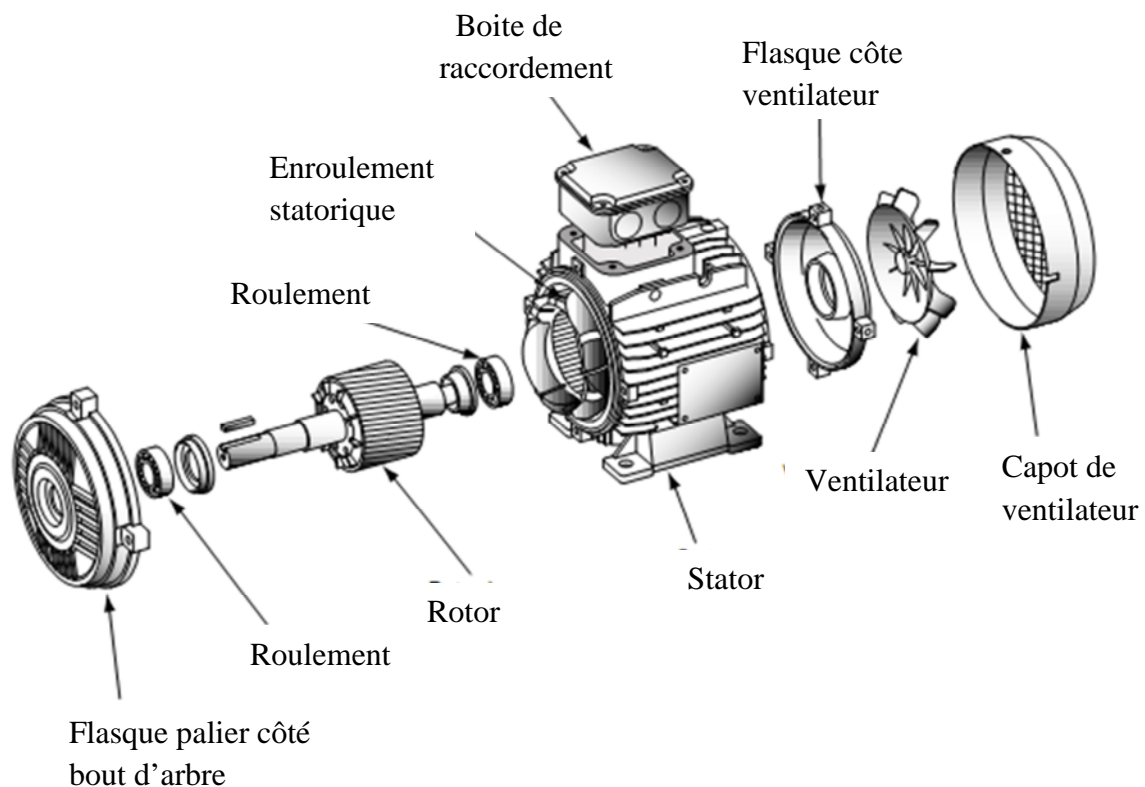


Figure II.1 : Vue éclatée d'un moteur asynchrone.

II-1-1. Le stator

C'est la partie fixe du moteur. 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 au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault.

Pour les longueurs du stator et du rotor inférieures à 200mm on ne subdivise pas le paquet de tôles.

Au-delà de 200mm on subdivise les tôles en paquets élémentaires séparés par un espace d'air dit canal de ventilation. Pour assurer une bonne résistance aux efforts électrodynamiques on les serre par des boulons ou des cordons de soudure.

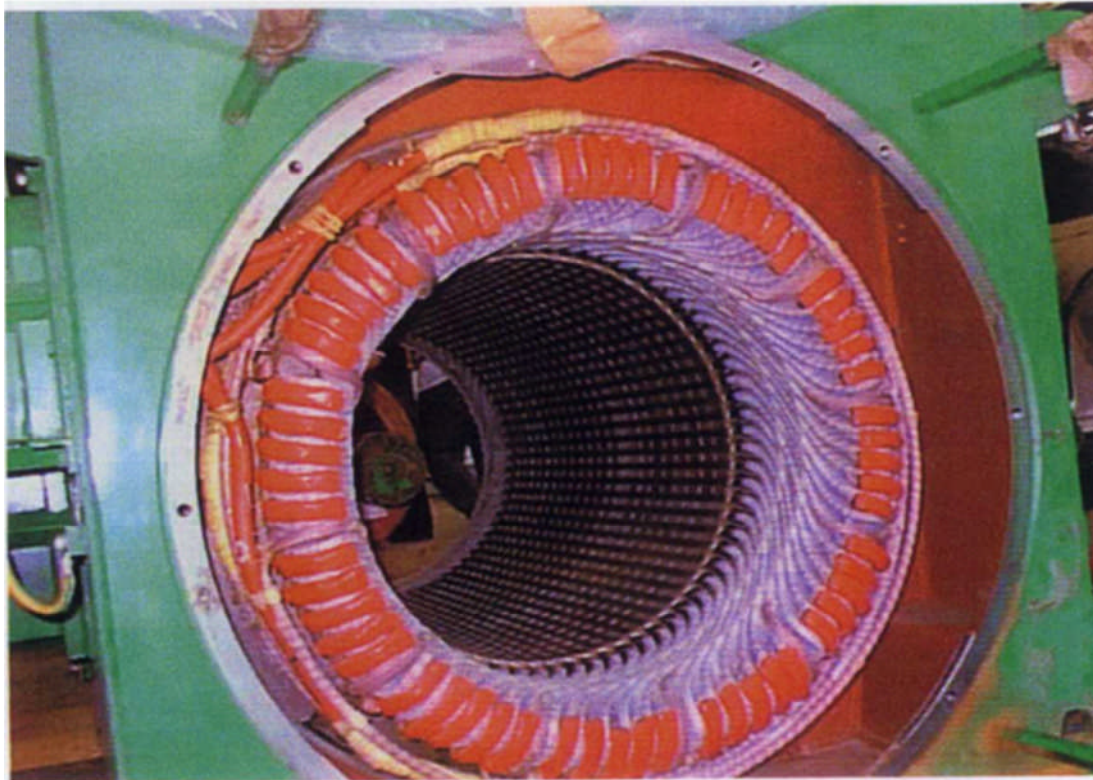


Figure II.2 : Vue d'un stator d'un moteur asynchrone de grande puissance

Les tôles sont munies d'encoches qui sont de quatre types génériques en fonction de la puissance et de la tension de la machine, les encoches sont :1) ouverte ;2) semi-ouverte ;3) semi-fermées ;4) fermées (figure II.3).

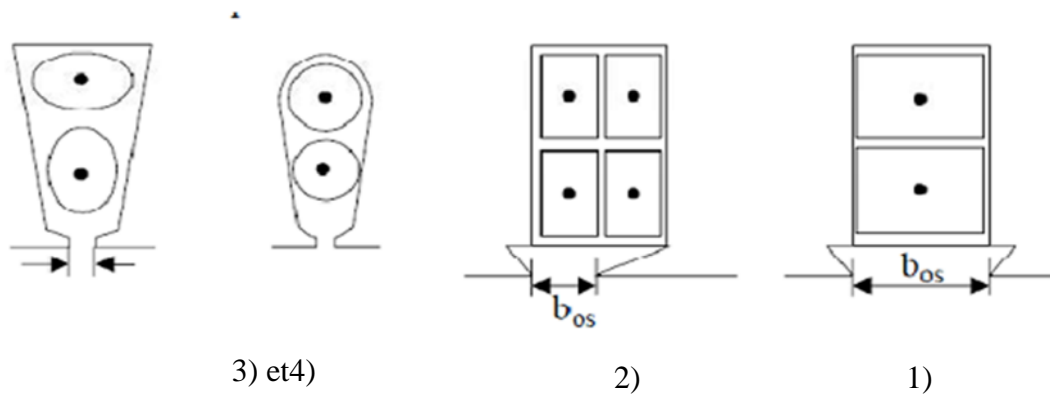


Figure II.3 : Les différents types d'encoches pratiquées dans les feuilles statorique des machines asynchrones.

Les encoches ouverte et semi-ouverte sont généralement de forme rectangulaire, tant dis que les encoches fermées et semi-fermées sont de forme rectangulaire ou trapézoïdale avec angle arrondis. Dans ces dernières prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.

II.1.2-Le 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 tôles sont rainurées à leur périphérie extérieure formant ainsi des encoches destinées à accueillir les conducteurs rotorique (figure 2.4).

Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrones : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues ».

II.1.2-a) Les moteurs asynchrones à rotor bobiné

Dans des encoches pratiquées à la périphérie du rotor sont logés des enroulements identiques à ceux du stator. 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. Généralement le rotor est 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 et solidaires du rotor. Sur ces bagues viennent frotter des balais à base de graphite raccordés au dispositif de démarrage (figure2.3).

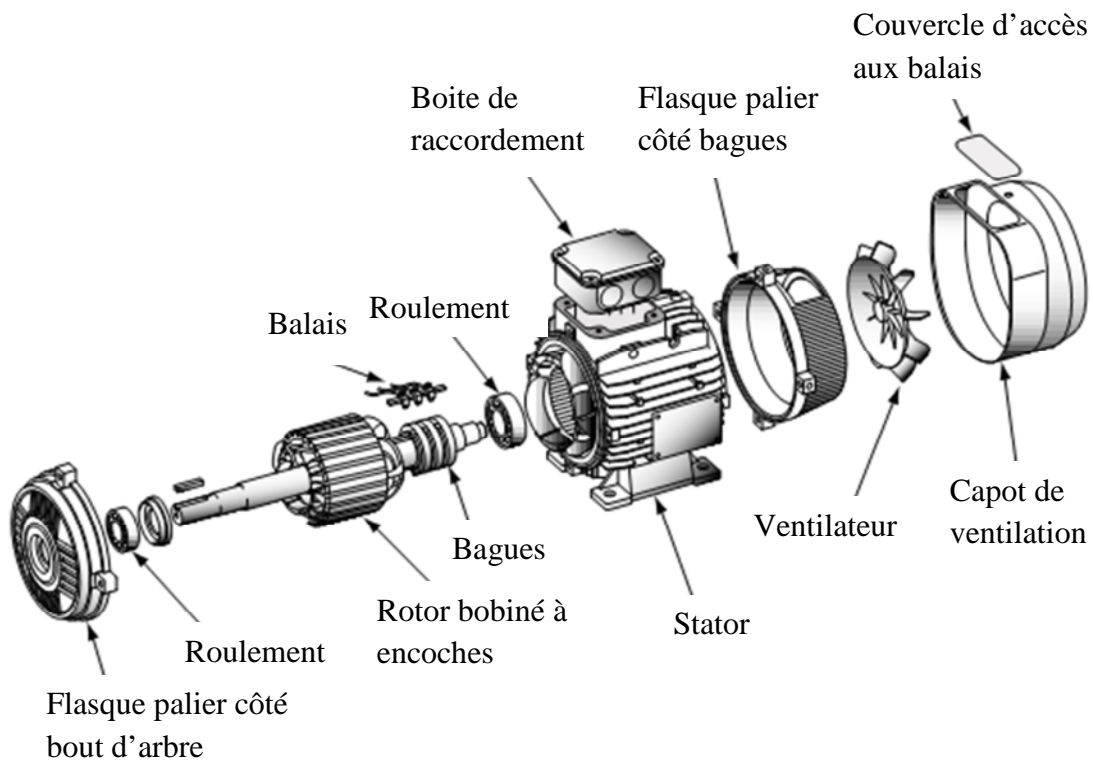


Figure 2.3: Vue éclaté d'un moteur asynchrone a rotor bobiné.

En fonction de la valeur des résistances insérées dans le circuit rotorique, ce type de moteur peut développer un couple de démarrage s'élevant jusqu'à 2,5 fois le couple nominal.

Le courant au démarrage est sensiblement proportionnel au couple développé sur l'arbre du moteur.

Cette solution est de plus en plus abandonnée au profit de solutions électroniques associées à un moteur à cage standard. En effet ces dernières permettent de résoudre des problèmes de maintenance (remplacement des balais d'alimentation du rotor usés, entretien des résistances de réglage), de réduire l'énergie dissipée dans ces résistances et aussi d'améliorer de façon importante le rendement de l'installation. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux.

II.1.2-b) Le moteur asynchrone à cage

Plusieurs types de rotor à cage existent, ils sont tous conçus selon l'exemple de la figure (2.4)

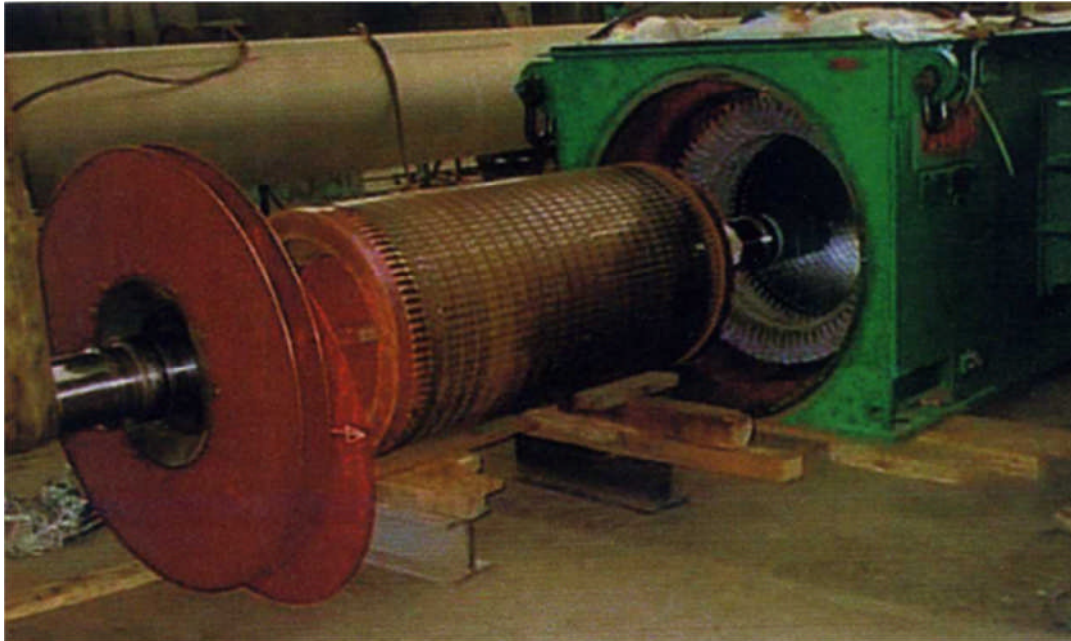


Figure 2.4 : Vue d'un rotor d'un moteur asynchrone à cage (Moteur de grande puissance)

En citant ces moteurs dans l'ordre du moins répandu au plus courant :

➤ Rotor à cage résistante

Le rotor résistant existe surtout en simple cage (voir plus loin la définition du moteur simple cage). La cage est fermée par deux anneaux résistants (alliage particulier, section réduite, anneaux d'inox ...).

Ces moteurs présentent un fort glissement au couple nominal.

Leur couple de démarrage est élevé et le courant de démarrage faible (Figure 2.5). En raison des pertes dans le rotor, leur rendement est faible.

Ces moteurs sont en principe utilisés dans les applications pour lesquelles il est intéressant d'avoir du glissement afin d'adapter la vitesse en fonction du couple, par exemple :

-cas de plusieurs moteurs liés mécaniquement sur lesquels doit être répartie la charge, tels que : train à rouleaux d'un laminoir, entraînement d'un portique de levage.

➤ Rotor à simple cage

Les encoches rotoriques ont le plus souvent une forme ovale avec un rapport plus au moins grand entre la hauteur de l'encoche et sa largeur. Les encoches recouvertes par un pont de 0.4 à 0.5mm d'épaisseur disposées sur le pourtour du rotor (à l'extérieur du cylindre constitué par l'empilage de tôles) logent des conducteurs reliés à chaque extrémité par une couronne métallique et sur lesquels vient s'exercer le couple moteur généré par le champ tournant. Pour que le couple soit régulier, les conducteurs sont légèrement inclinés par rapport à l'axe du moteur. L'ensemble a l'aspect d'une cage d'écureuil, d'où le nom de ce type de rotor.

Les barres conductrices sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium. (Seuls les très gros moteurs sont réalisés à l'aide de conducteurs insérés dans des encoches). L'aluminium est injecté sous pression et les ailettes de refroidissement, coulées lors de la même opération, assurent la mise en court-circuit des conducteurs du rotor.

Ces moteurs ont un couple de démarrage relativement faible et le courant absorbé lors de la mise sous tension est très supérieur au Courant nominal (figure 2.5). En contrepartie ils ont un faible glissement au couple nominal.

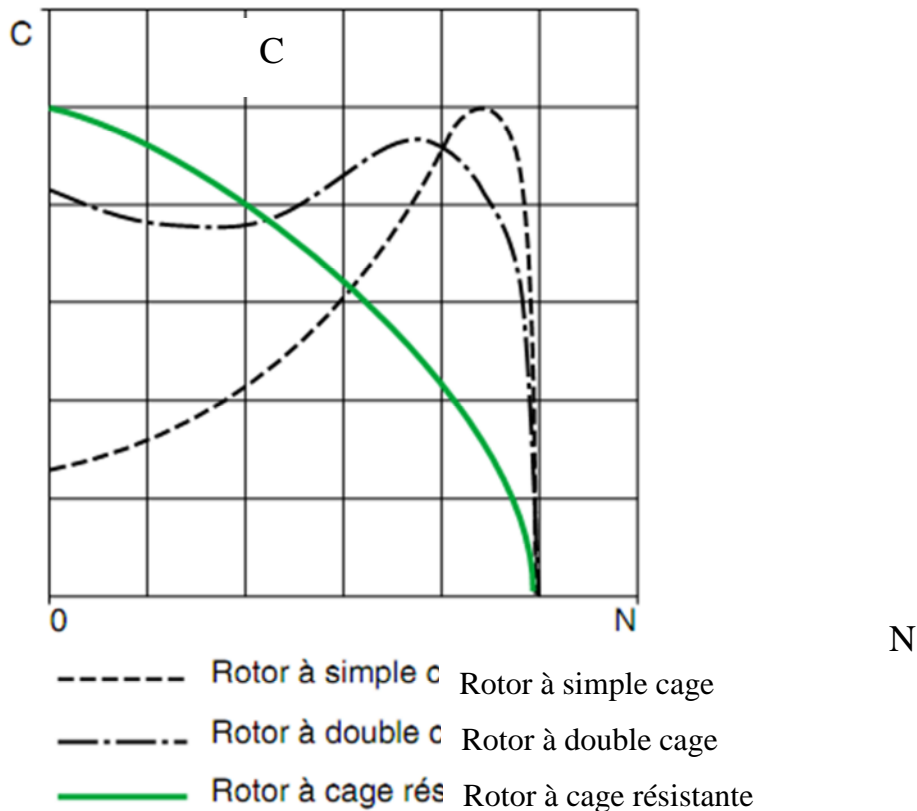


Figure 2.5 : Courbes couple/vitesse suivant les types des rotors à cage (à la tension nominale)

Ces moteurs sont utilisés principalement en forte puissance pour améliorer le rendement des installations sur des pompes et ventilateurs. Ils sont également associés à des convertisseurs de fréquence en vitesse variable, les problèmes de couple et de courant de démarrage sont alors parfaitement résolus.

➤ Rotor à double cage

Il comporte deux cages concentriques, l'une extérieure en bronze ou en laiton, de faible section, de résistance relativement grande et d'inductance relativement faible, l'autre intérieure en cuivre, de forte section et de résistance plus faible. Les cages supérieure et inférieure peuvent avoir des encoches rondes ou la cage supérieure peut avoir des encoches rondes et la cage inférieure des encoches rectangulaires ou ovales. Les anneaux de court-circuitage sont en cuivre dans lesquelles des échancrures ont été fraisées conformément aux dimensions des barres des deux cages supérieure et inférieure et sont soudés aux barres conductrices des cages par une soudure forte.

Au début du démarrage, les courants rotoriques étant à fréquence élevée (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 et donc dans une section réduite des conducteurs, le courant ne circule que dans la cage extérieure. Le couple produit par la cage extérieure résistante est important (deux à trois fois supérieurs à ceux du rotor à simple cage) et l'appel de courant réduit (figure 2.5).

En fin de démarrage, la fréquence diminue dans le rotor, le passage du flux à travers la cage intérieure est plus facile. Le moteur se comporte alors sensiblement comme s'il était construit avec une seule cage peu résistante. En régime établi, la vitesse n'est que très légèrement inférieure à celle du moteur à simple cage.

➤ Rotor à encoches profondes

C'est la réalisation standard. Les conducteurs rotoriques en cuivre sont moulés dans les encoches du rotor qui sont de forme carré. Les anneaux de court-circuitage sont le plus souvent en lames de cuivre dans lesquelles des échancrures ont été fraisées conformément aux dimensions des barres, les barres de la cage et les anneaux sont soudés par une soudure forte.

Le fonctionnement est analogue au moteur à double cage : l'intensité du courant rotorique varie en fonction inverse de sa fréquence.

Ainsi :

Au début du démarrage, le couple est élevé et l'appel de courant réduit : les lignes de courant se concentrent près de la périphérie et tendent ainsi à assigner une section de conducteur apparente réduite et par conséquent une résistance rotorique importante.

En régime établi, la vitesse est sensiblement celle du moteur à simple cage : en marche normale les lignes de courant occupent la pleine section de la barre, retrouvant un circuit de faible résistance. Ce type de moteurs, est très utilisé, notamment dans le cas des moteurs à haute tension à fort couple de démarrage. Il présente cependant l'inconvénient d'entraîner une augmentation du coefficient de dispersion des enroulements, donc une diminution du facteur de puissance du moteur, et bien sûr, d'exiger un diamètre de rotor plus important. Pour remédier à ce dernier inconvénient, on a parfois fait appel à des conducteurs ayant des formes plus compliquées, en trapèze, voire en L (la base du L étant en fond d'encoche).

II.1.3-Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. Le stator autoporteur reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui

sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc....), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime transitoire et permanent). Il est supporté par deux paliers qui soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Une isolation électrique de l'un d'eux assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Les paliers sont généralement à roulement à billes ou à rouleaux suivant le type de charge (axiale ou radiale) pour les moteurs de petite et moyenne puissance (moteurs de petit gabarit), et lisse lubrifié à l'huile pour les moteur de grande puissance(moteurs de grand gabarit) (figure 2.6).

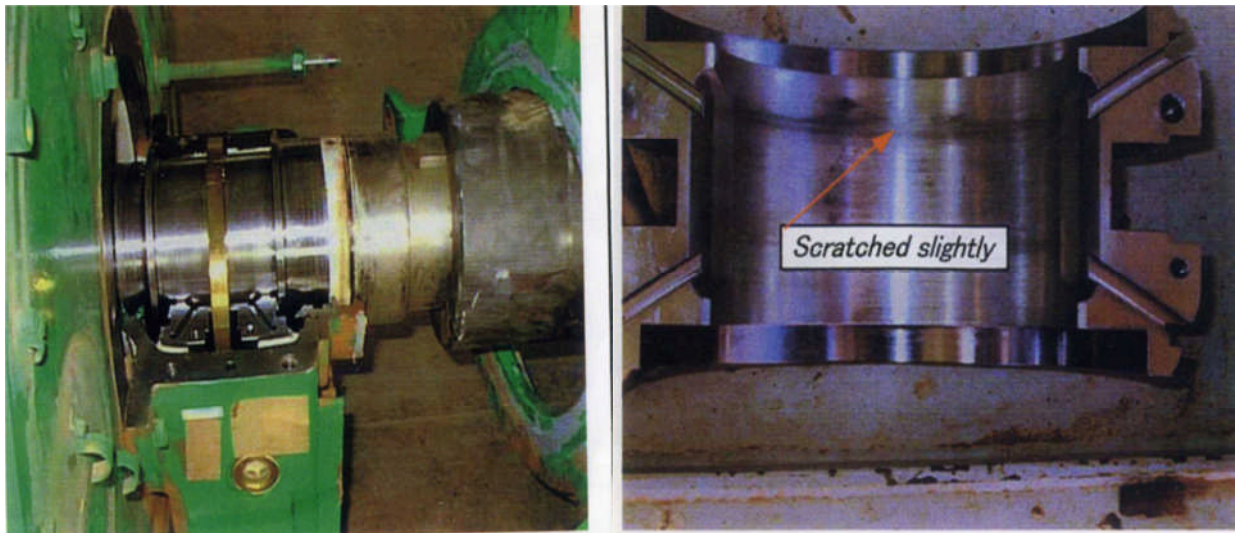


Figure 2.6 : Vue d'un palier lisse.

Un ventilateur est placé en bout d'arbre sur le rotor pour le refroidissement de la machine. Il peut être remplacé par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes.

II.1.4- Les conducteurs

Le bobinage des machines électriques repose classiquement sur l'utilisation des propriétés conductrices du cuivre, allié ou non, à l'exception de quelques cas particuliers utilisant l'aluminium (rotors à cage coulée en aluminium pour petites machines à induction, etc.). Le matériau peut être exploité soit sous forme de conducteurs filaires « émaillés » en vue de

l'isolement électrique, soit sous forme de barres de section généralement rectangulaire éventuellement constituées de plusieurs méplats connectés en parallèle.

La technologie des barres est classiquement réservée au domaine des machines de moyenne et grande puissance (>100 kW).

Cette solution est notamment préférée en raison d'une tenue mécanique plus facile à assurer (résistance aux forces centrifuges, facilité de calage...). En outre, le système de refroidissement de la structure peut s'accommoder plus directement à cette technologie, lorsque l'on envisage en particulier une circulation de fluides caloporteurs (circulation de gaz ou de liquide sous pression au sein même du bobinage).

Si les conducteurs filaires concernent plutôt le bobinage des machines de petites puissances, ils sont néanmoins de plus en plus utilisés en grande puissance (jusqu'à 750 kW et plus). Cette évolution est liée à l'amélioration de l'isolation des fils émaillés ou enrubannés.

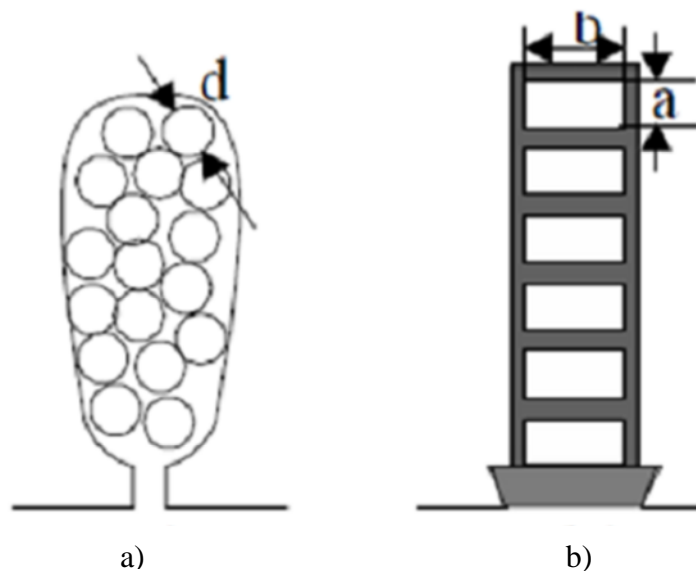


Figure 2.7 :a)Encoche statorique avec des conducteurs filaires.

b) Encoche statorique avec des conducteurs rectangulaires

II.1.5-Bobinages

Le bobinage d'une machine tournante peut être réalisé de plusieurs façons. Chaque mode de bobinage présente des avantages dans certaines applications. Cependant on utilise habituellement trois types d'enroulement :

➤ Enroulement imbriqué

L'enroulement imbriqué est le type de bobinage le plus employé dans les stators des moteurs triphasés de moyenne et grande puissance. On utilise le plus souvent l'enroulement à deux couches. Chaque bobine est formée de la moitié des conducteurs contenus dans une encoche et disposés de façon que l'un des côtés de la bobine soit dans le haut d'une encoche et l'autre dans le fond (figure : 2.8). Puisque les bobines n'occupent que la moitié d'une encoche, on peut en modifier la largeur et les placer dans une paire d'encoches qui ne correspond plus au pas d'encoche normal. Les bobines sont habituellement de largeur réduite et donnent un pas dit raccourci. Cette configuration complique le bobinage, mais présente l'avantage d'atténuer les harmoniques de l'onde de flux et d'améliorer le comportement du moteur.

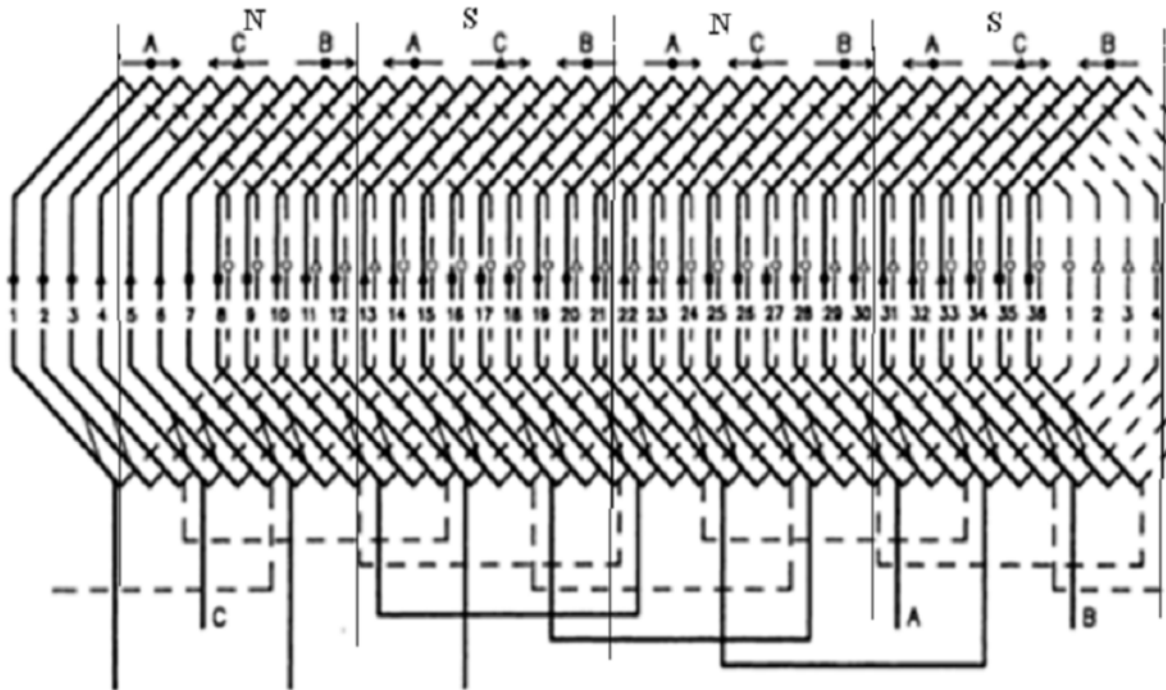


Figure 2.8 : Enroulement imbriqué à deux couches d'un moteur à 2 pôles et 36 encoches.

➤ Enroulement concentrique

L'enroulement concentrique est l'enroulement le plus utilisé dans la fabrication de bobinage à une seule couche, il est utilisé dans les machines de faible puissance. Chaque bobine occupe et remplit deux encoches (figure : 2.9). La différence entre l'enroulement imbriqué à une seule couche et l'enroulement concentrique réside dans le fait que les bobines au lieu d'être toutes identiques et décalées d'une encoche les unes par rapport aux autres, sont à l'intérieur d'une

phase de dimensions différentes et placées les unes autour des autres.

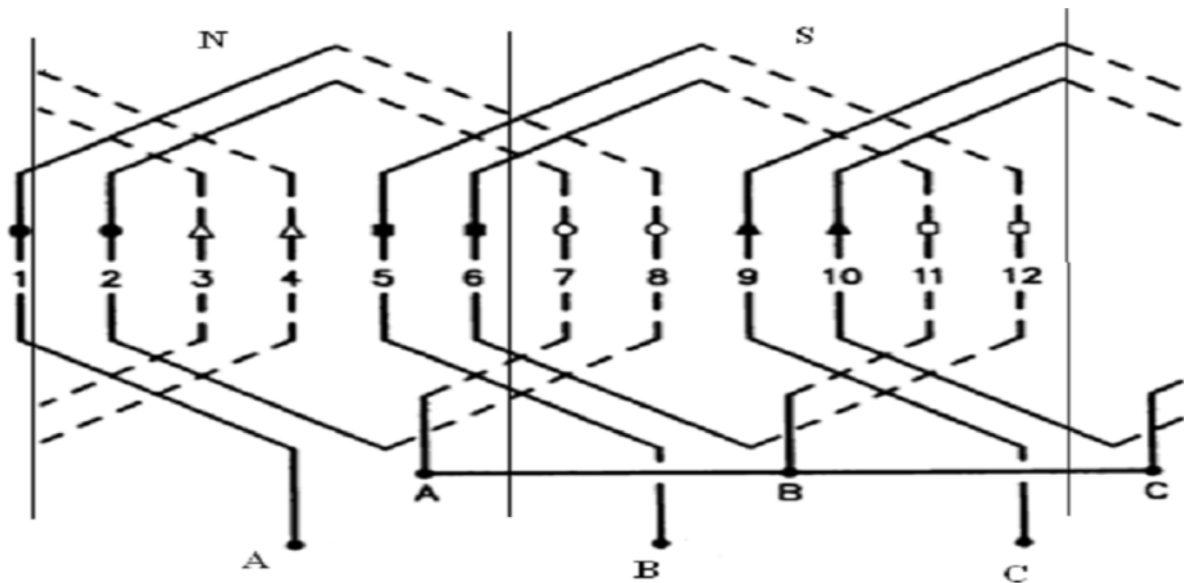


Figure 2.10 : Enroulement concentrique triphasé d'un moteur à 2 pôles et 12 encoches

➤ Enroulement ondulé

L'enroulement ondulé est habituellement un bobinage à deux couches, il est généralement utilisé dans les rotors des moteurs à rotor bobiné. Il doit être équilibré du point de vue électrique, c'est-à-dire que le nombre d'encoches actives doit être un multiple du produit du nombre de pôles et du nombre de phases. Dans ce type d'enroulement, les conducteurs qui occupent des places analogues sous deux pôles consécutifs sont connectés en série. Le circuit fait le tour du stator ou du rotor une ou plusieurs fois, allant d'un pôle à un autre sans revenir (Voir figure 2.11).

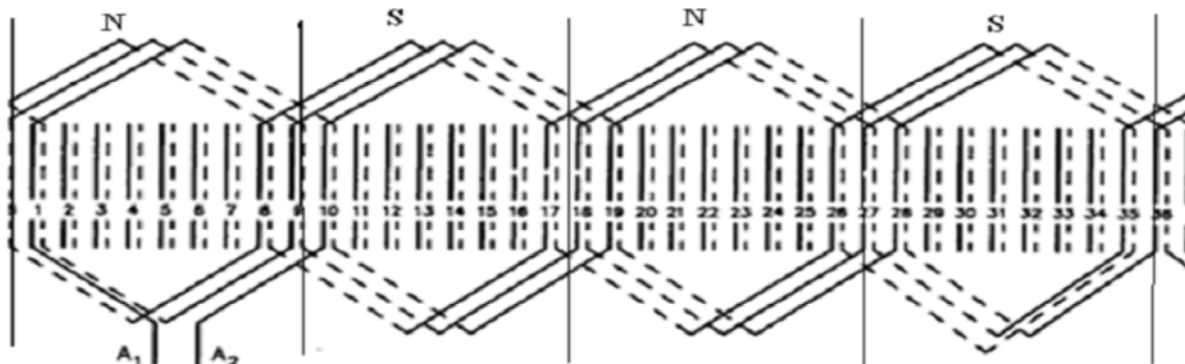


Figure 2.11 : Enroulement ondulé à deux couches d'un moteur à 4 pôles et 36 encoches

Lorsque les bobines sont faites de fils carrés ou rectangulaires de grande section (Figure : 2.7b), elles sont formés sur des gabarits et insérées globalement dans des encoches ouvertes. Dans le cas d'encoches semi-ouvertes (Figure. :2.7a), on utilise habituellement plusieurs fils ronds, vernis et de faible section pour former les conducteurs des bobines. Comme pour les bobines carrées, elles sont formés sur des gabarits mais introduites fil par fil ou quelques fils à la fois dans les encoches.

Pour réaliser l'enroulement d'une machine il faut connaître quelques paramètres :

- Le nombre d'encoches sous un pôle : $\tau = \frac{Z_s}{2P}$
- Le pas d'enroulement : $y = \frac{Z_s}{2P} \pm \varepsilon$
- Le nombre d'encoches par pôle et phase : $q = \frac{Z_s}{2P.m_1}$
- L'angle électrique entre deux encoches voisines : $\gamma = \frac{360P}{Z_s}$
- La zone de phase : $\alpha = \gamma.q$

Avec :

Z_s : Nombre total d'encoches au stator.

p : le nombre de paires de pôles.

ε : le raccourcissement. On le prend en général pour les enroulements à deux couches ± 1 et il est égal à 0 pour les enroulements à une seule couche (il n'y a pas de raccourcissement).

II.1.6–Isolation

La qualité de l'isolement des machines détermine leur fiabilité et pour cette raison on prête une sérieuse attention au choix de l'isolation et à sa fabrication. Le rôle de l'isolation ne se limite pas à sa rigidité diélectrique. Vu que les pertes dans le cuivre sont évacuées par l'isolation dans le milieu ambiant, il faut penser non seulement à la rigidité diélectrique et à la résistance à la chaleur de l'isolation, mais aussi à sa conductibilité thermique ce qui est obtenu en grande partie par imprégnation et compoundage. La résistance mécanique, l'étanchéité à l'humidité, et d'autres propriétés jouent un rôle important.

A l'heure actuelle on utilise plusieurs types de matériaux isolants, organiques tels que le coton, la soie, le papier et autre matériaux similaires parfois imprégnés d'huile. On utilise aussi des matières inorganiques comme le mica, la fibre de verre, utilisés seules ou agglomérés à l'aide de produits tels que l'asphalte, la gomme et les résine synthétiques. Les développements dans le domaine de la chimie ont amené toute une gamme de matériaux synthétiques, parmi eux le polyvinyle, le polyuréthane, le nylon, l'époxy et le polyester qui ont des caractéristiques isolantes et thermiques spécifiques.

Pour assurer une bonne isolation des machines il faut réaliser les isolations suivantes :

- **Isolation des conducteurs**

Pour les machines de faible tension et de petite puissance on utilise des conducteurs filaires « émaillés », pour les machines de haute tension de moyenne et de grande puissance on utilise des barres conductrices isolées par du papier, mica, verre, bakélite, résine (enrobage ou imprégnation).

- **Isolation des bobines par rapport à la masse**

Elle est réalisée en plaçant dans les encoches, avant toute opération d'insertion du bobinage, une feuille de matériau isolant en forme de *U* qui épouse tout le périmètre utile de l'encoche.

- **Isolation entre phase**

Dans le cas des encoches à une seule couche l'isolation entre spire a lieu dans la région des têtes de bobines, entre les bobines, ou entre les bobines et connexions d'entrée/sortie. Les isolations entre bobines seront réalisées par l'interposition d'isolant en feuille semblable à celui qui a servi à isoler les encoches. Dans le cas des encoches à deux couches, si le pas d'enroulement est inférieur à $2/3$, toutes les encoches contiennent des conducteurs appartenant à des phases différentes. Il est alors évidemment indispensable d'isoler, dans les encoches elles même ces bobines. Cela est en général réalisé par l'interposition, entre les deux plans de bobinage, d'une feuille d'isolant en forme de *U*, de dimensions bien sur réduite par rapport au *U*

d'isolation d'encoche, et renversé par rapport à ce dernier (figure 2.12).

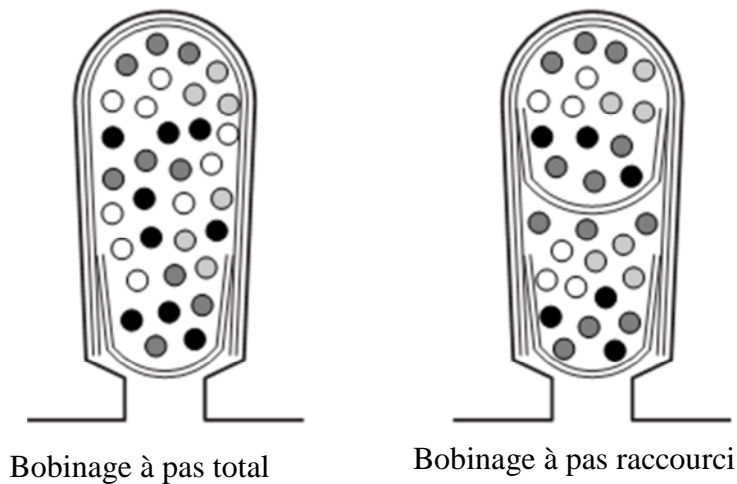


Figure 2.12 : Isolation entre phase

- **Fermeture d'encoche ou calage d'encoche**

C'est la dernière composante de l'isolation des bobinages, Son but est d'interdire que les conducteurs ne quittent les encoches, soit pendant le processus, soit aussi lors du fonctionnement de la machine sous l'effet des forces centrifuges s'il s'agit d'un bobinage tournant ou de forces d'origine électromagnétique, en particulier lors de régimes accidentels. Les cales sont également en forme de U, complété par une languette isolante plus rigide pour parfaire le maintien.

- **Cas des moteurs asynchrone de grande puissance alimenté par des grandes tensions**

L'isolation à la masse est réalisée à l'aide de mica-folium constitué de larges splicing de mica aggloméré sur un support avec un liant époxy. Après mise en place dans les encoches et réalisation des calages et connexions, l'ensemble du bobinage est imprégné sous vide et pression avec une résine époxy ayant les caractéristiques suivantes :

- Température max=110 à 120 °c
- Rigidité diélectrique= 70 [kV/mm]
- Résistivité à la rupture= 6,5 [N/mm²]

Spécialement étudiée pour réunir toutes les qualités requises de mise en œuvre et de rigidité diélectrique.

La cuisson de la résine s'effectue sans évaporation de solvant ce qui donne au bobinage une compacité et une imperméabilité parfaite lui conférant une résistance exceptionnelle lors des démarrages, et une insensibilité complète à l'humidité et aux pollutions industrielles (figure2.14)

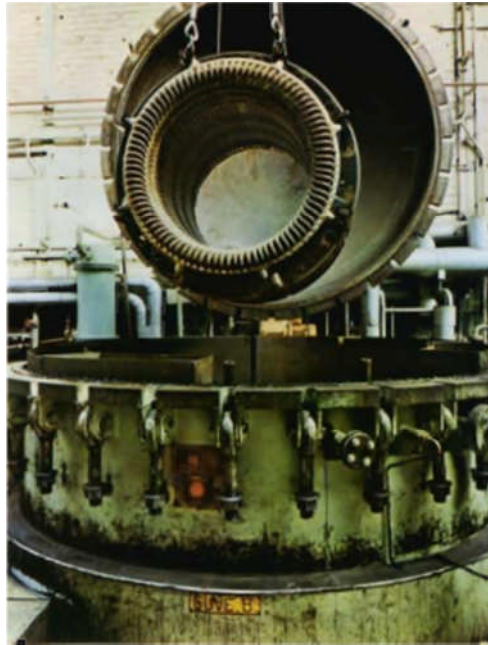


Figure2.13 : Procédure d'imprégnation du bobinage statorique d'un moteur de grande puissance.

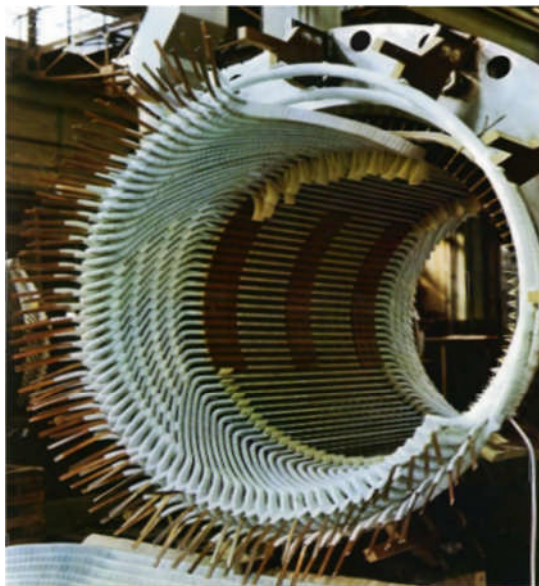


Figure2.14 : vue de l'isolation du bobinage d'un stator d'un moteur Asynchrone de grande puissance.

II.2-Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui dans le cas général, peut tourner à la vitesse n_1 . Lorsque le champ tournant est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est $n = \frac{f}{p}$. L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n) diffère de celle du rotor (n_1), c'est-à-dire lorsque $n_1 \neq n$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n_1 = n$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport $g = \frac{n - n_1}{n}$ ou $g = \frac{n - n_1}{n} \cdot 100\%$

Est appelé glissement d'une machine asynchrone.

II.3-Aperçu théorique sur la turbine à gaz

II.3.1-Constitution d'une turbine à gaz

La turbine à gaz, aussi appelée turbine à combustion, est une machine thermique qui connaît actuellement une grande vogue, compte tenu de ses excellentes performances (rendement supérieur à 35 % utilisée seule, et à 55 % en cycle combiné).

Dans sa forme la plus simple et la plus répandue (figure 2.15), cette machine est composée de trois éléments

Turbine à gaz simple

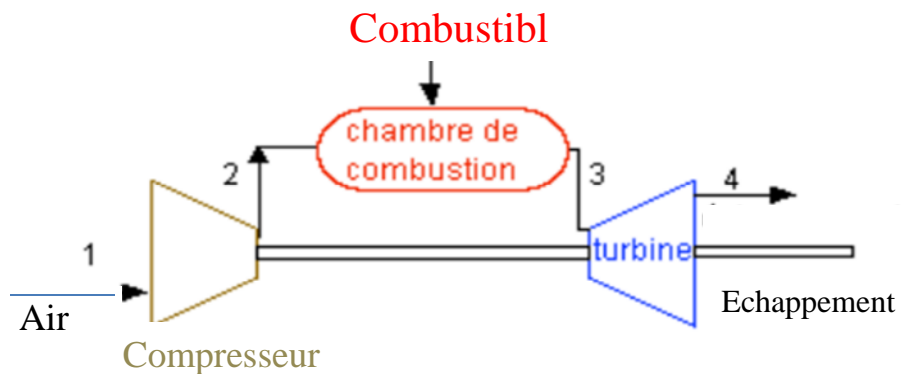


Figure 2.15 : Constitution d'une turbine à gaz.

- un compresseur, généralement centrifuge ou axial, qui sert à comprimer l'air ambiant à une pression comprise dans les machines modernes entre 10 et 30 bars environ.
- une chambre de combustion, dans laquelle un combustible injecté sous pression est brûlé avec l'air préalablement comprimé (ce dernier en fort excès afin de limiter la température des gaz brûlés en entrée de la turbine) ;
- une turbine, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz à haute température sortant de la chambre de combustion. Une partie significative (60 à 70 %) du travail récupéré sur l'arbre de la turbine sert à entraîner le compresseur.

Sous cette forme, la turbine à gaz constitue un moteur à combustion interne à flux continu. On notera que le terme de turbine à gaz provient de l'état du fluide thermodynamique, qui reste toujours gazeux, et non du combustible utilisé, qui peut être aussi bien gazeux que liquide (les turbines à gaz utilisent généralement du gaz naturel ou des distillats légers).

II.3.2-Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

Le compresseur est constitué d'un ensemble d'ailettes fixes (stator) et mobiles (rotor), comprime l'air extérieur, simplement filtré, jusqu'à 10, 15 bars, voire 30 bars pour certains modèles.

Du gaz, ou un combustible liquide pulvérisé, est injecté dans la chambre de combustion où il se mélange à l'air comprimé et s'enflamme. Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine, où l'énergie thermique des gaz chauds est transformée en énergie mécanique. La turbine est

constituée d'une ou plusieurs roues également munies d'ailettes précédées d'aubages fixes (directrices). Les gaz de combustion s'échappent par la cheminée à travers un diffuseur. Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre qui actionne d'une part le compresseur, d'autre part une charge qui n'est autre qu'un appareil (machine réceptrice : compresseur, pompe, alternateur ...) accouplé à son extrémité droite. Pour la mise en route, on utilise un moteur de lancement qui joue le rôle de démarreur. Le réglage de la puissance et de la vitesse de rotation est possible en agissant sur le débit de l'air en entrée et sur l'injection du carburant.

II.3.3-Maintenance des turbines et des moteurs asynchrones

Les pièces constitutives des turbines à gaz sont soumises, suivant les modalités d'emploi, à des fatigues à haute ou basse fréquence. C'est pourquoi certaines pièces intéressant directement la sécurité sont créditées de limites d'utilisation appelées communément vies limites, dont le constructeur propose, en général, pour une pièce donnée, lors de la certification du matériel, les valeurs, soit en nombre d'heures d'utilisation, soit en nombre de cycles. Si elles sont fixées à la fois en heures et en cycles, c'est la première des deux valeurs atteintes qui constitue la limite.

Il est donc nécessaire que l'exploitant suive l'évolution de ses pièces aussi bien en nombre d'heures d'utilisation qu'en nombre de cycles.

Chez Sonatrach la maintenance des turbines à gaz se fait en deux niveaux :

- Révision niveau I qui a lieu chaque 18 mois.
- Révision niveau II qui a lieu chaque trois ans.

La maintenance des moteurs asynchrones consiste en le changement des paliers lisses et des roulements qui ont eux aussi une durée de vie limitée par le constructeur.

Ci-après un tableau comparatif des coûts de réalisation et de maintenance de deux stations boosting, l'une est constituée d'un compresseur entraîné par une turbine à gaz et l'autre d'un compresseur gaz entraîné par un moteur asynchrone :

	Coût de réalisation	Coût de maintenance (main d'œuvre+ pièce de rechange)
Compresseur entraîné par une turbine	5 million \$	niveau I:5.000.000 DA niveau II : 3.000.0000DA
Compresseur entraîné par un moteur asynchrone (1991)	1,5 million\$	900000DA

Introduction

Dans ce chapitre nous intéressons au calcul des dimensions principales du moteur asynchrone qui est la première étape du processus de conception, elle permet de définir grossièrement les dimensions géométriques de la structure retenue. Elle utilise des équations analytiques traduisant les règles de conservation de flux dans différentes parties du moteur.

III.1. Choix du nombre d'encoches rotorique et statorique

Le choix du nombre d'encoches du stator et du rotor obéit à des contraintes de natures géométriques, électromagnétiques et électromécaniques.

Les contraintes géométriques sont avant tout liées à la mise en place du bobinage statorique. Pour limiter les coûts, un certain rapport hauteur/largeur d'encoches (2 à 4) doit être adopté. De plus, le pas d'encoche doit s'accroître avec le diamètre d'alésage.

Le choix du nombre d'encoches statoriques est lié au nombre de pôles et au nombre de phases ainsi qu'aux contraintes géométriques évoquées précédemment. Le choix du nombre d'encoches rotorique est lié au nombre d'encoches statoriques et doit être tel que les effets réactant (influence de la variation des perméances de dents) soient minimisés afin de réduire le bruit et les couples parasites et d'éliminer toute attraction unilatérale.

Le nombre d'encoches statoriques est lié à la polarité et au nombre de phases. En effet, le nombre d'encoches doit être un multiple du nombre de phases. On choisit généralement un nombre entier d'encoches par pôle et phase, calculé par la formule suivante : $Z_s = \frac{\pi * D}{\tau_d}$ (III.1)

Avec D : diamètre d'alésage.

τ_d : Le pas dentaire, une approximation grossière donne : $\tau_d = \beta * \sqrt{D}$

$\beta \approx 29.74 \cdot 10^{-2}$.

$\tau_d = 29.74 * 10^{-2} * \sqrt{0.465} = 20.28 \text{ mm}$.

$Z_s = \frac{3.14 * 465}{20.28} = 71.99$.

Donc le nombre d'encoches statoriques $Z_s = 72$.

Les nombres d'encoches statorique Z_s et rotorique Z_r doivent tous deux être pairs et différents. En cas d'égalité, celle-ci ferait apparaître un très fort couple réluctant.

Deux possibilités existent :

$$\begin{cases} 0.75Z_s \leq Z_r \leq Z_s \\ Z_s < Z_r \leq 1.25Z_s \end{cases}$$

Z_r Doit être le plus proche possible de $0,75 Z_s$ ou $1,25Z_s$. De plus, afin de minimiser les harmoniques de champ, on doit avoir si possible :

$|Z_s - Z_r|$ Non divisible par $2p$, ce qui nous donne un nombre d'encoche rotorique $Z_r = 64$.

III.2. Calcul des dimensions principales du moteur

L'évolution récente de l'industrie des machines asynchrones a entraîné une normalisation importante de la puissance de ces machines en fonction de la hauteur d'axe et du nombre de pôles.

Pour une puissance $P = 2610KW$ On a :

- La hauteur d'axe du moteur : $h = 559.5 \pm 0.2[mm]$
- Le diamètre externe du stator : $D_{ext} = 1119[mm]$
- Le diamètre interne du stator : $D = 465[mm]$
- L'entrefer $e = 9[mm]$
- Le facteur de puissance $\cos \varphi = 0.92$
- Le rendement $\eta = 90\%$

Les autres dimensions peuvent être calculées par des formules tirées des équations analytiques traduisant les règles de conservation de flux dans différentes parties du moteur.

III.2-1.Calcul de la longueur active du moteur

La longueur active de la machine est calculée par la formule suivante :

$$l_a = \frac{6.1 \cdot 10^{12} \cdot P_i}{\alpha_i \cdot k_f \cdot K_{en} \cdot D^2 \cdot A \cdot \beta_\delta \cdot \eta} \quad [mm] \quad (III.2)$$

Avec :

- P_i : Puissance électromagnétique calculée comme suit :

$$P_i = k_E * \frac{P_n}{\cos \varphi * \eta} \quad [KW] \quad (III.3)$$

- P_n : Puissance nominale du moteur en [KW]

- k_E : coefficient de majoration de la f.e.m tenant compte de la chute de tension dans la phase statorique.

$$k_E = 0,98 - 5 \cdot p \cdot 10^3$$

$$k_E = 0,98 - 5 * 2 * 10^3 = 0.97$$

$$P_i = 0,97 * \frac{2610}{0,92 * 0,90} = 3057,608 \quad [kW]$$

$$P_i = 3057,608 \quad [kW]$$

- $\alpha_i = \frac{2}{\pi} = 0.64$, coefficient de recouvrement polaire.

- $k_f = 1.1$, coefficient de forme de la courbe du champ dans l'entrefer.

- K_{en} : coefficient d'enroulement (coefficient de distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer)

$$K_{en} = k_d * k_r * k_{do} \quad (III.4)$$

k_d Et k_r sont respectivement le coefficient de distribution de l'enroulement et de raccourcissement du pas, calculées comme suit :

$$k_d = \frac{\sin(\alpha/2)}{q * \sin(\alpha/2 * q)} \quad (III.5)$$

Avec :

q : Nombre d'encoches par pôle et par phase et m nombre de phases.

$$q = \frac{Z_s}{2 * p * m} \quad (III.6)$$

$$q = \frac{72}{2 * 3 * 2} = 6$$

α : Angle électrique entre deux phases successives, qui se calcule comme suit :

$$\alpha = q \cdot \frac{P \cdot 360}{Z_s} \quad (\text{III.7})$$

$$\alpha = 6 \cdot \frac{2 \cdot 360}{72} = 60^\circ$$

Ce qui fait que :

$$k_d = \frac{\sin 60/2}{6 \cdot \sin 180/2 \cdot 6} = 0.956$$

$$k_r = \sin \frac{\beta \cdot \pi}{2} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$\beta = \frac{y}{\tau} \quad (\text{III.9})$$

$$y = \frac{Z_s}{2 \cdot P} \pm \varepsilon \quad (\text{III.10})$$

$$y = \frac{72}{4} - \frac{12}{4} = 15$$

ε : Raccourcissement.

$$\tau = \frac{Z_s}{2 \cdot P} = \frac{72}{4} = 18 : \text{Pas polaire.}$$

Ce qui fait

$$\beta = \frac{15}{18} = 0.83.$$

Et donc

$$k_r = \sin \frac{\pi}{2} 0.83 = 0.965$$

D'où :

$$K_{en} = 0.956 \cdot 0.965 = 0.923$$

- n : La vitesse de rotation de la machine en tours/minutes, elle est calculée comme suit :

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \quad [tr/mn]$$

- A : La charge linéaire qui est le courant total de la partie d'encoche par unité de longueur du périmètre du stator. Elle varie entre $[483 \div 2160] \cdot 10^2 A/m$, on prend :

$$A = 985 \cdot 10^2 \quad [A/m]$$

- β_δ : Valeur maximale de l'induction dans l'entrefer, elle varie entre $[0,82 \div 0,9]$ T
on prend :

$$\beta_\delta = 0,9 \quad [T]$$

On remplace toutes les valeurs dans l'expression de l_i et on calcul :

$$l_a = \frac{6,1 * 10^{12} * 3057,608}{0,64 * 1,1 * 0,923 * 1500 * (465)^2 * 0,9 * 985 * 10^2} = 998,3 \text{ [mm]}$$

$$l_a = 998,3 \quad [mm]$$

III.2.2.Coefficient de longueur

C'est le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur du stator, il doit être inférieur à 2,5 ($\lambda < 2,5$):

$$\lambda = \frac{l_a}{D}$$

$$\lambda = \frac{998,3}{465} = 2,146$$

III. 3. Dimensionnement des feuilles statorique et rotorique

III.3.1.Dimensionnement de la feuille statorique

Le dimensionnement du circuit magnétique, principalement formé de tôles ferromagnétiques isolées, est basé sur les contraintes suivantes:

- Imposer un niveau d'induction correspondant au coude de saturation de façon à ne pas créer trop de chutes de potentiel et de pertes fer, tout en limitant le volume et la masse du fer.
- définir ce niveau d'induction par la géométrie et le principe de conservation du flux magnétique.

Le diamètre d'alésage D et la longueur active l_a sont les dimensions caractéristiques du processus de dimensionnement. Mais le facteur clé associé est l'induction radiale dans l'entrefer, sa distribution est admise sinusoïdale.

Par conservation du flux, deux grandeurs peuvent être déduite de l'induction β_δ dans l'entrefer :

III.3-1-1.La hauteur de culasse

Elle est calculée par la formule suivant :

$$h_{c_s} = \frac{0,5 * \alpha_i * \tau_s * \beta_\delta}{k_{fer} * \beta_{c_1}} \quad [mm] \quad (III.11)$$

Avec :

β_{c_1} : Induction de crête dans la culasse, elle varie entre 1,5 et 1,65(T).

On prend :

$$\beta_{c_1} = 1,5 [T]$$

τ_s : Le pas polaire en millimètres

$$\tau_s = \frac{\pi * D}{2p} = \frac{3,14 * 465}{2 * 2} = 365,02 \quad [mm]$$

$$h_{c_s} = \frac{0,5 * 0,9 * 0,64 * 365,02}{0,95 * 1,5} = 73,77 \quad [mm]$$

$$h_{c_s} = 73,77 \quad [mm]$$

III.3.1.2.Calcul de la hauteur de la dent statorique

La hauteur de la dent statorique est calculée comme suit :

$$h_{z_s} = 0,5 * (D_m - D) - h_{c_s} \quad [mm] \quad (III.12)$$

Avec :

D_m : Diamètre médium du stator.

$$D_m = \frac{D_{ext} + D}{2} = \frac{1119 + 465}{2} = 792 \quad [mm]$$

$$h_{z_s} = 0,5 * (792 - 465) - 73,77 = 89,73 \quad [mm]$$

$$h_{z_s} = 89,73 \quad [mm]$$

III.3.1.3.La largeur minimale de la dent $b_{d\min}$

Elle est donnée par la formule suivante :

$$b_{z_s\min} = \frac{t_{s\min} * \beta_\delta}{K_{fer} * \beta_{z_s\max}} \quad [mm] \quad [2] \quad (III.13)$$

Avec :

$$t_{smin} = \frac{\pi(D+2.h_{fs}+2h_{ks})}{Z_s} \quad [mm] \quad [2] \text{ (III.14)}$$

h_{fs} : Hauteur de la fonte de l'encoche statorique.

$$h_{fs} = 3,4 \quad [mm]$$

h_{ks} : Hauteur de la clavette d'encoche statorique

$$h_{ks} = 3,2 \quad [mm]$$

$$t_{smin} = \frac{3,14(465+2*3,4+2*3,2)}{72} = 20,85 \quad [mm]$$

β_{Zsmax} : Induction maximale dans la dent statorique, elle varie

Entre 1,75 et 2 [T].

On prend :

$$\beta_{Zsmax} = 2 \quad [T]$$

$$b_{Zsmin} = \frac{20,85*0,9}{0,95*2} = 9,87563 \quad [mm]$$

$$b_{Zsmin} = 9,87563 \quad [mm]$$

III.3.1.4. Calcul de la largeur de l'encoche

La largeur d'encoche dans les encoches ouverte (qui sont rectangulaires) est calculée comme suit :

$$b_{ens} = t_{smin} - b_{Zsmin} \quad [mm] \quad [2] \text{ (III.15)}$$

$$b_{ens} = 20,85 - 9,8763 = 10,97 \quad [mm]$$

$$b_{ens} = 10,97 \quad [mm]$$

III.3.1.5. Calcul de la largeur maximale de la dent statorique

La largeur maximale de la dent statorique est calculée comme suit :

$$b_{Zsmax} = t_{smax} - b_{ens} \quad [mm] \quad \text{(III.16)}$$

Avec :

t_{smax} : Le pas dentaire maximal au stator, calculé comme suit :

$$t_{smax} = \frac{\pi(D+2.h_{Z_s})}{Z_s} \quad [mm] \quad [2] \quad (III.17)$$

$$t_{smax} = \frac{3,14(465+2*89,73)}{72} = 28,105 \quad [mm]$$

$$b_{Z_smax} = 28,105 - 10,97 = 17,135 \quad [mm]$$

$$b_{Z_smax} = 17,135 \quad [mm]$$

III.3.1.6.Calcul des dimensions de l'encoche

Dans les moteurs asynchrones de moyenne et de grande puissance on utilise des encoches ouvertes qui sont généralement de forme rectangulaire. Il est désavantageux d'employer les encoches semi-ouvertes pour des raisons de fabrication (il est difficile de poser l'enroulement statorique), et les encoches fermées et semi-fermées pour des raisons de remplissage, ces encoches qui sont généralement de forme trapézoïdales, avec angles arrondie ne sont pas adéquates pour accueillir l'enroulement statorique qui est constitué de barres de section rectangulaire.

a) Calcul de la hauteur de l'encoche

La hauteur de l'encoche statorique est calculée comme suit :

$$h_{en_s} = h_{Z_s} - h_{f_s} - h_{k_s} \quad [mm] \quad (III.18)$$

$$h_{en_s} = 89,73 - 3,4 - 3,2 = 83,13 \quad [mm]$$

$$h_{en_s} = 83,13 \quad [mm]$$

b) Calcul de la surface de l'encoche

L'encoche statorique est de géométrie rectangulaire, sa surface se calcul comme suit :

$$S_{en_s} = (h_{en_s} * b_{en_s}) - S_{en_{iso}} \quad [mm^2] \quad (III.19)$$

Avec :

$S_{en\ iso}$: La surface transversale occupée par l'isolation de l'encoche.

$$S_{en\ iso} = \mu_{iso} * \delta \quad [mm^2] \quad (III.20)$$

Avec:

μ_{iso} :Diamètre de l'isolation de l'encoche.

Pour les machines de 3000 à 6000v on utilise le plus souvent l'isolement avec garnissage de micafulium, et l'isolement continu a ruban micacé. Les encoches statoriques sont isolées avec garnissage réalise avec huit couches de micafulium de 0,25 mm d'épaisseur, pour la partie active et une couche de moins pour la partie frontale.

Le diamètre de l'isolation est donc :

$$\mu_{iso} = 0,25 * 8 = 2 \quad [mm]$$

Le micafolium est caractérisé par une rigidité diélectrique de 100 à 200 [kV/mm], et le champ électrique appliqué entre la paroi de l'encoche et un conducteur séparés par une distance $d = 2$ [mm] est :

$$E = \frac{U_n}{d} \quad [kV/mm] \quad (III.21)$$

$$E = \frac{5,5}{2} = 2,75 \quad [kV/mm]$$

δ :Périmetre de l'encoche calculé comme suit :

$$\delta = 2 * (h_{ens} + b_{ens}). \quad (III.22)$$

$$\delta = 2 * (83,13 + 10,97) = 188,2 \quad [mm]$$

$$S_{en\ iso} = 2 * 188,2 = 376,4 \quad [mm^2]$$

La surface de l'encoche est donc :

$$S_{en_s} = (83,13 * 10,97) - 376,4 = 535,5361 \quad [mm^2]$$

$$S_{en_s} = 535,5361 \quad [mm^2]$$

III.4. Calcul du bobinage statorique

Cette étape consiste à calculer le bobinage du moteur et notamment le nombre de spires de chaque phase.

Cette étape est toujours délicate à réaliser puisqu'il faut maximiser les performances (rendement, facteur de puissance) en choisissant correctement le nombre de spires du stator.

Le bobinage statorique est déterminé principalement par les trois paramètres suivants :

- le flux d'entrefer ;
- le courant, défini par la tension et la puissance du moteur ;
- la densité de courant, caractéristique de l'échauffement, dont le choix est lié au mode de refroidissement.

III.4.1. Calcul de nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche statorique

Le nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche est calculé comme suit :

$$N_{eff} = \frac{\tau_d * A * a_1 * 10^{-3}}{I_1} \quad [1] \quad (III.23)$$

Avec :

a_1 : Nombre de voix parallèles de l'enroulement statoriques

$a_1 = 2$ (Dans le cas présent nous avons utilisé un enroulement imbrique a deux couches car la réalisation des bobines avec les méplats est plus aisé avec ce mode de bobinage).

I_1 : Le courant dans une phase du stator donné par :

$$I_1 = \frac{P_n * 10^3}{m * U_n * \cos \varphi * \eta} \quad [A] \quad (III.24)$$

Avec :

$U_n = 5500V$, c'est la tension d'alimentation.

$$I_1 = \frac{2610 \cdot 10^3}{3 \cdot 5500 \cdot 0.92 \cdot 0.90} = 191.04 \quad [A]$$

$$N_{eff} = \frac{20,28 \cdot 985 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{191,04} \approx 20.$$

$$N_{eff} = 20 \text{ conducteurs/encoche.}$$

III.4.2. Calcul de nombre de spires d'une branche parallèle d'une phase

Le nombre de spires d'une branche parallèle d'une phase

$$W_s = \frac{p \cdot q \cdot N_{eff}}{a_1} \quad (III.25)$$

$$W_s = \frac{2 \cdot 6 \cdot 20}{2} = 120. \text{ Il y a 120 spires d'une branche parallèle d'une phase.}$$

III.4.3. Calcul de la section effective d'un conducteur de l'enroulement statorique

La section d'un conducteur S_{cu} est liée à la densité de courant dans l'enroulement statorique J_s par la relation:

$$S_{cu} = \frac{I_1}{J_s \cdot a_1} \quad [mm^2] \quad [1] \quad (III.26)$$

J_s : Est défini par le mode de refroidissement et la taille du moteur.

J_s : Varie de $[1,5 \div 15]$.

On prend :

$$J_s = 10,364 \quad [A/mm^2]$$

$$S_{cu} = \frac{191.04}{2 \cdot 10,364} = 9,216 \quad [mm^2]$$

$$S_{cu} = 9,216 \quad [mm^2]$$

III.4.4. Calcul du coefficient de remplissage des encoches statoriques

Le coefficient de remplissage nous renseigne sur l'état de remplissage de l'encoche par les conducteurs. Il est définie par le rapport entre la section de l'encoche et la somme des sections des conducteurs quelle contient (conducteurs avec isolations). Pour une encoche bien remplie K_{rem} prend ces valeurs dans l'intervalle $[0,7 \div 0,8]$.

$$K_{rem} = \frac{N_{elt} * S_{cu_{iso}}}{S_{en}} \quad [3] \quad (III.27)$$

Avec :

N_{elt} : Nombre de conducteurs élémentaires total dans l'encoche, et n_{el} : nombre de subdivisions dans le cas présent il est égale à 1 (pas de subdivision, on a utilisé des barres conductrices)

$$N_{elt} = N_{eff} * n_{el} \quad (III.28)$$

$S_{cu_{iso}}$: Section du conducteur statorique avec isolation.

$$S_{cu_{iso}} = (l + \sigma_{iso}) * (e + \sigma_{iso}) \quad [mm^2] \quad (III.29)$$

Avec :

σ_{iso} : diamètre de l'isolation du conducteur. L'isolation du conducteur est constituée de cinq couches de vernis isolant (résine époxy) de 0,25[mm] d'épaisseur).

$$\sigma_{iso} = 1,25mm.$$

La résine époxy est caractérisée par une rigidité diélectrique de 70[kV/mm], et le champ électrique entre deux conducteurs distants de $d = 4$ [mm] est :

$$E = \frac{U_n}{d} \quad [kV/mm]$$

$$E = \frac{5,5}{4} = 1,375 \quad [kV/mm]$$

e : Epaisseur du conducteur.

$$e = 4,8 [mm]$$

l : Largeur du conducteur. $l = 1,92$ [mm]

$$S_{cu_{iso}} = 19,1785 \quad [mm^2]$$

$$K_{rem} = \frac{20 \cdot 19,1785}{535,5361} = 0,716$$

III.5. Vérification des charges électromagnétiques

Après avoir calculé le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et choisit la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire A , l'induction dans l'entrefer β_δ et le flux sous un pôle Φ .

La différence relative entre la valeur vérifiée et la valeur préliminaire ne doit pas dépasser 10%.

III.5.1. Charge linéaire

La charge linéaire est le nombre d'ampères par mètre sur la périphérie d'induit. Elle est calculée comme suit :

$$A = \frac{I_1 \cdot W_s \cdot Z_s}{\pi \cdot D \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad [A/m] \quad (III.30)$$

$$A = \frac{191,04 \cdot 120 \cdot 72}{180 \cdot 465 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 986 \cdot 10^2 \quad [A/m]$$

III.5.2. Induction magnétique dans l'entrefer

L'induction magnétique dans l'entrefer caractérise l'utilisation magnétique de la machine. Elle est calculée comme suit :

$$\beta_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_a \cdot 10^{-6}} \quad [T] \quad (III.31)$$

Avec :

Φ : Le flux sous un pôle, déduit de la formule de la force électromotrice dans l'entrefer :

$$\Phi = \frac{E_1}{4 \cdot k_f \cdot f \cdot W \cdot K_{en}} \quad [wb] \quad (III.32)$$

Et E_1 : force électromotrice dans l'entrefer, déduite de la formule de la puissance électromagnétique :

$$E_1 = \frac{P_i}{m \cdot I_1 \cdot 10^{-3}} \quad [V] \quad (III.33)$$

$$E_1 = \frac{3057,608}{3 \cdot 191,04 \cdot 10^{-3}} = 5335,022 \quad [V]$$

$$\Phi = \frac{5335,022}{4 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 120 \cdot 0,923} = 0,219 \quad [Wb]$$

$$\beta_\delta = \frac{0,219}{0,64 \cdot 365,02 \cdot 998,3 \cdot 10^{-6}} = 0.939 \quad [T]$$

III.6. Dimensionnement de la feuille rotorique

Dans les moteurs électriques à haute tension à fort couple de démarrage, on utilise les rotors à encoches profondes.

La cage rotorique est faite de barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique. Les barres sont logées dans des encoches de géométrie rectangulaires, trapézoïdales ou en forme de bouteilles. Nous envisageons d'utiliser des barres en forme rectangulaire, car elles sont les plus simples à réaliser.

III.6.1. Calcul de la hauteur de la dent rotorique

La hauteur de la dent rotorique est calculée comme suit :

$$h_{z_r} = 0,5(D_r - d_{ar}) - h_{c_r} \quad [mm] \quad (III.34)$$

Avec :

D_r : Etant le diamètre du rotor [mm].

$$D_r = D - 2 \cdot \delta = 465 - 2 \cdot 9 = 447 \quad [mm]$$

d_{ar} : Diamètre de l'arbre

h_{c_r} : Hauteur du dos rotorique, calculée comme suit :

$$h_{c_r} = \frac{0,5 \cdot \alpha_r \cdot \tau_r \cdot \beta_\delta}{k_{fer} \cdot \beta_{c_r}} \quad [mm] \quad (III.35)$$

Et τ_r : pas polaire au rotor calculé comme suit :

$$\tau_r = \frac{\pi * D_r}{2 * p} \quad [mm] \quad (III.36)$$

$$\tau_r = \frac{3.14 * 447}{4} = 350,90 \quad [mm]$$

α_r : Coefficient de recouvrement du paquet de tôles rotorique.

$$\alpha_r = \frac{2}{\pi} = 0,64$$

β_{c_r} : Induction admissible dans le dos rotorique, elle varie entre $[1,15 \div 1,25]$.

On prend

$$\beta_{c_r} = 1,25 \quad [T]$$

Ce qui fait que :

$$h_{c_r} = \frac{0,5 * 0,64 * 350,90 * 0,9}{0,95 * 1,25} = 85,10 \quad [mm]$$

$$h_{c_r} = 85,10 \quad [mm]$$

$$h_{z_r} = 0,5 * (447 - 150) - 85,10 = 63,4 \quad [mm]$$

$$h_{z_r} = 63,10 \quad [mm]$$

III. 6.2. Calcul de la largeur minimale de la dent du rotor

Elle est calculée comme suit :

$$b_{z_{rmin}} = \frac{t_{rmin} * \beta_{\delta}}{k_{fer} * \beta_{z_{rmax}}} [mm] \quad [2] \quad (III.37)$$

Avec :

t_{rmin} : Le pas dentaire minimal au rotor [mm], calculé comme suit :

$$t_{rmin} = \frac{\pi(D_r - 2 * h_{z_r})}{Z_r} [mm] \quad [2] \quad (III.38)$$

$$t_{rmin} = \frac{3,14(447 - 2 * 63,10)}{64} = 15,739 \quad [mm]$$

$\beta_{z_{rmax}}$: Induction admissible dans la dent rotorique, elle varie entre $[1,75 \div 1,95]$ [T].

On prend :

$$\beta_{zr,max} = 1,95 \quad [T]$$

$$b_{zr,min} = \frac{15,739 \cdot 0,9}{0,95 \cdot 1,95} = 7,646 \quad [mm]$$

III. 6.3. Calcul de la largeur de l'encoche rotorique

La largeur de l'encoche du rotor est calculée par la formule suivante :

$$b_{en_r} = t_{rmin} - b_{zr,min} [mm] \quad [2] \quad (III.39)$$

$$b_{en_r} = 15,739 - 7,646 = 8,0925 \quad [mm]$$

III.6.4. Calcul de la largeur maximale de la dent rotorique

La largeur maximale de la dent rotorique est calculée comme suit :

$$b_{zr,max} = t_{rmax} - b_{en_r} [mm] \quad [2] \quad (III.40)$$

Avec :

t_{rmax} : pas dentaire maximal au rotor en [mm], calculé comme suit :

$$t_{rmax} = \frac{\pi(D_r - 2 \cdot h_{fr})}{Z_r} [mm] \quad [2] \quad (III.41)$$

h_{fr} : Hauteur de la fonte rotorique, $h_{fr} = 2 [mm]$

$$t_{rmax} = \frac{3,14(447 - 2 \cdot 2)}{64} = 21,734 \quad [mm]$$

$$b_{zr,max} = 21,734 - 8,0925 = 13,642 [mm]$$

III.6.5. Calcul de la hauteur de l'encoche

La hauteur de l'encoche rotorique est calculée par la formule suivante :

$$h_{en_r} = h_{zr} - h_{fr} [mm] \quad (III.42)$$

$$h_{en_r} = 63,4 - 2 = 61,4 \quad [mm]$$

III.6.6. Calcul de la surface de l'encoche rotorique

La surface de l'encoche rotorique est calculée par la formule suivante :

$$S_{en_r} = h_{en_r} * b_{en_r} \quad [mm^2] \quad (III.43)$$

$$S_{en_r} = 61,4 * 8,0925 = 496,879 \quad [mm^2]$$

III.7.Dimensionnement de la bague de court-circuit

III.7.1.Calcul de la section de la bague

La section de la bague est calculée par :

$$S_{bague} = K_{bague} * \frac{Z_r * S_{barre}}{2p} \quad [mm^2] \quad [1] \quad (III.44)$$

Avec :

$K_{bague} = [0,35 \div 0,45]$, on prend

$$K_{bague} = 0,4$$

$$S_{bague} = 0,4 * \frac{64 * 496,879}{4} = 3180,02 \quad [mm^2]$$

$$S_{bague} = 3180,02 \quad [mm^2]$$

III.7.2.Calcul de la hauteur de la bague

La hauteur de la bague s'exprime comme suit :

On prend :

$$h_{bague} = 1,1 * h_{z_r} \quad [mm]$$

La hauteur de la bague est donc :

$$h_{bague} = 1,1 * 63,10 = 69,41 \quad [mm]$$

III.7.3.Calcul de la largeur de la bague

La largeur de la bague rotorique est calculée par la formule suivante :

$$b_{bague} = \frac{S_{bague}}{h_{bague}} \quad [mm] \quad (III.45)$$

$$b_{bague} = \frac{3180,02}{69,41} = 45,815 \quad [mm]$$

$$b_{bague} = 45,815 \quad [mm]$$

III.7.4.Calcul du diamètre moyen de la bague

Le diamètre moyen de la bague se calcul comme suit :

$$D_{bague \text{ moy}} = D_r - h_{bague} \quad [mm] \quad (III.46)$$

$$D_{bague \text{ moy}} = 447 - 69,41 = 377,59 [mm]$$

$$D_{bague \text{ moy}} = 377,59 \quad [mm]$$

III.7.5.Calcul du courant dans la barre rotorique

Le courant dans la barre rotorique est calculé comme suit :

$$I_r = 1,11 * I_{1n} * K_{red1} \cos \varphi \quad [A] \quad [1] \quad (III.47)$$

Ou :

K_{red1} : rapport de transformation du courant statorique au courant rotorique, il est donné par :

$$K_{red1} = \frac{m_1 * W_s * K_{en}}{m_2 * W_r * K_{enr}} \quad [1] \quad (III.48)$$

Pour un système triphasé le courant dans la barre rotorique est :

$$I_r = 1.11 * I_{1n} * \frac{6 * W_s * K_{en}}{Z_r} * \cos \varphi \quad [A] \quad (III.49)$$

Avec :

I_{1n} : Courant nominal statorique en [A]

W_s : Nombre de spires statoriques.

K_{en} : Facteur de bobinage statorique.

$\cos \varphi$: Facteur de puissance nominal.

$$I_r = 1,11 * 310 * \frac{6*120*0,923}{64} * 0,92 = 3287,204 \text{ [A]}$$

$$I_r = 3287,204 \text{ [A]}$$

III.7.6.Calcul de la densité du courant dans la barre

$$J_{barre} = \frac{I_r}{S_{barre}} \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad (\text{III.50})$$

$$J_{barre} = \frac{3287,204}{496,879} = 6.995 \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

III.7.7.Calcul du courant dans la bague de court-circuitage

Le courant dans la bague est calculé comme suit :

$$I_{bague} = \frac{I_r}{K_{red}} \text{ [A]} \quad (\text{III.51})$$

Avec :

K_{red} : Coefficient de réduction donné par :

$$K_{red} = 2 * \sin \frac{\pi * p}{2 * Z_r} \quad \text{si} \quad \frac{Z_r}{p} < 6$$

$$K_{red} = \frac{\pi * p}{Z_r} \quad \text{si} \quad \frac{Z_r}{p} > 6$$

$$I_{bague} = \frac{I_r}{2 * \sin \frac{\pi * p}{2 * Z_r}} \text{ [A]}$$

$$I_{bague} = \frac{3287,204}{2 * \sin \frac{2 * 180}{64}} = 16722,605 \text{ [A]}$$

$$I_{bague} = 16722,605 \text{ [A]}$$

III.7.8.Calcul de la densité du courant dans la bague

$$J_{bague} = \frac{I_{bague}}{S_{bague}} \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad (\text{III.52})$$

$$J_{bague} = \frac{16722,605}{3180,02} = 5,258 \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

$$J_{bague} = 5,258 \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

III.8. Calcul du circuit magnétique

Le circuit magnétique des machines à courant alternatif, et des machines asynchrones en particulier, doit canaliser les lignes du champ magnétique tournant qui engendrent le fonctionnement de ces dernières. L'objet de ce calcul est de déterminer les forces magnétomotrices (fmm) qui nous permettra de calculer le courant magnétisant et de déduire par la suite la réactance magnétique. Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique (théorème d'Ampère).

Dans notre cas, $\oint H dl$ représente la somme $\sum H_x \cdot l_x$.

Où :

H_x : Représente l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans le tronçon x .

l_x : Représente la ligne moyenne du tronçon considéré.

Le calcul du champ magnétique sera fait pour une paire de pôle.

Le circuit de la machine asynchrone est constitué des parties suivantes :

- La culasse statorique.
- Les dents statoriques.
- L'entrefer.
- Les dents rotoriques.
- La culasse rotorique.

III.8.1.Circuit magnétique statorique

Avec les inductions calculées au paravent on peut déterminer les intensités des champs magnétiques dans les différentes parties de la machine.

a) Force magnétomotrice de la culasse statorique

Elle est donnée par :

$$F_{cs} = H_{cs} \cdot l_{cs} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad [1] \quad (III.53)$$

Avec :

l_{cs} : Longueur moyenne des lignes de champ dans la culasse statorique, elle est donnée par l'expression suivante :

$$l_{c_s} = \frac{\pi}{2p} (D_{ext} - h_{c_s}) \text{ [mm]} \quad [1] \quad (\text{III.54})$$

$$l_{c_s} = \frac{3,14}{4} (1119 - 73,77) = 820,5 \text{ [mm]}$$

$$l_{c_s} = 820,5 \text{ [mm]}$$

H_{c_s} : Intensité du champ magnétique dans la culasse statorique qui correspond à l'induction β_{c_s} .

H_{c_s} est déterminé de la courbe $H_{c_s} = f(\beta_{c_s})$. Représenté dans le tableau T.1 en annexe.

Pour $\beta_{c_s} = 1,5 \text{ [T]}$ l'intensité du champ correspondante est

$$H_{c_s} = 520 \text{ [A/m]}$$

$$F_{c_s} = 520 * 820,5 * 10^{-3} = 426,66 \text{ [A]}$$

$$F_{c_s} = 426,66 \text{ [A]}$$

b) Force magnétomotrice dans la dent du stator

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$F_{Z_s} = H_{Z_s \text{ moy}} \cdot h_{Z_s} \cdot 10^{-3} \text{ [A]} \quad [2] \quad (\text{III.55})$$

Où :

h_{Z_s} : Hauteur de la dent statorique en [mm]

$H_{Z_s \text{ moy}}$: Intensité du champ magnétique moyen de la dent statorique. Déterminée par la formule de SYMPSON :

$$H_{Z_s \text{ moy}} = (H_{Z_s \text{ max}} + 4 \cdot H_{Z_s \text{ moy}} + H_{Z_s \text{ min}}) / 6 \text{ [A/m]} \quad [2] \quad (\text{III.56})$$

Avec :

$H_{Z_s \text{ max}}$: Intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur minimale de la dent statorique, correspondant à $\beta_{Z_s \text{ max}}$.

Pour $\beta_{Z_s \text{ max}} = 2 \text{ [T]}$, l'intensité du champ correspondante est

$$H_{Z_s \text{ max}} = 3150 \text{ [A/m]}, \text{ (Tableau T.2 en annexe).}$$

$H_{Z_s \text{ min}}$: Intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur maximale de la dent statorique, correspondant à $\beta_{Z_s \text{ min}}$.

$$\beta_{Z_s \text{ min}} = \frac{t_{s \text{ max}} \cdot \beta_\delta}{K_{fer} \cdot b_{Z_s \text{ max}}} \text{ [T]} \quad [2] \quad (\text{III.57})$$

$$\beta_{Z_s \text{ min}} = \frac{28,105 * 0,9}{0,95 * 17,135} = 1,55 \text{ [T]}$$

Pour une induction $\beta_{Zsmin} = 1,55$ [T], l'intensité du champ correspondant est

$$H_{Zsmin} = 777 \text{ [A/m]} \text{ (Tableau T.2 en annexe)}$$

H_{ZmoyS} : Intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur moyenne de la dent statorique, calculée comme suit :

$$H_{ZmoyS} = \frac{H_{Zsmax} + H_{Zsmin}}{2} \text{ [A/m]} \quad [2] \quad (\text{III.58})$$

$$H_{ZmoyS} = \frac{3150 + 777}{2} = 1963,5 \text{ [A/m]}$$

$$H_{Zsmoy} = \frac{3150 + 4 \cdot 1963,5 + 777}{6} = 1963,5 \text{ [A/m]}$$

$$F_{Zs} = 1963,5 \cdot 89,73 \cdot 10^{-3} = 176,184 \text{ [A]}$$

$$F_{Zs} = 176,184 \text{ [A]}$$

III.8.2. Force magnétomotrice dans l'entrefer

La force magnétomotrice dans l'entrefer est proportionnelle à l'induction dans celui-ci, elle est calculée comme suit :

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot \beta_{\delta} \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^3 \text{ [A]} \quad [1] \quad (\text{III.59})$$

Avec :

K_{δ} : Coefficient d'entrefer (coefficient de CARTER), il prend en considération l'augmentation de la réluctance de l'entrefer due aux ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, il est calculé comme suit :

$$K_{\delta} = K_{\delta_s} \cdot K_{\delta_r} \quad [1] \quad (\text{III.60})$$

Avec :

$$K_{\delta_s} = 1 + \frac{b_{fs}}{\tau_d - b_{fs} + \left(\frac{5 \cdot \tau_d \cdot \delta}{b_{fs}} \right)} \quad (\text{III.61})$$

$$K_{\delta_r} = 1 + \frac{b_{fr}}{\tau_r - b_{fr} + \left(\frac{5 \cdot \tau_r \cdot \delta}{b_{fr}} \right)} \quad (\text{III.62})$$

$$K_{\delta_s} = 1 + \frac{4,97}{20,28 - 4,97 + \left(\frac{5 \cdot 9 \cdot 20,28}{4,97} \right)} = 1,025$$

$$K_{\delta_r} = 1 + \frac{3,5}{21,93 - 3,5 + \left(\frac{5 \cdot 9 \cdot 21,93}{3,5} \right)} = 1,00116$$

$$K_{\delta} = 1,025 \cdot 1,0016 = 1,0369$$

Ce qui fait que :

$$F_{\delta} = 0,8 * 0,9 * 1,0369 * 9 * 10^3 = 6719,112 \text{ [A]}$$

III.8.3.Circuit magnétique rotorique

a) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor

Elle est calculée par la relation suivante :

$$F_{c_r} = H_{c_r} \cdot l_{c_r} \cdot 10^{-3} \text{ [A]} \quad [1] \quad (\text{III.63})$$

Avec :

l_{c_r} : Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor, elle est donnée par la formule suivante :

$$l_{c_r} = \frac{\pi}{2p} (D_r - 2 \cdot h_{z_r} - h_{c_r}) + h_{c_r} \text{ [mm]} \quad (\text{III.64})$$

$$l_{c_r} = \frac{3,14}{4} (447 - 2 * 63,10 + 85,10) + 85,10 = 270,124 \text{ [mm]}$$

$$l_{c_r} = 270,124 \text{ [mm]}$$

H_{c_r} : Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction β_{c_r} .
(Tableau T.1 annexe). Pour une induction dans la culasse rotorique :

$$\beta_{c_r} = 1.25 \text{ [T]} \text{ L'intensité du champ correspondante est : } H_{c_r} = 289 \text{ [A/mm].}$$

$$F_{c_r} = 289 * 270,124 * 10^{-3} = 78,065 \text{ [A]}$$

$$F_{c_r} = 78,065 \text{ [A]}$$

b) Force magnétomotrice dans les dents rotoriques

Pour un rotor à encoches profondes, elle se calcul comme suit :

$$F_{z_r} = H_{z_{r\text{moy}}} \cdot l_{z_r} \text{ [A]} \quad [2] \quad (\text{III.65})$$

Avec :

$$l_{z_r} = h_{z_r} = 63.10 \text{ [mm]}$$

$H_{z_{r\text{moy}}}$: Intensité du champ magnétique moyen dans la dent rotorique qui est donné par la formule suivante :

$$H_{Z_{r moy}} = (H_{Z_{r max}} + 4.H_{Z_{moy r}} + H_{Z_{r min}}) / 6 \quad [A/m] \quad [2] \quad (III.66)$$

$H_{Z_{r max}}$: Intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur minimale de la dent rotorique, correspondant à $\beta_{Z_{r max}}$

Pour une induction dans la dent rotorique : $\beta_{Z_{r max}} = 1,95 \quad [T]$, le champ correspondant est :

$$H_{Z_{r max}} = 2520 \quad [A/m]. \text{ (Tableau T.2)}$$

$H_{Z_{r min}}$: Intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur maximale de la dent rotorique, correspondant à $\beta_{r min}$.

$$\beta_{r min} = \frac{t_{r max} \cdot \beta_{\delta}}{K_{fer} \cdot b_{Z_{r max}}} \quad [T] \quad [2] \quad (III.67)$$

$$\beta_{r min} = \frac{21,734 \cdot 0,9}{0,95 \cdot 13,642} = 1,509 \quad [T]$$

Pour une induction : $\beta_{r min} = 1,509 \quad [T]$, correspond un champ :

$$H_{Z_{r min}} = 722 \quad [A/m] \text{ (Tableau T.2)}$$

$H_{Z_{moy r}}$: Intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur moyenne de la dent rotorique, calculée comme suit :

$$H_{Z_{moy r}} = \frac{H_{Z_{r max}} + H_{Z_{r min}}}{2} \quad [A/m] \quad [2] \quad (III.68)$$

$$H_{Z_{moy r}} = \frac{2520 + 722}{2} = 1621 \quad [A/m]$$

$$H_{Z_{r moy}} = 810,5 \quad [A/m]$$

$$F_{Z_r} = 810,5 \cdot 63,10 \cdot 10^{-3} = 51,142 \quad [A]$$

$$F_{Z_r} = 51,142 \quad [A]$$

III.8.4. Force magnétomotrice totale par paire de pôles :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2(F_{\delta} + F_{Z_s} + F_{Z_r}) + F_{c_s} + F_{c_r} \quad [A] \quad (III.69)$$

La multiplication par deux est due au fait que l'entrefer, les dents statoriques et rotoriques sont parcourus deux fois par les lignes de champ magnétique.

$$F = 2(6719,112 + 176,184 + 51,142) + 426,66 + 78,065 = 14397,601$$

$$F = 14397,601 \quad [A]$$

III.8.5. Calcul du coefficient de saturation de la machine :

IL est donné par :

$$K_y = \frac{\sum F_i}{2.F_\delta} \quad [1] \quad (III.70)$$

$$K_y = \frac{14397,601}{2 \cdot 6719,112} = 1,07139$$

III.8.6. Calcul du coefficient de saturation des dents :

Il est calculé comme suit :

$$K_{yz} = \frac{F_\delta + F_{Zs} + F_{Zr}}{F_\delta} \quad (III.71)$$

$$K_{yz} = \frac{6719,112 + 176,184 + 51,142}{6719,112} = 1,0338$$

III.8.7. Calcul du courant de magnétisation du moteur :

Le courant magnétisant représente la composante réactive du courant en marche à vide, il est donné par la relation suivante

$$I_y = \frac{p \cdot \sum F_i}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_s \cdot K_{en}} \quad [A] \quad [1] \quad (III.71)$$

Pour avoir de bonnes performances il faut s'assurer le courant magnétisant ne dépassant pas 10% du courant nominal.

$$I_y = \frac{2 \cdot 14397,601}{0.9 \cdot 3 \cdot 120 \cdot 0.923} = 96,288 \quad [A]$$

III.8.8. Calcul de la réactance de magnétisation :

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e * U_1}{I_y} \quad [\Omega] \quad [1] \quad (\text{III.72})$$

$$X_m = \frac{0,97 * 5500}{96,288} = 55,4065 \quad [\Omega]$$

$$X_m = 55,4065 \quad [\Omega]$$

III.8.9. Calcul du coefficient de dispersion magnétique de l'enroulement statorique :

Il est donné par la formule suivante :

$$b_y = \frac{X_s}{X_m} \quad [1] \quad (\text{III.73})$$

Avec :

X_s : La réactance de fuite d'une phase de l'enroulement statorique.

X_m : Réactance principale pour l'harmonique fondamentale de l'enroulement statorique.

$$b_y = \frac{4,283}{55,4065} = 0,0773$$

III.8.10. Calcul de la force magnétomotrice à vide :

La force magnétomotrice à vide est calculée par la formule suivante :

$$E_0 = \frac{E_1}{1+b_y} \quad [V] \quad (\text{III.74})$$

Pour avoir de bonnes performances il faut s'assurer que la différence entre E_0 et E_1 est supérieure à 5% de E_1 .

$$E_0 = \frac{5335,022}{1+0,0773} = 4952,215 \quad [V]$$

$$E_0 = 4952,215 \quad [V]$$

➤ Vérification :

$$E_1 - E_0 = 382,807 \quad [V]$$

$$E_1 * 5\% = 266,751 \quad [V]$$

➤ **Conclusion :**

Le calcul des forces électromotrices dans les différentes parties du moteur nous a permis de calculé le courant de magnétisation et la réactance de magnétisation, qui nous ont conduit au calcul de force magnétomotrice à vide, après vérification de la satisfaction de la condition énoncée précédemment (la différence entre E_0 et E_1 est supérieure à 5% de E_1), nous pouvant conclure que le moteur en question a de bonnes performances.

III.9. Calcul des paramètres électriques des enroulements :

Pour pouvoir déterminer les caractéristiques de la machine on procédera au calcul des paramètres du circuit équivalent ($R_s, R_r, X_s, X_r, R_r', X_r'$).

III.9.1. Résistance active d'une phase de l'enroulement statorique :

Elle est calculée par la formule suivante :

$$R_s = \rho_{cu(T)} \cdot \frac{W_s \cdot l_w \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{elt} \cdot q_{elt}} \quad [\Omega] \quad [1] \quad (III.75)$$

Avec :

a_1 : Nombre de voies parallèles de l'enroulement statorique.

N_{elt} : Nombre de conducteurs élémentaires de l'enroulement statorique.

q_{elt} : Section standard d'un conducteur statorique, dans le cas présent :

$q_{elt} = S_{cu}$ (On utilise des barrettes conductrices ce qui fait qu'il n'y a pas de subdivision des conducteurs statoriques).

$\rho_{cu(T)}$: Résistivité du cuivre à la température (T), elle est donnée par :

$$T = 20^\circ C \quad \rho_{cu(T)} = 17.2 * 10^{-9} \quad [\Omega]$$

$$T = 115^\circ C \quad \rho_{cu(T)} = 24.4 * 10^{-9} \quad [\Omega]$$

l_w : Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, elle est calculée comme suit :

$$l_w = 2(l_1 + l_{f_1}) \quad [mm] \quad (III.76)$$

Où :

l_1 : Longueur de l'induit ($l_1 \approx l_a$) $[mm]$

l_{f_1} : Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire, pour un enroulement à sections souples elle est déterminée par la formule suivante :

$$l_{f_1} = (1.16 + 0.14 * p)b_{1 moy} + 15 \quad [mm] \quad (III.77)$$

Où :

p : Est le nombre de pôles.

$b_{1 moy}$: Largeur moyenne d'une section, elle est donnée par :

$$b_{1 moy} = t_{1 moy} \cdot y_{1 moy} \quad [mm] \quad (III.78)$$

$t_{1 moy}$: Pas dentaire moyen, calculé comme suit :

$$t_{1\text{ moy}} = \frac{t_{s\text{max}} + t_{s\text{min}}}{2} \quad [mm] \quad (\text{III.79})$$

$$t_{1\text{ moy}} = \frac{28,105 + 20,85}{2} = 24,477 \quad [mm]$$

$y_{1\text{ moy}}$: Pas moyen d'un groupe de section.

$$y_{1\text{ moy}} = 15.$$

$$b_{1\text{ moy}} = 24,477 * 15 = 367,16 \quad [mm]$$

$$l_{f_1} = (1,16 + 0,14 * 2) * 367,16 + 15 = 543,71 \quad [mm]$$

$$l_w = 2 * (998,3 + 543,17) = 3082,94 \quad [mm]$$

Ce qui fait que :

$$R_s = 24,4 * 10^{-9} * \frac{120 * 3082,94 * 10^3}{2 * 1 * 9,216} = 0.4897 \quad [\Omega]$$

III.9.2. Réactance de dispersion d'une phase de l'enroulement du stator :

La réactance de fuite globale du stator est déterminée par les types de dispersions suivant :

- Dispersion d'encoches.
- Dispersion différentielle.
- Dispersion frontal.

a) Réactance de fuite d'encoche :

Elle est due aux flux de fuite qui se referme autour de l'encoche, elle est donnée par :

$$X_{enc_s} = \frac{1.58.f_s.l_a.W_s^2}{p.q.10^8} \cdot \lambda_{en_s} \quad [1] \quad (\text{III.80})$$

Avec :

λ_{en_s} : Perméance d'encoche, pour une encoche ouverte elle se calcul comme suit :

$$\lambda_{en_s} = \frac{h_1}{3.b_{en_s}} \cdot K_{B_1} + \left[\frac{h_1'}{b_{en_s}} + \frac{3.h_{K_s}}{b_{en_s} + 2.b_{f_s}} + \frac{h_{f_s}}{b_{f_s}} \right] \cdot K_{B_2} \quad (\text{III.81})$$

Avec :

h_1 : Hauteur de l'encoche occupée par les conducteurs statoriques.

h_1' : Hauteur de l'encoche occupée par l'isolation de l'encoche.

h_{K_s} et h_{f_s} : Hauteurs de la clavette et la fonte statorique respectivement.

K_{B_1} et K_{B_2} : Coefficient donnés suivant les valeurs de l'induction dans l'entrefer (courbe A2 en

annexe).

$K_{B_1} = K_{B_2} = 1$ Pour un enroulement à une seule couche

Pour une induction $\beta_\delta = 0,9$ [T] $K_{B_1} = 0,94$ et $K_{B_2} = 0,92$

$$\lambda_{en_s} = \frac{79,13}{3 \cdot 10,97} * 0,94 + \left[\frac{2}{10,97} + \frac{3 \cdot 3,2}{10,97 + 2 \cdot 4,97} + \frac{3,4}{4,97} \right] * 0,92 = 3,473$$

$$X_{enc_s} = \frac{1,58 \cdot 50 \cdot 998,3 \cdot (120^2)}{2 \cdot 6 \cdot 10^8} * 3,473 = 3,286 \quad [\Omega]$$

b) Réactance de fuite différentielle :

La réactance de fuite différentielle est due au flux de fuite qui se renferme d'une dent statorique à une autre à travers l'entrefer, au flux différentiel de phase et au flux différentiel de l'encoche, elle se calcul comme suit :

$$X_{s_d} = \frac{1,58 \cdot f_s \cdot l_a \cdot W_s^2}{p \cdot q \cdot 10^8} \cdot \lambda_{s_d} \quad [1] \quad (III.82)$$

λ_{s_d} : Perméance différentielle, elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{s_d} = \frac{0,9 \cdot \tau_d \cdot (q \cdot K_{en})^2}{K_\delta \cdot \delta} \cdot K_{f_s} \cdot K_{dd_1} \cdot K_{rr_1} \quad (III.83)$$

Avec :

$$K_{f_s} = 1 - \left(\frac{0,033 \cdot b_{f_s}^2}{\delta \cdot \tau_d} \right) \quad (III.84)$$

$$K_{f_s} = 1 - \left(\frac{0,033 \cdot (4,97)^2}{9 \cdot 20,28} \right) = 0,995.$$

K_{rr_1} : Coefficient qui dépend de « q » il est donné par le tableau T.3 en annexe.

K_{dd_1} : Coefficient de fuite différentielle donnée par le tableau T.4 en fonction de Z_r/p et q.

Pour : $Z_s = 72$, et $q = 6$ on a :

$$K_{rr_1} = 0,0052$$

$$K_{dd_1} = 1,06896$$

$$\lambda_{s_d} = \frac{0,9 \cdot 20,28 \cdot (6 \cdot 0,923)^2}{1,0369 \cdot 9} * 0,995 * 1,06896 * 0,0052 = 0,331$$

$$X_{s_d} = \frac{1,58 \cdot 50 \cdot 998,3 \cdot (120)^2}{2 \cdot 6 \cdot 10^8} * 0,331 = 0,313 \quad [\Omega]$$

$$X_{s_d} = 0,313 \quad [\Omega]$$

c) Réactance de fuite frontale :

C'est la réactance présentée par les parties des enroulements situées dans l'air à chaque extrémité du paquet des tôles, elle est donnée par la formule semi-empirique suivante :

$$X_{sf} = \frac{1.58 \cdot f_s \cdot l_a \cdot W_s^2}{p \cdot q \cdot 10^8} \cdot \lambda_{sf} \quad [\Omega] \quad [1] \quad (\text{III.85})$$

Avec :

λ_{sf} : Perméance frontale, elle est donnée comme suit :

$$\lambda_{sf} = 0.34 \cdot \frac{q}{l_a} (l_{f1} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) \quad (\text{III.86})$$

Avec :

β : Rapport de raccourcissement.

τ : Pas polaire, en [mm].

$$\lambda_{sf} = 0.34 \cdot \frac{6}{998.3} (543.71 - 0.64 \cdot 0.83 \cdot 365.02) = 0.714$$

$$X_{sf} = \frac{1.58 \cdot 50 \cdot 998.3 \cdot (120)^2}{2 \cdot 6 \cdot 10^8} \cdot 0.714 = 0.675 \quad [\Omega]$$

d) Réactance totale :

La réactance totale est donnée par la formule suivante :

$$X_s = \frac{1.58 \cdot f_s \cdot l_a \cdot W_s^2}{p \cdot q \cdot 10^8} \cdot \lambda_s \quad [\Omega] \quad [1] \quad (\text{III.87})$$

Avec :

$$\lambda_s = \lambda_{en_s} + \lambda_{sd} + \lambda_{sf} \quad (\text{III.88})$$

$$\lambda_s = 3.473 + 0.331 + 0.675 = 4.479$$

$$X_s = \frac{1.58 \cdot 50 \cdot 998.3 \cdot (120)^2}{2 \cdot 6 \cdot 10^8} \cdot 4.479 = 4.238 \quad [\Omega]$$

$$X_s = 4.238 \quad [\Omega]$$

III.9.3. Résistance active de la barre rotorique :

La résistance active de la barre est donnée par :

$$R_b = \rho_{cu(T)} \cdot \frac{l_a}{S_b} k_{PP} \cdot 10^3 \quad [\Omega] \quad [1] \quad (\text{III.89})$$

Avec :

$$k_{PP} = \frac{S_b}{S_{pp}} \quad (\text{III.90})$$

S_{pp} : Surface théorique de la barre pendant le calcul de la profondeur de pénétration du courant, la section S_{pp} est calculée seulement pour le régime de démarrage, $k_{PP} = 1$ pour le régime de fonctionnement, et $S_{pp} = S_b$.

$$T = 75^\circ\text{C} \quad \rho_{cu(T)} = 21.3 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega]$$

$$T = 115^\circ\text{C} \quad \rho_{cu(T)} = 24.4 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega]$$

$$R_b = 21,3 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{998,3}{496,879} \cdot 1 \cdot 10^3 = 4,2794 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega]$$

$$R_b = 4,2794 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega]$$

III.9.4. Résistance de la partie de la bague qui se situe entre deux barres voisines :

Elle se calcul par l'expression suivante :

$$R_{bague} = \frac{\rho_{cu(T)} \cdot 2\pi \cdot D_{bague \text{ moy}} \cdot 10^3}{Z_r \cdot S_{bague}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.91})$$

Avec :

S_{bague} : Section de la bague de court-circuitage [mm²]

Z_r : Nombre d'encoches rotoriques

$D_{bague \text{ moy}}$: Diamètre moyen de la bague en [mm]

$$R_{bague} = \frac{21,3 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 377,9 \cdot 10^3}{64 \cdot 3180,02} = 2,4837 \cdot 10^{-7} \quad [\Omega]$$

$$R_{bague} = 2,4837 \cdot 10^{-7} \quad [\Omega]$$

III.9.5. Résistance de la bague ramenée à la barre :

La résistance de la bague ramenée au courant de la barre est donnée par l'expression suivante :

$$R_{bague}'' = \frac{R_{bague}}{(K_{red2})^2} \quad [\Omega] \quad [1] \quad (\text{III.92})$$

Avec :

K_{red2} : Coefficient de réduction du courant de la bague au courant de la barre, il est calculé comme suit :

$$\text{Pour : } Z_r/2P < 6 \quad K_{red2} = 2 \cdot \sin[(180^\circ \cdot P)/Z_r]$$

$$\text{Pour : } Z_r/2P \geq 6 \quad K_{red2} \approx 2 \cdot \pi \cdot P/Z_r.$$

$$\text{Dans notre cas : } K_{red2} = 2 \cdot \sin[(180^\circ \cdot 2)/64] = 0,196$$

$$R_{bague}'' = \frac{2.4837 \cdot 10^{-7}}{(0.196)^2} = 6,4653 \cdot 10^{-6} \quad [\Omega]$$

$$R_{bague}'' = 6,4653 \cdot 10^{-6} \quad [\Omega]$$

III.9.6. Résistance d'une phase rotorique :

Elle représente la somme des résistances de la barre et celle de la bague ramenée à la barre. Pour le type d'encoches considérées elle est donnée comme suit :

$$R_r = R_b + R_{bague}'' \quad [\Omega] \quad [1] \quad (\text{III.93})$$

$$R_r = 4,2794 \cdot 10^{-5} + 6,4653 \cdot 10^{-6} = 4,9259 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega]$$

$$R_r = 4,9259 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega]$$

III.9.7. Résistance de la cage ramenée au stator :

La résistance de la cage ramenée à l'enroulement statorique est donnée par :

$$R_r' = K_{red1} (R_b + R_{bague}'') \quad [\Omega] \quad [1] \quad (\text{III.94})$$

Avec :

K_{red1} : Coefficient de réduction de la résistance de la cage vers l'enroulement du stator, elle est calculée comme suit :

$$K_{red1} = \frac{4 \cdot m_1}{Z_r} \cdot \frac{(W_s \cdot K_{en})^2}{(K_{ob})^2} \quad (\text{III.95})$$

K_{ob} : Coefficient d'inclinaison des encoches rotoriques, donné par :

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \quad (\text{III.96})$$

α_{ob} : Angle central d'inclinaison des encoches, donné par :

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot P \cdot \pi \cdot \beta_{ob}}{Z_r} \quad [rad] \quad (\text{III.97})$$

β_{ob} : Rapport des pas dentaires statorique et rotorique, donné par :

$$\beta_{ob} = \frac{\tau_d}{\tau_r} \quad (\text{III.98})$$

$$\beta_{ob} = \frac{20,28}{21,93} = 0,924.$$

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,924}{64} = 0,181 \quad [\text{rad}]$$

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{0,181}{2}\right)}{\left(\frac{0,181}{2}\right)} = 0,497.$$

Ce qui fait que :

$$K_{red1} = \frac{4 \cdot 3}{64} \cdot \frac{(120 \cdot 0,923)^2}{(0,497)^2} = 9312,239.$$

$$R_r' = 9312,239(4,9259 \cdot 10^{-5}) = 0,4587 \quad [\Omega]$$

$$R_r' = 0,4587 \quad [\Omega]$$

III.9.8. Réactance du rotor :

La réactance de fuite globale du rotor est déterminée par les types de dispersions suivants :

- Dispersion d'encoche.
- Dispersion différentielle.
- Dispersion frontale.

Pour le type d'encoche utilisée au rotor du présent moteur la réactance de fuite est donnée par la formule suivante :

$$X_r = 7,9 \cdot f \cdot l_a \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad [1] \quad (\text{III.99})$$

Avec :

λ_2 : Perméance de dispersion du rotor, elle est donnée par :

$$\lambda_2 = \lambda_{2\text{en}} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (\text{III.100})$$

$\lambda_{2\text{en}}, \lambda_{2d}, \lambda_{2f}, \lambda_{ob}$: Sont respectivement les perméances d'encoche, différentielle, frontale et oblique, elles sont donnée par les formules suivantes :

$$\lambda_{2\text{en}} = C_\lambda + \left[\frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right] \quad (\text{III.101})$$

$$C_\lambda = \psi \cdot \left[\left(\frac{h_{enr} + 0,4 \cdot b_{enr}}{3 \cdot b_{enr}} \right) \cdot \left(\frac{1 - \pi \cdot b_{enr}}{8 \cdot S_b} \right)^2 + 0,66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot b_{enr}} \right) \right] \quad (\text{III.98})$$

$\psi = f(\xi)$, donné sur la courbe A3 en annexe.

En fonctionnement nominal $\psi = 1$.

$$C_\lambda = 1 \cdot \left[\left(\frac{61,4 + 0,4 \cdot 10,97}{3 \cdot 10,97} \right) \cdot \left(\frac{1 - 3,14 \cdot 10,97}{8 \cdot 496,879} \right)^2 + 0,66 - \left(\frac{4}{2 \cdot 10,97} \right) \right] = 0,4778$$

$$\lambda_{2\text{ en}} = 0,4778 + \left[\frac{2}{3,5} \right] = 1,049$$

$$\lambda_{2\text{ en}} = 1,049$$

a) Perméance différentielle :

La perméance de la dispersion différentielle est donnée par :

$$\lambda_{2d} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \left(\frac{Z_r}{6 \cdot P} \right)^2}{\delta \cdot K_\delta} \cdot K_{dd2} \quad (\text{III.102})$$

Avec :

K_{dd2} : Coefficient de la dispersion différentielle du rotor, il est en fonction de q_2 :

$$q_2 = Z_r / 3 \cdot 2 \cdot P.$$

L'équation régissant la courbe de K_{dd2} est :

$$K_{dd2} = \frac{9,15}{100 \left(\frac{Z_r}{6 \cdot P} \right)^2} \quad (\text{III.103})$$

$$K_{dd2} = \frac{9,15}{100 \cdot \left(\frac{64}{6 \cdot 2} \right)^2} = 0,0032$$

$$\lambda_{2d} = \frac{0,9 \cdot 21,93 \cdot \left(\frac{64}{12} \right)^2}{9 \cdot 1,0369} \cdot 0,0032 = 0,192$$

$$\lambda_{2d} = 0,192$$

b) Perméance frontale :

La perméance de la partie de l'enroulement située dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles est donnée par :

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3.D_{bague\ moy}}{Z_r.l_a.(K_{red2})^2} \cdot \log \left[\frac{4,7.D_{bague\ moy}}{2.(h_{bague}+b_{bague})} \right] \quad (III.104)$$

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3*377,59}{64*998,3.(0,196)^2} * \log \left[\frac{4,7*377,59}{2.(69,41+45,815)} \right] = 0,313$$

C) Perméance d'inclinaison d'encoche rotorique :

$$\lambda_{ob} = \frac{\tau_r.(\beta_{ob})^2}{9,5.\delta.K_\delta.K_y} \quad (III.105)$$

Avec :

K_y : Coefficient de saturation de la machine.

$$\lambda_{ob} = \frac{21,93*(0,924)^2}{9,5*9*1,0369*1,079} = 0,195$$

Ce qui fait que :

$$\lambda_2 = 1,049 + 0,192 + 0,313 + 0,195 = 1,749$$

$$\lambda_2 = 1,749$$

$$X_r = 7,9 * 50 * 998,3 * 1,749 * 10^{-9} = 6,8968 * 10^{-4} \quad [\Omega]$$

$$X_r = 6,8968 * 10^{-4} \quad [\Omega]$$

III.9.9.Réactance de fuite de l'enroulement rotorique ramenée à l'enroulement statorique :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$X_r' = K_{red1} \cdot X_r \quad [\Omega] \quad (III.106)$$

$$X_r' = 9312.239 * 6,8968 * 10^{-4} = 6,422 \quad [\Omega]$$

$$X_r' = 6,422 \quad [\Omega]$$

III.9.10.Paramètres de démarrage :

Lors de l'alimentation du moteur, à rotor immobile les barres de la cage sont soumises à un champ tournant de fréquence d'alimentation ($f_1 = 50 \text{ Hz}$), la profondeur de pénétration du courant est alors faible (ce qu'on appelle effet refoulement du courant), les courants induits circulent dans la partie superficielle des barres, d'où une forte résistance de cage au démarrage. Avec l'augmentation de la vitesse de rotation, le glissement diminue et par conséquent, la fréquence du champ ($f_2 = g \cdot f_1$), donc la profondeur de pénétration augmente et la résistance de la cage diminue.

a)Profondeur de pénétration :

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1+\varphi} \quad [mm] \quad (\text{III.107})$$

Où :

h_b : Hauteur de la barre en [mm]. ($h_b = h_{en_r}$) .

φ : Coefficient qui dépend de la valeur de ξ , il est donné par la courbe de la figure A3 en annexe.

$\xi = 0,064 \cdot h_b \sqrt{g}$ Pour $T = 115 [^\circ\text{C}]$.

Au démarrage : $g_d = 1$

$\xi = 0.064 * 61,4 \cdot \sqrt{1} = 3.929$

La valeur de φ correspondante est : $\varphi = 3$

$$h_{pp} = \frac{61,4}{1+3} = 15.35 \quad [mm]$$

b) Largeur de la barre pénétrée par le courant de démarrage :

Elle est donnée par :

$$b_{pp} = \left(h_{pp} - \frac{b_{en_r}}{2} \right) - b_{en_r} \quad [mm] \quad (\text{III.108})$$

$$b_{pp} = \left(15,35 - \frac{8.0925}{2} \right) - 8.0925 = 3.211 \quad [mm]$$

c) Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage :

Elle est calculée comme suit :

$$S_{b\ dem} = S_{en_r} - S_{non\ pén} \quad [mm^2] \quad (III.109)$$

Avec :

$S_{non\ pén}$: Surface de la barre non pénétrée par le courant de démarrage, elle est calculée comme suit :

$$S_{non\ pén} = [b_{en_r} - b_{pp}] \cdot [h_{en_r} - h_{pp}] \quad [mm^2] \quad (III.110)$$

$$S_{non\ pén} = (61.4 - 15.35) \cdot (8.0925 - 3.211) = 224.77 \quad [mm^2]$$

$$S_{b\ dem} = 496.879 - 224.77 = 272.11 \quad [mm^2]$$

d) Résistance de la barre au démarrage :

Pour le type d'encoche utilisée elle s'exprime comme suit :

$$R_{b\ dem} = R_b \cdot K_{dep} \quad [\Omega] \quad [1] \quad (III.111)$$

Avec :

K_{dep} : Coefficient de déplacement du courant, c'est le rapport entre la section totale de la barre et la section barre parcourue par le courant de démarrage :

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{b\ dem}} \quad (III.112)$$

$$K_{dep} = \frac{496.879}{272.11} = 1.826$$

$$R_{b\ dem} = 4,2794 \cdot 10^{-5} \cdot 1,826 = 7,814 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega]$$

e) Résistance de la cage au démarrage :

Elle est donnée comme suit :

$$R_{r\ dem} = R_{bague}'' + R_{b\ dem} \quad [\Omega] \quad (III.113)$$

$$R_{r\ dem} = 6,4653 \cdot 10^{-6} + 7,814 \cdot 10^{-5} = 8,4605 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega]$$

$$R_{r\ dem} = 8,4605 \cdot 10^{-5} \quad [\Omega]$$

f) Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator :

Elle est donnée par :

$$R_{r\ dem}' = K_{red1} \cdot R_{r\ dem} \quad [\Omega] \quad (III.114)$$

$$R_{r\ dem}' = 9312,239 * 8,4605 * 10^{-5} = 0,787 \quad [\Omega]$$

g) Réactance de fuite au démarrage :

Pour le type d'encoche utilisé on a :

$$X_{r\ dem} = 7,9 \cdot f \cdot l_a \cdot \lambda_{2\ dem} \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (III.115)$$

$\lambda_{2\ dem}$: Perméance de dispersion du rotor au démarrage, elle est exprimée comme suit :

$$\lambda_{2\ dem} = \lambda_{en\ dem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (III.116)$$

Seule la perméance d'encoche est affectée par l'effet de refoulement du courant. Elle est exprimée comme suit :

$$\lambda_{en\ dem} = C_\lambda + \left[\frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right] \quad (III.117)$$

$$C_\lambda = \psi \cdot \left[\left(\frac{h_{enr} + 0,4 \cdot b_{enr}}{3 \cdot b_{enr}} \right) \cdot \left(\frac{1 - \pi \cdot b_{enr}}{8 \cdot S_b} \right)^2 + 0,66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot b_{enr}} \right) \right] \quad (III.118)$$

$\psi = f(\xi)$, donné sur la courbe A3 en annexe, pour $\xi = 3.929$, $\psi = 0,4$

$$C_\lambda = 0,4 \cdot \left[\left(\frac{61,4 + 0,4 \cdot 10,97}{3 \cdot 10,97} \right) \cdot \left(\frac{1 - 3,14 \cdot 10,97}{8 \cdot 496,879} \right)^2 + 0,66 - \left(\frac{4}{2 \cdot 10,97} \right) \right] = 0,191$$

$$\lambda_{en\ dem} = 0,191 + \left(\frac{2}{3,5} \right) = 0,7625$$

$$\lambda_{2\ dem} = 0,7625 + 0,192 + 0,331 + 0,195 = 1,4805$$

$$X_{r\ dem} = 7,9 * 50 * 998,3 * 1,4805 * 10^{-9} = 5,838 * 10^{-4} \quad [\Omega]$$

h) Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator :

Elle se calcul comme suit :

$$X_{r\ dem}' = K_{red1} \cdot X_{r\ dem} \quad [1] \quad (III.119)$$

$$X_{r\ dem}' = 9312,239 * 5,838 * 10^{-4} = 5,436 \quad [\Omega]$$

Conclusion

Le calcul des paramètres du circuit équivalent nous permettra d'évaluer les pertes afin de déterminer la résistance de magnétisation, le rendement et les performances du moteur.

➤ Formules et résultats du calcul de la longueur active du moteur

paramètres	Formule	Résulta de calcul
Puissance électromagnétique	$P_i = k_E * \frac{P_n}{\cos \varphi * \eta}$	$P_i = 3057,608 \text{ [kW]}$
coefficient d'enroulement	$K_{en} = k_d * k_r$	$K_{en} = 0,923$
La vitesse de rotation	$n = \frac{60 * f}{p}$	$n = 1500 \text{ [tr/mn]}$
La charge linéaire	$A = [483 \div 2160] \cdot 10^2 \text{ [A/m]}$	$A = 985 \cdot 10^2 \text{ [A/m]}$
Valeur maximale de l'induction dans l'entrefer	$\beta_\delta = [0,82 \div 0,9] \text{ [T]}$	$\beta_\delta = 0,9 \text{ [T]}$
La longueur active	$l_a = \frac{6.1 * 10^{12} * P_i}{\alpha_i * k_f * K_{en} * D^2 * A * \beta_\delta * n}$	$l_a = 998,3 \text{ [mm]}$
Coefficient de longueur	$\lambda = \frac{l_a}{D}$	$\lambda = 2,146$

➤ Formules et résultats de calcul des dimensions des feuilles statorique et rotorique

La hauteur de culasse statorique	$h_{cs} = \frac{0,5 * \alpha_i * \tau_s * \beta_\delta}{k_{fer} * \beta_{c1}}$	$h_{cs} = 73,77 \text{ [mm]}$
Induction de crête dans la culasse statorique	$\beta_{c1} = [1,5 \div 1,65] \text{ [T]}$	$\beta_{c1} = 1,5 \text{ [T]}$
La hauteur de la dent statorique	$h_{zs} = 0,5 * (D_m - D) - h_{cs}$	$h_{zs} = 89,73 \text{ [mm]}$
La largeur minimale de la dent statorique	$b_{zsmin} = \frac{t_{smin} * \beta_\delta}{K_{fer} * \beta_{zsmax}}$	$b_{zsmin} = 9,87563 \text{ [mm]}$
Hauteur de la fonte de l'encoche statorique	-----	$h_{fs} = 3,4 \text{ [mm]}$
Hauteur de la clavette d'encoche statorique	-----	$h_{ks} = 3,2 \text{ [mm]}$
Induction maximale dans la dent statorique	$\beta_{zsmax} = [1,75 \div 2] \text{ [T]}$	$\beta_{zsmax} = 2 \text{ [T]}$
Pas dentaire minimal au stator	$t_{smin} = \frac{\pi(D + 2 \cdot h_{fs} + 2h_{ks})}{Z_s}$	$t_{smin} = 20,85 \text{ [mm]}$
La largeur de l'encoche	$b_{ens} = t_{smin} - b_{zsmin}$	$b_{ens} = 10,97 \text{ [mm]}$
Pas dentaire maximal au stator	$t_{smax} = \frac{\pi(D + 2 \cdot h_{zs})}{Z_s}$	$t_{smax} = 28,105 \text{ [mm]}$
La largeur maximale de la dent statorique	$b_{zsmax} = t_{smax} - b_{ens}$	$b_{zsmax} = 17,135 \text{ [mm]}$
La hauteur de l'encoche statorique	$h_{ens} = h_{zs} - h_{fs} - h_{ks}$	$h_{ens} = 83,13 \text{ [mm]}$

La surface transversale occupée par l'isolation	$S_{en\ iso} = \mu_{iso} * \delta$	$S_{en\ iso} = 376,4 \text{ [mm}^2\text{]}$
La surface de l'encoche statorique	$S_{en_s} = (h_{ens} * b_{ens}) - S_{en\ iso}$	$S_{en_s} = 535,5361 \text{ [mm}^2\text{]}$
Hauteur du dos rotorique	$h_{c_r} = \frac{0,5 * \alpha_r * \tau_r * \beta_\delta}{k_{fer} * \beta_{c_r}}$	$h_{c_r} = 85,10 \text{ [mm]}$
Induction admissible dans le dos rotorique	$\beta_{c_r} = [1,15 \div 1,25] \text{ [T]}$	$\beta_{c_r} = 1,25 \text{ [T]}$
hauteur de la dent rotorique	$h_{z_r} = 0,5(D_r - d_{ar}) - h_{c_r}$	$h_{z_r} = 63,10 \text{ [mm]}$
pas dentaire minimal au rotor	$t_{rmin} = \frac{\pi(D_r - 2 \cdot h_{z_r})}{Z_r}$	$t_{rmin} = 15,739 \text{ [mm]}$
la largeur minimale de la dent du rotor	$b_{z_{rmin}} = \frac{t_{rmin} \cdot \beta_\delta}{k_{fer} * \beta_{z_{rmax}}}$	$b_{z_{rmin}} = 7,646 \text{ [mm]}$
la largeur de l'encoche rotorique	$b_{en_r} = t_{rmin} - b_{z_{rmin}}$	$b_{en_r} = 8,0925 \text{ [mm]}$
pas dentaire maximal au rotor	$t_{rmax} = \frac{\pi(D_r - 2 \cdot h_{f_r})}{Z_r}$	$t_{rmax} = 21,734 \text{ [mm]}$
La largeur maximale de la dent rotorique	$b_{z_{rmax}} = t_{rmax} - b_{en_r}$	$b_{z_{rmax}} = 13,642 \text{ [mm]}$
Hauteur de la fonte rotorique	-----	$h_{f_r} = 2 \text{ [mm]}$
La hauteur de l'encoche rotorique	$h_{en_r} = h_{z_r} - h_{f_r}$	$h_{en_r} = 61,4 \text{ [mm]}$
La surface de l'encoche rotorique	$S_{en_r} = h_{en_r} * b_{en_r}$	$S_{en_r} = 496,879 \text{ [mm}^2\text{]}$

➤ Calcul de la bague de court-circuit

La section de la bague	$S_{bague} = K_{bague} * \frac{Z_r * S_{barre}}{2p}$	$S_{bague} = 3180,02 \text{ [mm}^2\text{]}$
La hauteur de la bague	$h_{bague} = 1,1 * h_{z_r}$	$h_{bague} = 69,41 \text{ [mm]}$
La largeur de la bague rotorique	$b_{bague} = \frac{S_{bague}}{h_{bague}}$	$b_{bague} = 45,815 \text{ [mm]}$
Le diamètre moyen de la bague	$D_{bague\ moy} = D_r - h_{bague}$	$D_{bague\ moy} = 377,59 \text{ [mm]}$
Le courant dans la barre rotorique	$I_r = 1.11 * I_{1n} * \frac{6 * W_s * K_{en}}{Z_r} * \cos \varphi$	$I_r = 3287,204 \text{ [A]}$
la densité du courant dans la barre	$J_{barre} = \frac{I_r}{S_{barre}}$	$J_{barre} = 6.995 \text{ [A/mm}^2\text{]}$
courant dans la bague de court-circuitage	$I_{bague} = \frac{I_r}{K_{red}}$	$I_{bague} = 16722,605 \text{ [A]}$
densité du courant dans la bague	$J_{bague} = \frac{I_{bague}}{S_{bague}}$	$J_{bague} = 5,258 \text{ [A/mm}^2\text{]}$

➤ Calcul de l'enroulement statorique :

Le courant dans une phase du stator	$I_1 = \frac{P_n * 10^3}{m * U_n * \cos \varphi * \eta}$	$I_1 = 191.04 \text{ [A]}$
Nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche	$N_{eff} = \frac{\tau_d * A * a_1 * 10^{-3}}{I_1}$	$N_{eff} = 20$
Nombre de spires d'une branche parallèle d'une phase statorique	$W_s = \frac{p * q * N_{eff}}{a_1}$	$W_s = 120.$
La densité de courant dans l'enroulement statorique	$J_s = [1.5 \div 15] \text{ [A/mm}^2\text{]}$	$J_s = 10,364 \text{ [A/mm}^2\text{]}$
La section d'un conducteur	$S_{cu} = \frac{I_1}{J_s * a_1}$	$S_{cu} = 9,216 \text{ [mm}^2\text{]}$
Le coefficient de remplissage	$K_{rem} = \frac{N_{elt} * S_{cu_{iso}}}{S_{en}}$	$K_{rem} = 0,716$

Formule et résultats de calcul des vérifications des charges magnétiques

La charge linéaire	$A = \frac{I_1 * W_s * Z_s}{\pi * D * a_1 * 10^{-3}}$	$A = 986 * 10^2 \text{ [A/m]}$
Force électromotrice dans l'entrefer	$E_1 = \frac{P_i}{m * I_1 * 10^{-3}}$	$E_1 = 5335,022 \text{ [V]}$
Le flux sous un pôle	$\Phi = \frac{E_1}{4 * k_f * f * W * K_{en}}$	$\Phi = 0,219$
L'induction magnétique dans l'entrefer	$\beta_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i * \tau * l_a * 10^{-6}}$	$\beta_\delta = 0.939$

➤ Calcul des forces magnétomotrices

Force magnétomotrice de la culasse statorique	$F_{c_s} = H_{c_s} \cdot l_{c_s} \cdot 10^{-3}$	$F_{c_s} = 426,66 \quad [A]$
Force magnétomotrice dans la dent du stator	$F_{Z_s} = H_{Z_s \text{ moy}} \cdot h_{Z_s} \cdot 10^{-3}$	$F_{Z_s} = 176,184 \quad [A]$
Intensité du champ magnétique moyen de la dent statorique	$H_{Z_s \text{ moy}} = (H_{Z_s \text{ max}} + 4 \cdot H_{Z_s \text{ moy}} + H_{Z_s \text{ min}}) / 6$	$H_{Z_s \text{ moy}} = 1963,5 \quad [A/m]$
Force magnétomotrice dans l'entrefer	$F_\delta = 0,8 \cdot \beta_\delta \cdot K_\delta \cdot \delta \cdot 10^3$	$F_\delta = 6719,112 \quad [A]$
Force magnétomotrice dans la culasse du rotor	$F_{c_r} = H_{c_r} \cdot l_{c_r} \cdot 10^{-3}$	$F_{c_r} = 78,065 \quad [A]$
Force magnétomotrice dans les dents rotoriques	$F_{Z_r} = H_{Z_r \text{ moy}} \cdot l_{Z_r}$	$F_{Z_r} = 102,285 \quad [A]$
Intensité du champ magnétique moyen dans la dent rotorique	$H_{Z_r \text{ moy}} = \frac{(H_{Z_r \text{ max}} + 4 \cdot H_{Z_r \text{ moy}} + H_{Z_r \text{ min}})}{6}$	$H_{Z_r \text{ moy}} = 810,5 \quad [A/m]$
Force magnétomotrice totale par paire de pôles	$F = \sum F_i = 2(F_\delta + F_{Z_s} + F_{Z_r}) + F_{c_s} + F_{c_r}$	$F = 14397,601 \quad [A]$
coefficient de saturation de la machine	$K_y = \frac{\sum F_i}{2 \cdot F_\delta}$	$K_y = 1,07139$
coefficient de saturation des dents	$K_{yz} = \frac{F_\delta + F_{Z_s} + F_{Z_r}}{F_\delta}$	$K_{yz} = 1,0338$
courant de magnétisation du moteur	$I_y = \frac{p \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_s \cdot K_{en}}$	$I_y = 96,288$
réactance de magnétisation	$X_m = \frac{K_e \cdot U_1}{I_y}$	$X_m = 55,4065 \quad [\Omega]$
coefficient de dispersion magnétique de l'enroulement statorique	$b_y = \frac{X_s}{X_m}$	$b_y = 0,0773$
la force magnétomotrice à vide	$E_0 = \frac{E_1}{1 + b_y}$	$E_0 = 4952,215[V]$

➤ Formules et résultats de calcul des paramètres du schéma électrique équivalent

Résistance active d'une phase statorique	$R_s = \rho_{cu(T)} \cdot \frac{W_s \cdot l_w \cdot 10^3}{a_1 \cdot N_{elt} \cdot q_{elt}}$	$R_s = * 0.4897 \quad [\Omega]$
Réactance de dispersion d'une phase statorique	$X_s = \frac{1,58 \cdot f_s \cdot l_a \cdot W_s^2}{p \cdot q \cdot 10^8} \cdot \lambda_s$	$X_s = 4,238 \quad [\Omega]$
Résistance active de la barre rotorique	$R_b = \rho_{cu(T)} \cdot \frac{l_a}{S_b} k_{PP} \cdot 10^3$	$R_b = 4,2794 * 10^{-5} \quad [\Omega]$
Résistance de la bague	$R_{bague} = \frac{\rho_{cu(T)} \cdot 2\pi \cdot D_{bague \text{ moy}} \cdot 10^3}{Z_r \cdot S_{bague}}$	$R_{bague} = 2.4837 * 10^{-7} \quad [\Omega]$
Résistance de la bague ramenée à la barre	$R_{bague}'' = \frac{R_{bague}}{(K_{red2})^2}$	$R_{bague}'' = 6,4653 * 10^{-6} \quad [\Omega]$
Résistance d'une phase rotorique	$R_r = R_b + R_{bague}''$	$R_r = 4,9259 * 10^{-5} \quad [\Omega]$
Résistance de la cage ramenée au stator	$R_r' = K_{red1} (R_b + R_{bague}'')$	$R_r' = 0,4587 \quad [\Omega]$
Réactance du rotor	$X_r = 7,9 \cdot f \cdot l_a \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9}$	$X_r = 6,8968 * 10^{-4} \quad [\Omega]$
Réactance de fuite rotorique ramenée au stator	$X_r' = K_{red1} \cdot X_r$	$X_r' = 6,422 \quad [\Omega]$
Résistance de la barre au démarrage	$R_{b \text{ dem}} = R_b \cdot K_{dep}$	$R_{b \text{ dem}} = 7,814 * 10^{-5} \quad [\Omega]$
Résistance de la cage au démarrage	$R_{r \text{ dem}} = R_{bague}'' + R_{b \text{ dem}}$	$R_{r \text{ dem}} = 8,4605 * 10^{-5} \quad [\Omega]$
Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator	$R_{r \text{ dem}}' = K_{red1} \cdot R_{r \text{ dem}}$	$R_{r \text{ dem}}' = 0,787 \quad [\Omega]$
Réactance de fuite au démarrage	$X_{r \text{ dem}} = 7,9 \cdot f \cdot l_a \cdot \lambda_{2 \text{ dem}} \cdot 10^{-9}$	$X_{r \text{ dem}} = 5,838 * 10^{-4} \quad [\Omega]$
Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator	$X_{r \text{ dem}}' = K_{red1} \cdot X_{r \text{ dem}}$	$X_{r \text{ dem}}' = 5,436 \quad [\Omega]$

Introduction

La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique dans les machines électriques est toujours accompagnée par des pertes dans les différentes parties de celles-ci :

- Le circuit magnétique : pertes fer
- Les enroulements statoriques et rotorique : pertes joule
- Les différentes parties mécaniques : pertes mécaniques et par frottement.

Cette partie est consacrée à l'évaluation de ces pertes, et cela pour permettre d'estimer le rendement en sachant de l'avoir le plus proche possible de celui figurant dans le cahier des charges et l'échauffement pour pouvoir choisir les isolations qui présente une bonne résistance thermique, ainsi que de faire le bon choix du système de ventilation.

IV.1. Les pertes électriques dans les enroulements statoriques et rotoriques

Ce sont les pertes par effet joule dissipées dans les enroulements, elles sont proportionnelles aux carrés des courants statoriques et rotoriques.

IV.1.1. Les pertes électriques statoriques

Les pertes joules statoriques sont les pertes dans le cuivre, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{J_s} = m_1 \cdot R_s \cdot I_{1n}^2 \quad [W] \quad [1] \quad (IV.1)$$

Avec :

R_s : Résistance d'une phase statorique $[\Omega]$

I_{1n} : Courant nominal dans une phase statorique $[A]$

$$P_{J_s} = 3 * 0,4897 * (310^2) = 1411914,426 \quad [W]$$

$$P_{J_s} = 99521,16 \quad [W]$$

IV.1-2. Les pertes électriques dans la cage rotorique

Ce sont les pertes dans le cuivre, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{J_r} = m_2 \cdot R_r \cdot I_2^2 \quad [W] \quad (IV.2)$$

Avec :

m_2 : Nombre de phases rotoriques ($m_2 = Z_r$).

I_2 : Courant dans la barre rotorique [A]

R_r : Résistance d'une phase rotorique [Ω]

$$P_{J_r} = 64 * 4,2794 * 10^{-5} * (3287,204)^2 = 34716,585 \text{ [W]}$$

$$P_{J_r} = 34716,585 \text{ [W]}$$

IV.1.3. Les pertes magnétiques principales

Elles sont dues à la variation périodique du champ magnétique, elles sont localisées au niveau des armatures statoriques.

IV.1.3-1. Pertes magnétiques dans la culasse statorique

Ce sont les pertes qui surviennent dans le dos du stator, elles sont exprimées par la relation suivante :

$$P_{mc_1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot G_{c_1} \cdot \beta_{c_1}^2 \text{ [W]} \quad [1] \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

G_{c_1} : Poids de la culasse statorique en [Kg], donné par la formule suivante :

$$G_{c_1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot l_a \cdot K_{fer} \cdot h_{c_s} \cdot \pi \cdot (D_{ext} - h_{c_s}) \text{ [Kg]} \quad [1] \quad (\text{IV.4})$$

$$G_{c_1} = 7,8 * 10^{-6} * 998,3 * 0,95 * 73,77 * 3,14 * (1119 - 73,77)$$

$$G_{c_1} = 1791,02 \text{ [Kg]}$$

$$P_{1/50} : \text{Les pertes spécifiques ; } P_{1/50} = 2.5 \text{ [W/Kg]}$$

$$\beta_{c_1} : \text{L'induction dans la culasse statorique [T]}$$

$$P_{mc_1} = 1,7 * 2,5 * 1791,02 * (1,5^2) = 11768,57 \text{ [W]}$$

$$P_{mc_1} = 17126,628 \text{ [W]}$$

IV-1.3.2. Les pertes magnétiques dans les dents statoriques

Ces pertes sont dues aux harmoniques dans les dents statoriques, elles sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique dans les dents et sont donnée par la formule suivante :

$$P_{m_{z1}} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot \beta_d^2 \cdot G_{z1} \text{ [W]} \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

G_{Z1} : Poids des dents statoriques en [Kg], donné par la formule suivante :

$$G_{Z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot l_a \cdot K_{fer} \cdot [h_{Zs} \cdot \pi(D + h_{Zs}) - S_{ens} \cdot Z_s] \quad [Kg] \quad (IV.6)$$

$$G_{Z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot 998,3 \cdot 0,95 \cdot [89,73 \cdot 3,14 \cdot (465 + 89,73) - 535,5361 \cdot 72]$$

$$G_{Z1} = 870,953 \quad [Kg]$$

β_d : L'induction dans les dents statoriques [T]

$$P_{m_{Z1}} = 1,7 \cdot 2,5 \cdot 870,953 \cdot (1,885)^2 = 13152,455 \quad [W]$$

$$P_{m_{Z1}} = 13152,455 \quad [W]$$

Les pertes magnétiques principales sont données par la somme des pertes dans la culasse et dans les dents statoriques.

$$P_m = P_{mc1} + P_{m_{Z1}} \quad [W] \quad [1] \quad (IV.7)$$

$$P_m = 17126,628 + 13152,455 = 30279,083 \quad [W]$$

$$P_m = 30279,083 \quad [W]$$

IV.1.4. Les pertes mécaniques

Elles dépendent de la vitesse du moteur, elles se composent de pertes par frottements aux paliers, et de pertes par ventilation et frottements avec l'air. Elles sont exprimées par :

$$p_{mec} = K_t \cdot [n_1 \cdot 10^{-3}]^2 \cdot [D_{ext} \cdot 10^{-2}]^4 \quad [W] \quad [1] \quad (IV.8)$$

Avec :

K_t : Coefficient multiplicateur, donné en fonction de nombre de paires de pôles :

$$\text{➤ } K_t = 1,3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3}) \quad \text{Pour } 2P = 2.$$

$$\text{➤ } K_t = 1 \quad \text{Pour } 2P > 2.$$

n_1 : Vitesse de rotation du moteur en [tr/mn].

$$p_{mec} = 1 \cdot [1481 \cdot 10^{-3}]^2 \cdot [1119 \cdot 10^{-2}]^4 = 34391,34 \quad [W]$$

$$p_{mec} = 34391,34 \quad [W]$$

IV.1.5. Les pertes supplémentaires :

Elles ont pour origine le champ de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines, on les estime à 5% de la puissance absorbée par le moteur. Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{sup} = \frac{0,005 \cdot P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad [W] \quad [1] \quad (IV.9)$$

$$P_{sup} = \frac{0,005 \cdot 2610 \cdot 10^3}{0.9} = 14500 \quad [W]$$

IV.1.6. Les pertes totales :

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{tot} = P_m + P_{Js} + P_{Jr} + p_{mec} + P_{sup} \quad [W] \quad [1] \quad (IV.10)$$

$$P_{tot} = 30279,083 + 141191,4264 + 34716,585 + 34391,34 + 14500.$$

$$P_{tot} = 255078,4344 \quad [W]$$

IV.1.7. Le rendement de la machine

Le rendement est donné par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}} \quad [1] \quad (IV.11)$$

$$\eta = \frac{2610 \cdot 10^3}{2610 \cdot 10^3 + 255078,4344} = 0,91$$

IV.1.8. Calcul de la résistance de magnétisation

La puissance absorbée à vide correspond aux pertes fer et mécanique, alors le courant actif à vide qui correspond à ces pertes sera exprimé comme suit :

$$I_{0a} = \frac{P_m + P_{mec} + P_{0a}}{m_1 \cdot U_1} \quad [A] \quad [1] \quad (IV.12)$$

$$R_m = \frac{X_m \cdot I_y}{I_{0a}} \quad [\Omega] \quad (\text{IV. 13})$$

$$P_{oa} = m_1 \cdot R_s \cdot (I_y)^2 \quad [W] \quad (\text{IV. 14})$$

I_y : Courant magnétisant.

X_m : Réactance de magnétisation.

$$I_{0a} = \frac{30279,083 + 34391,34 + 3 \cdot 0,4897 \cdot (96,972)^2}{3 \cdot 5500} = 4,756 \quad [A]$$

$$R_m = \frac{55,0158 \cdot 96,972}{4,756} = 1121,57 \quad [\Omega]$$

$$R_m = 1121,57 \quad [\Omega]$$

IV.2. Calcul des performances du moteur :

Dans cette partie nous étudierons les performances du moteur, en utilisant une méthode analytique se basant sur le schéma équivalent de la machine asynchrone. Il existe plusieurs schémas équivalents de la machine asynchrone qui sont analogue à celui d'un transformateur :

- schéma réel de distribution du circuit primaire et du circuit secondaire.
- schéma physique équivalent ramené au rotor immobile.
- schéma équivalent d'une machine asynchrone considéré comme un transformateur (schéma équivalent en T).
- schéma équivalent d'une machine asynchrone avec circuit magnétique rapporté aux bornes du réseau (schéma équivalent en L). Dans notre étude nous utiliserons le schéma équivalent en L car c'est avec celui-ci qu'on a plus de commodité pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement du moteur.

IV.2.1. Schéma équivalent en L du moteur :

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator :

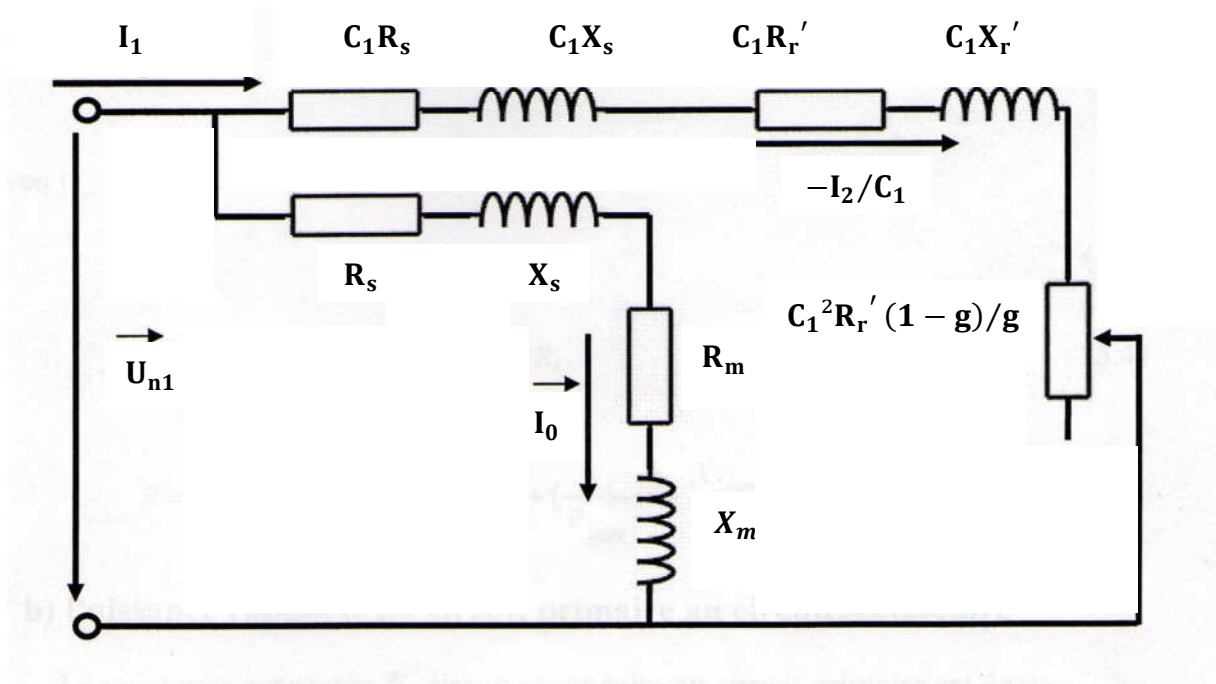


Figure (IV.1) : Schéma équivalent en L d'un moteur asynchrone

Avec :

R_s : Résistance statorique en $[\Omega]$

X_s : Réactance de fuite du stator en $[\Omega]$

X_r' : Réactance de fuite du rotor ramenée au stator en $[\Omega]$

R_r' : Résistance rotorique ramenée au stator en $[\Omega]$

R_m : Résistance de magnétisation en $[\Omega]$

X_m : Réactance de magnétisation en $[\Omega]$

C_1 : Constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L.

Elle est donnée par :

$$C_1 \approx 1 + \frac{X_s}{X_m} \quad [1] \quad (IV.15)$$

$$C_1 \approx 1 + \frac{4,238}{55,4065} \approx 1,077$$

IV.2.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur

En se référant à la figure 3, on détermine :

a) Le glissement :

$$g = \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_r' \cdot B}}{B} \quad [1] \quad (IV.16)$$

Avec

$$B = 2 \cdot A + R_r' \quad [1] \quad (IV.17)$$

$$A = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot P_2'} - R_s \quad [1] \quad (IV.18)$$

$$R_r' = R_r' \cdot \left[\left[\frac{R_s}{R_r'} \cdot \left(1 + \frac{X_r'}{X_m} \right) \right]^2 + \left[\frac{X_s}{R_r'} \left(1 + \frac{X_r'}{X_m} \right) + \left(\frac{X_r'}{R_r'} \right) \right]^2 \right] \quad [\Omega] \quad (IV.19)$$

$$R_r' = 0,4587 * \left[\left[\frac{0,4897}{0,4587} \left(1 + \frac{6,422}{55,4065} \right) \right]^2 + \left[\frac{4,238}{0,4587} \left(1 + \frac{6,422}{55,4065} \right) + \frac{6,422}{0,4587} \right]^2 \right]$$

$$R_r' = 271,877 \quad [\Omega]$$

P_2' : La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire, elle est donnée par :

$$P_2' = P_u + P_{sup} + P_{mec} \quad [W] \quad [1] \quad (IV.20)$$

P_u : Puissance utile, calculée comme suit

$$P_u = P_1 - P_{tot} \quad [W] \quad [1] \quad (IV.21)$$

P_1 : Puissance absorbée par le moteur, calculée comme suit:

$$P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_{1n} \cos \varphi \quad [W] \quad [1] \quad (IV.22)$$

$$P_1 = 3 * \frac{5500}{\sqrt{3}} * 310 * 0,92 = 2716894,897 \quad [W]$$

$$P_u = 2716894,897 - 255078,4344 = 2279360,295 \quad [W]$$

$$P_2' = 2279360,295 + 14500 + 34391,34 = 2328251,635 \quad [W]$$

$$A = \frac{3 \cdot (5500)^2}{2 * 2328251,635} - 0,4897 = 18,99$$

$$B = 2 * 18,99 + 271,877 = 309,875$$

$$g = \frac{18,99 - \sqrt{(18,99)^2 - (1,077)^2 * 0,4587 * 309,875}}{309,875} = 0.016$$

$$g = 0.016$$

b) Impédance équivalente :

Elle est exprimée comme suit :

$$Z_{req} = \sqrt{R_{req}^2 + X_{req}^2} \quad [\Omega] \quad [1] \quad (IV.23)$$

Avec :

$$R_{req} = C_1 \cdot R_s + C_1^2 \cdot R_r' / g \quad [\Omega] \quad (IV.24)$$

$$X_{req} = C_1 \cdot X_s + C_1^2 \cdot X_r' \quad [\Omega] \quad (IV.25)$$

$$R_{req} = 1,077 * 0,4897 + (1,077)^2 * \frac{0,4587}{0.016} = 33,781 \quad [\Omega]$$

$$X_{req} = 1,077 * 4.238 + (1,077)^2 * 6,422 = 12,013 \quad [\Omega]$$

$$Z_{req} = \sqrt{(33,781)^2 + (12,013)^2} = 35,853 \quad [\Omega]$$

$$Z_{req} = 35,853 \quad [\Omega]$$

C) Calcul du courant au secondaire :

Le courant dans le circuit secondaire est donné par :

$$I_r'' = \frac{U_1}{Z_{req}} \quad [A] \quad (IV.26)$$

$$I_r' = C_1 \cdot I_r'' \quad [A] \quad (IV.27)$$

Avec :

I_r'' : Le courant dans le circuit secondaire transformé en L.

I_r' : Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire.

$$I_r'' = \frac{5500}{35,853} = 153,401 \quad [A]$$

$$I_r' = 1,077 * 153,401 = 165,213 \quad [A]$$

$$I_r' = 165,213 \quad [A]$$

d) Facteur de puissance rotorique :

Le facteur de puissance rotorique est calculé comme suit :

$$\cos \Phi_r = \frac{R_{req}}{Z_{req}} \quad [1] \quad (IV.28)$$

$$\cos \Phi_r = \frac{33,781}{35,853} = 0,94$$

D'où :

➤ Le courant actif :

$$I_{ra}'' = I_r'' \cdot \cos \Phi_r \quad [A] \quad (IV.29)$$

$$I_{ra}'' = 153,401 * 0,94 = 144,196 \quad [A]$$

➤ Le courant réactif :

$$I_{rr}'' = I_r'' \cdot \sin \Phi_r \quad [A] \quad (IV.30)$$

$$I_{rr}'' = 153,401 * 0,336 = 51,144 \quad [A]$$

➤ Le courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joule statorique à vide :

$$I_{0a} = \frac{P_{0a} + P_m}{m_1 \cdot U_1} \quad [A] \quad (IV.31)$$

$$I_{0a} = \frac{13814,7829 + 30279,083}{3 \cdot 5500} = 2,672 \quad [A]$$

➤ **Le courant magnétisant :**

$$I_{0r} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_s \cdot K_{en}} \quad [A] \quad [1] \quad (IV.32)$$

$$I_{0r} = \frac{2 \cdot 14499,887}{0,9 \cdot 3 \cdot 120 \cdot 0,923} = 96,972 \quad [A]$$

➤ **Le courant total à vide :**

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [A] \quad (IV.33)$$

$$I_0 = \sqrt{(2,347)^2 + (96,972)^2} = 97 \quad [A]$$

➤ **Courant absorbé :**

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [A] \quad (IV.34)$$

Avec :

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{ra}'' \quad [A] \quad (IV.35)$$

$$I_{1a} = 2,672 + 144,196 = 146,823 \quad [A]$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I_{rr}'' \quad [A] \quad (IV.36)$$

$$I_{1r} = 96,972 + 56,144 = 153,116 \quad [A]$$

$$I_1 = \sqrt{(146,823)^2 + (153,116)^2} = 212,135 \quad [A]$$

➤ **Le facteur de puissance de la machine est donné par :**

$$\cos \phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad [1] \quad (\text{IV.37})$$

$$\cos \phi_1 = \frac{146,823}{212,135} = 0,72$$

e) Vitesse de rotation du moteur :

Elle est calculée comme suit :

$$n_1 = n. (1 - g) \quad [tr/min] \quad (\text{IV.38})$$

Avec :

n : Vitesse de synchronisme.

g : Glissement

$$n_1 = 1500. (1 - 0.016) = 1476 \quad [tr/min]$$

f) Expression du couple :

➤ **Couple électromagnétique :**

Il est exprimé comme suit :

$$C_{\text{élm}} = \frac{P_{\text{élm}}}{\Omega} \quad [N.m] \quad [1] \quad (\text{IV.39})$$

Avec

$P_{\text{élm}}$: Puissance électromagnétique en [W], elle est exprimée comme suit :

$$P_{\text{élm}} = P_1 - P_{J_s} - P_m \quad [W]$$

$$P_{\text{élm}} = 2716894,894 - 141180,51 - 30279,083 = 2545425,304 \quad [W]$$

Ω : Vitesse angulaire de rotation du champ tournant [**rad/s**], elle est calculée comme suit :

$$\Omega = \frac{2.\pi.n}{60} = \frac{2 * 3,14 * 1500}{60} = 157 \quad [rad/s]$$

$$C_{elm} = \frac{2545425,304}{157} = 16212,963 \quad [N.m]$$

➤ **Couple mécanique :**

Il est donné par la formule suivante :

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{\Omega_1} \quad [N.m] \quad [1] \quad (IV.40)$$

Avec

P_{mec} : Puissance mécanique en [W], calculée comme suit :

$$P_{mec} = P_{elm} - p_{Jr} \quad [W] \quad (IV.41)$$

$$P_{mec} = 2545425,304 - 39024,346 = 2506410,958 \quad [W]$$

Ω_1 : Vitesse angulaire de rotation du moteur en [rad/s].

$$\Omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 * 3,14 * 1481}{60} = 155,01 \quad [rad/s].$$

$$C_{mec} = \frac{2373564,561}{155.01} = 16169,35 \quad [N.m]$$

$$C_{mec} = 16169,35 \quad [N.m]$$

➤ **Le couple utile :**

Il est exprimé comme suit :

$$C_u = C_{mec} - \frac{p_{mec}}{\Omega_1} \quad [N.m] \quad [1] \quad (IV.42)$$

Avec :

p_{mec} : Pertes mécaniques.

$$C_u = 16169,35 - \frac{34391,34}{155.01} = 15947,485 \quad [N.m]$$

$$C_u = 15947,485 \quad [N.m]$$

IV.2.3. Caractéristique mécanique :

C'est la caractéristique donnant le couple en fonction du glissement $C=f(g)$:

L'expression du couple est :

$$C = \frac{P_{\text{élm}}}{\Omega} = \frac{3 \cdot R_r' \cdot (I_r')^2}{g \cdot \Omega} \quad [N.m] \quad [1] \quad (\text{IV.43})$$

On remplace I_r' par son expression et on obtient :

$$C = \frac{3 \cdot R_r' \cdot U_1^2}{\Omega} \cdot \frac{g}{(R_s \cdot g + R_r')^2 + g^2 (X_s^2 + X_r'^2)} \quad [N.m] \quad (\text{IV.44})$$

Si $g = 0$ Alors $C = 0$.

Pour de faibles valeurs de g qui correspondent à la zone normale de fonctionnement, les termes $R_s \cdot g$ et $g^2 (X_s^2 + X_r'^2)$ sont faibles devant R_r' , alors le couple est proportionnel au glissement.

Quant g continus à croître, la caractéristique $C=f(g)$ passe par un maximum puis diminue.

Pour trouver le maximum on cherche la valeur de g qui annule $\frac{dC}{dg}$.

$$g_{C \max} = \frac{R_r'}{\sqrt{R_s^2 + (X_s^2 + X_r'^2)}} \quad (\text{IV.45})$$

Ce qui donne :

$$C_{\max} = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \Omega} \cdot \frac{1}{R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s^2 + X_r'^2)}} \quad [N.m] \quad [1] \quad (\text{IV.46})$$

$$C_{\max} = \frac{3 \cdot (5500)^2}{2 \cdot 157} \cdot \frac{1}{0,4897 + \sqrt{(0,4897)^2 + [(4,238)^2 + (6,896 \cdot 10^{-4})^2]}} \quad [N.m].$$

$$C_{\max} = 60769,323 \quad [N.m]$$

Au démarrage : $g = 1$:

$$C_{dem} = \frac{3 \cdot U_1^2}{\Omega} \cdot \frac{R_r'}{(R_s + R_r')^2 + (X_s^2 + X_r'^2)} \quad [N.m] \quad (IV.47)$$

$$C_{dem} = \frac{3 \cdot (5500)^2}{157} \cdot \frac{0,5254}{(0,4897 + 0,4587)^2 + [(4,238)^2 + (6,422)^2]} = 5052,975 \quad [N.m]$$

IV.2.4. Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge :

a) Résistance équivalente au démarrage :

Elle est exprimée comme suit :

$$R_{eq\ dem} = C_1 \cdot R_s + C_1^2 \cdot R_{r\ dem}' \quad [\Omega] \quad [1] \quad (IV.48)$$

Avec

$R_{r\ dem}'$: Résistance de démarrage rotorique ramenée au stator.

$$R_{eq\ dem} = 1,077 \cdot 0,4897 + (1,077)^2 \cdot 0,787 = 1,44 \quad [\Omega]$$

b) Réactance équivalente au démarrage :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$X_{eq\ dem} = X_{const} + K_x \cdot X_{var} \quad [\Omega] \quad [1] \quad (IV.49)$$

Avec :

K_x : Coefficient qui est donné suivant la forme d'encoche, pour les encoches ouvertes

$$K_x = 0,0825.$$

X_{const} : Réactance de dispersion du moteur qui ne dépend pas de la saturation.

X_{var} : Réactance variable de dispersion du moteur qui dépend de la saturation.

Les réactances X_{const} et X_{var} sont respectivement données par les relations suivantes :

$$X_{const} = C_1 \cdot X_s \cdot \frac{\lambda_s - \lambda_{s\ dem}}{\lambda_s} + C_1^2 \cdot X_{r\ dem}' \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_{2\ var}}{\lambda_2} \quad [\Omega] \quad (IV.50)$$

Avec :

$\lambda_{2\ var}$: Composante variable de la perméance rotorique, elle est donnée par :

$$\lambda_{2\ var} = \lambda_{enc\ var} + \lambda_{2d} \quad (IV.51)$$

Où :

$\lambda_{enc\ var}$: Composante variable de la perméance d'encoche rotorique, pour le type d'encoches utilisées elle est donnée comme suit :

$$\lambda_{enc\ var} = \frac{h_{f2}}{b_{f2}} = \frac{2}{3,5} = 0,571$$

$$\lambda_{2\ var} = 0,571 + 0,192 = 0,763$$

λ_s : Perméance statorique.

$\lambda_{s\ dem}$: Perméance statorique au démarrage, elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{s\ dem} = \lambda_{en\ s\ dem} + \lambda_{s_d} + \lambda_{s_f} \quad (IV.52)$$

$\lambda_{en\ s\ dem}$: Perméance d'encoche statorique qui dépend de la saturation, elle est donnée par :

$$\lambda_{en\ s\ dem} = \left[\frac{3 \cdot h_{Ks}}{b_{ens} + 2 \cdot b_{fs}} + \frac{h_{fs}}{b_{fs}} \right] \cdot K_{\beta 2} \quad (IV.53)$$

$$\lambda_{en\ s\ dem} = \left[\frac{3 \cdot 3,2}{10,97 + 4,97} + \frac{3,4}{4,97} \right] \cdot 0,921 = 1,18$$

$$\lambda_{s\ dem} = 1,183 + 0,331 + 0,675 = 2,189$$

$$X_{const} = 1,077 * 4,238 \cdot \left(\frac{4,479 - 2,189}{4,479} \right) + (1,077)^2 * 5,436 * \left(\frac{1,749 - 0,763}{1,749} \right)$$

$$X_{const} = 5,888 \quad [\Omega]$$

$$X_{var} = C_1 \cdot X_s \cdot \frac{\lambda_{s\ dem}}{\lambda_s} + \frac{C_1^2 \cdot X_r' \cdot \lambda_{2\ var}}{\lambda_2} \quad [\Omega] \quad (IV.54)$$

$$X_{var} = 1,077 * 4,238 \cdot \frac{2,189}{4,479} + \frac{(1,077)^2 * 6,422 * 0,762}{1,749} = 5,476 \quad [\Omega]$$

$$X_{eq\ dem} = 5,888 + 0,0825 * 5,476 = 6,339 \quad [\Omega]$$

$$X_{eq\ dem} = 6,339 \quad [\Omega]$$

c) Capacité de surcharge :

La capacité de surcharge du moteur, c'est le rapport entre le couple maximal et le couple nominal, elle s'exprime comme suit :

$$K = \frac{C_{max}}{C_{nom}} = \frac{\frac{g_{nom}}{g_{cr}} + \frac{g_{cr}}{g_{nom}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}} \quad [1] \quad (IV.55)$$

Avec :

R_{cr} : Résistance critique, calculée comme suit :

$$R_{cr} = 2 \cdot R_s \cdot \frac{g_{cr}}{(R_r' \cdot C_1)} \quad [\Omega] \quad (IV.56)$$

g_{nom} : Glissement nominal.

g_{cr} : Glissement critique, donné par la formule suivante :

$$g_{cr} = \frac{C_1 \cdot R_r'}{(X_s + C_1 \cdot X_r')} \quad (IV.57)$$

Où :

R_r' : Résistance rotorique ramenée au stator.

X_r' : Réactance rotorique ramenée au stator.

$$g_{cr} = \frac{1,077 * 0,4587}{(4,238 + 1,077 * 6,422)} = 0,0442$$

$$R_{cr} = 2 * 0,4897 \cdot \frac{0,0442}{(0,4587 * 1,077)} = 8,7626 \cdot 10^{-2} \quad [\Omega]$$

$$K = \frac{\frac{0,016}{0,0442} + 8,7626 * 10^{-2} + \frac{0,0442}{0,016}}{2 + 8,7626 * 10^{-2}} = 1,538$$

d) Courant de démarrage :

Au démarrage le moteur asynchrone est assimilable à un transformateur dont le secondaire une faible résistance, dans ces conditions le courant de démarrage est très considérable ; il peut atteindre 7 ou 8 fois le courant nominal, sa valeur est donnée par l'expression suivante :

$$I_{1\,dem} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{eq\,dem}^2 + X_{eq\,dem}^2}} \quad [A] \quad [1] \quad (IV.58)$$

$$I_{1\text{ dem}} = \frac{5500}{\sqrt{(1,44)^2 + (6,339)^2}} = 846,088 \quad [A]$$

Conclusion

Le moteur asynchrone avec tous ses avantages présente cependant des inconvénients qui sont reliés à ses caractéristiques de démarrage, notamment le courant absorbé lors du démarrage qui est nettement supérieur au courant nominal et le couple de démarrage qui est inférieur au couple nominal. Donc il faut essayer de minimiser le courant de démarrage et maximiser le couple.

➤ Formules et résultats de calcul des pertes de puissance

Les pertes électriques statoriques	$P_{J_s} = m_1 \cdot R_s \cdot I_{1n}^2$	$P_{J_s} = 99521,16 \quad [W]$
Les pertes électriques dans la cage rotorique	$P_{J_r} = m_2 \cdot R_r \cdot I_2^2$	$P_{J_r} = 34716,585 \quad [W]$
Pertes magnétiques dans la culasse statorique	$P_{mc_1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot G_{c_1} \cdot \beta_{c_1}^2$	$P_{mc_1} = 17126,628 \quad [W]$
Poids de la culasse statorique	$G_{c_1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot l_a \cdot K_{fer} \cdot h_{c_s} \cdot \pi \cdot (D_{ext} - h_{c_s})$	$G_{c_1} = 1791,02 \quad [Kg]$
Les pertes magnétiques dans les dents statoriques	$P_{m_{z1}} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot \beta_d^2 \cdot G_{z1}$	$P_{m_{z1}} = 13152,455 \quad [W]$
Poids des dents statoriques	$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot l_a \cdot K_{fer} \cdot [h_{z_s} \cdot \pi (D + h_{z_s}) - S_{en_s} \cdot Z_s]$	$G_{z1} = 870,953 \quad [Kg]$
Les pertes magnétiques principales	$P_m = P_{mc_1} + P_{m_{z1}}$	$P_m = 30279,083 \quad [W]$
Les pertes mécaniques	$p_{mec} = K_t \cdot [n_1 \cdot 10^{-3}]^2 \cdot [D_{ext} \cdot 10^{-2}]^4$	$p_{mec} = 34391,34 \quad [W]$
Les pertes supplémentaires	$P_{sup} = \frac{0,005 \cdot P_n \cdot 10^3}{\eta_n}$	$P_{sup} = 14500 \quad [W]$
Les pertes totales	$P_{tot} = P_m + P_{J_s} + P_{J_r} + p_{mec} + P_{sup}$	$P_{tot} = 255078,4344 \quad [W]$
Le rendement de la machine	$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}}$	$\eta = 0,91$

➤ Calcul des performances

Paramètre	Formule de calcul	Valeur du paramétré
Constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L	$C_1 \approx 1 + \frac{X_s}{X_m}$	C=1,077
Le glissement	$g = \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_r' \cdot B}}{B}$	$g = 0.016$
La constante B	$B = 2 \cdot A + R'$	B=309,875
La résistance équivalente R'	$R' = R_r' \cdot \left[\left[\frac{R_s}{R_r'} \cdot \left(1 + \frac{X_r'}{X_m} \right) \right]^2 + \left[\frac{X_s}{R_r'} \cdot \left(1 + \frac{X_r'}{X_m} \right) + \left(\frac{X_r'}{R_r'} \right) \right]^2 \right]$	$R' = 271,877 [\Omega]$
La constante A	$A = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot P_2'} - R_s$	$A = 18,99$
La puissance rapportée du secondaire au primaire	$P_2' = P_u + P_{sup} + P_{mec}$	$P_2' = 2328251,635 [W]$
Puissance absorbée par le moteur	$P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_{1n} \cos \varphi$	$P_1 = 2716894,897 [W]$
Impédance équivalente	$Z_{req} = \sqrt{R_{req}^2 + X_{req}^2}$	$Z_{req} = 35,853 \quad [\Omega]$
Résistance équivalente	$R_{req} = C_1 \cdot R_s + C_1^2 \cdot R_r' / g$	$R_{req} = 33,781 \quad [\Omega]$
Réactance équivalente	$X_{req} = C_1 \cdot X_s + C_1^2 \cdot X_r'$	$X_{req} = 12,013 \quad [\Omega]$

Le courant dans le circuit secondaire	$I_r' = C_1 \cdot I_r''$	$I_r' = 165,213 \quad [A]$
Le courant dans le circuit secondaire transformé en L	$I_r'' = \frac{U_1}{Z_{req}}$	$I_r'' = 153,401 \quad [A]$
Le facteur de puissance rotorique	$\cos \Phi_r = \frac{R_{req}}{Z_{req}}$	$\cos \Phi_r = 0,94$
Le courant actif	$I_{ra}'' = I_r'' \cdot \cos \Phi_r$	$I_{ra}'' = 144,196 \quad [A]$
Le courant réactif	$I_{rr}'' = I_r'' \cdot \sin \Phi_r$	$I_{rr}'' = 56,144 [A]$
Le courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joule statorique à vide	$I_{0a} = \frac{P_{oa} + P_m}{m_1 \cdot U_1}$	$I_{0a} = 2,672 \quad [A]$
Le courant magnétisant	$I_{0r} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_s \cdot K_{en}}$	$I_{0r} = 96,972 \quad [A]$
Le courant total à vide	$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$	$I_0 = 97 \quad [A]$
Courant absorbé	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$	$I_1 = 212,135 \quad [A]$
Courant actif absorbé	$I_{1a} = I_{0a} + I_{ra}''$	$I_{1a} = 146,823 \quad [A]$
Courant réactif absorbé	$I_{1r} = I_{0r} + I_{rr}''$	$I_{1r} = 153,116 [A]$
Le facteur de puissance de la machine	$\cos \Phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1}$	$\cos \Phi_1 = 0,72$
Vitesse de rotation du moteur	$n_1 = n \cdot (1 - g)$	$n_1 = 1476 \quad [tr/min]$
Couple électromagnétique	$C_{elm} = \frac{P_{elm}}{\Omega}$	$C_{elm} = 16212,963 [N.m]$
Couple mécanique	$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{\Omega_1}$	$C_{mec} = 16169,35 [N.m]$
Le couple utile	$C_u = C_{mec} - \frac{p_{mec}}{\Omega_1}$	$C_u = 15947,485 \quad [N.m]$
Le couple maximal	$C_{max} = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \Omega} \cdot \frac{1}{R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_s^2 + X_r'^2)}}$	$C_{max} = 60769,323 [N.m]$
Le couple de démarrage	$C_{dem} = \frac{3 \cdot U_1^2}{\Omega} \cdot \frac{R_r'}{(R_s + R_r')^2 + (X_s^2 + X_r'^2)}$	$C_{dem} = 5052,975 \quad [N.m]$
Capacité de surcharge	$K = \frac{C_{max}}{C_{nom}} = \frac{\frac{g_{nom}}{g_{cr}} + \frac{g_{cr}}{g_{nom}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}}$	$K = 1,538$
Courant de démarrage	$I_{1dem} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2}}$	$I_{1dem} = 846,088 [A]$

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce mémoire a porté sur le dimensionnement d'un moteur asynchrone de grande puissance et la mise en œuvre d'un programme de calcul implémenté sous environnement MATLAB.

Pour cela dans un premier temps nous avons entrepris le calcul des diverses grandeurs géométriques globales et locales (détailles d'encoches) et des forces magnétomotrices ceci en adoptant une démarche de calcul hiérarchique qui se base uniquement sur le cahier des charges.

En suite la corrélation entre toutes les grandeurs caractérisant le dimensionnement géométrique et physique est établie à travers une analyse des performances du moteur sur la base de la détermination des paramètres du circuit équivalent et des pertes dans la machine.

La variété des méthodes, la diversité des formules et des coefficients empiriques, la variation de certains paramètres sur des intervalles, rendent pratiquement difficile le calcul optimal des différents grandeurs physiques géométriques ainsi que ces paramètres et performances. C'est pour cette raison que nous avons élaboré un programme de calcul qui donne des résultats satisfaisant dans l'ensemble et qui pourra être utilisé pour toute la gamme des moteurs asynchrone de grandes puissances.

Les résultats obtenus par le calcul manuel et par le programme élaboré sont approximativement identiques, et sont acceptables c'est-à-dire que le moteur calculé répond aux nécessités du cahier des charges, ceci en développant une puissance et un couple suffisant pour entrainer le compresseur à gaz.

Ainsi nous avons répondu au problème du remplacement de la turbine à gaz sans être exhaustif sur la question car il reste encore le calcul thermique, le dimensionnement du circuit de refroidissement et le dimensionnement des protections du moteur.

```

clear all
close all
Pn=2610;
phi=0.92;
rend=0.9;
p=2;
alpha1=2/pi;
Kf=1.1;
Zs=72;
m1=3;
q1=Zs/(2*p*m1);
alpha=(q1*p*360)/Zs;
y=60/(2*p);
tau=Zs/(2*p);
beta=y/tau;
Kd=(sin(pi/(2*3)))/(q1*(sin(pi/(2*3*q1))));
Kr=sin((pi*beta)/2);
Ken=Kd*Kr;
Ai=483*10^2;
Af=2160*10^2;
pas1=20962.5;
n1=((Af-Ai)/pas1)+1;
Betaei=0.82;
Betaef=0.9;
pas2=0.01;
n2=((Betaef-Betaei)/pas2)+1;
f=50;
D=465;
n=60*f/p;
KE=0.98-(5*p*(10^-3));
A=Ai;
Betae=Betaei;
for ii=1:n1
    for jj=1:n2
        Pi=(KE*Pn)/(phi*rend);
        la=(6.1*(10^12)*Pi)/(alpha1*Kf*Ken*(D^2)*Betae*A*n)
        if la>2.5*D
            Betae=Betae+pas2;
            if la>2.5*D
                A=A+pas1;
            else
                break
            end
            A(ii)=A;
            Betae(ii)=Betae;
            la(ii)=la;
        end
    end
end

```



```

end
end
Dext=1119;
Dm=(Dext+D)/2;
taus=(pi*D)/(2*p);
Taus=(pi*D)/Zs;
hfs=3.4;
hKs=3.2;
bfs=4.97;
Kfer=0.95;
tsmin=pi*(D+(2*hfs)+(2*hKs))/Zs;
a1=2;
Un=5500;
I1=(Pn*10^3)/(m1*Un*phi*rend);
Neff=(tau*A*a1*10^-3)/I1;
Ws=(p*q1*Neff)/a1;
muiso=2;
delta=2*muiso;
eiso=1.25;
Jsi=1.5;
Jsf=15;
pas3=1.6875;
n3=((Jsf-Jsi)/pas3)+1;
Betac1i=1.5;
Betac1f=15;
pas4=0.01875;
n4=((Betac1f-Betac1i)/pas4)+1;
BetaZsmaxi=1.75;
BetaZsmaxf=2;
pas5=0.03125;
n5=((BetaZsmaxf-BetaZsmaxi)/pas5)+1;
Js=Jsi;
Betac1=Betac1i;
BetaZsmax=BetaZsmaxi;
for ff=1:n3
    for gg=1:n4
        for vv=1:n5
            hcs=(0.5*alpha1*taus*Betae)/(Kfer*Betac1)
            hZs=(0.5*(Dm-D))-hcs;
            bZsmin=(tsmin*Betae)/(Kfer*BetaZsmax);
            bens=tsmin-bZsmin;
            tsmax=(pi*(D+hZs))/Zs;
            bZsmax=tsmax-bens;
            hens=hZs-hfs-hKs;
            Sensiso=(delta)*(hens+bens)
            Sens=(hens*bens)-Sensiso;
            Scu=I1/(Js*a1);

```

```

Scuiso=1.6648*Scu;
Krem=(Neff*Scuiso)/Sens;
if 0.7<Krem>0.8
    Js=Js+pas3;
    BetaZsmax=BetaZsmax+pas5;
    Betac1=Betac1+pas4;

else
    break
end
hcs(ii)=hcs;
hZs(ii)=hZs;
bZsmin(ii)=bZsmin;
bens(ii)=bens;
tsmax(ii)=tsmax;
bZsmax(ii)=bZsmax;
hens(ii)=hens;
Sensiso(ii)= Sensiso;
Sens(ii)=Sens;
Scu(ii)=Scu;
Scuiso(ii)=Scuiso;
Krem(ii)=Krem;
end
end
end
e=9;
Dr=D-(2*e);
darr=150;
Zr=64;
alphan=2/pi;
taur=(pi*Dr)/(2*p);
hfr=2;
bfr=3.5;
Taur=(pi*Dr)/Zr;
trmax=pi*(Dr-(2*hfr))/Zr;
In=310;
Ir=1.11*In*((6*Ws*Ken)/Zr)*phi;
if (Zr/6)<6
    Kred=2*sin((pi*p)/(2*Zr));
else
    Kred=(pi*p)/Zr;
end
Betacri=1.15;
Betacrf=1.25;
pas6=0.0125;
n6=((Betacrf-Betacri)/pas1)+1;
BetaZrmaxi=1.75;

```

```

BetaZrmaxf=1.95;
pas7=0.025;
n7=((BetaZrmaxf-BetaZrmaxi)/pas7)+1;
Kbaguei=0.35;
Kbaguef=0.45;
pas8=0.025;
n8=((Kbaguef-Kbaguei)/pas3)+1;
  Betacr=Betacri;
BetaZrmax=BetaZrmaxi;
Kbague=Kbaguei;
  for ii=1:n6
    for jj=1:n7
      for kk=1:n8
        Betacr(ii)=Betacri;
        BetaZrmax(ii)=BetaZrmaxi;
        Kbague(ii)=Kbaguei;
        hcr=(0.5*alphan*taur*Betae)/(Kfer*Betacr);
        hZr=(0.5*(Dr-darr))-hcr;
        trmin=(pi*(Dr-(2*hZr)))/Zr;
        bZrmin=(trmin*Betae)/(Kfer*BetaZrmax);
        benr=trmin-bZrmin;
        bZrmax=trmax-benr;
        henr=hZr-hfr;
        Senr=henr*benr;
        Sbage=Kbague*((Zr*Senr)/(2*p));
        hbague=1.1*hZr;
        bbague=Sbage/hbague;
        Dbaguemoy=Dr-hbague;
        Jbarre=Ir/Senr;
        Ibague=Ir/Kred;
        Jbague=Ibague/Sbage;
        hcr(ii)=hcr;
        hZr(ii)=hZr;
        trmin(ii)=trmin;
        bZrmin(ii)=bZrmin;
        benr(ii)=benr;
        bZrmax(ii)=bZrmax;
        henr(ii)=henr;
        Senr(ii)=Senr;
        Sbage(ii)=Sbage;
        hbague(ii)=hbague;
        bbague(ii)=bbague;
        Dbaguemoy(ii)=Dbaguemoy;
        Jbarre(ii)=Jbarre;
        Ibague(ii)=Ibague;
        Jbague(ii)=Jbague;
      end
    end
  end

```

```

end
end
lcs=(pi/(2*p))*(Dext-hcs);

Hcs=520;
Fcs=Hcs*lcs*(10^-3);
HZsmax=3150;
BetaZsmin=(tsmax*Betae)/(Kfer*bZsmax);
HZsmin=777;
HZmoys=(HZsmax+HZsmin)/2;
HZsmoy=(HZsmax+(4*HZmoys)+HZmoys)/6;
FZs=HZsmoy*hZs*(10^-3);
Kes=1+(bfs/(Taus-bfs+((5*tau*e)/bfs)));
Ker=1+(bfr/(Taur-bfr+((5*taur*e)/bfr)));
Ke=Kes*Ker;
Fe=0.8*Betae*Ke*e*(10^3);
lcr=((pi/(2*p))*(Dr-(2*hZr)-hcr))+hcr;
Hcr=289;
Fcr=Hcr*lcr*(10^-3);
HZrmax=2520;
BetaZrmin=(trmax*Betae)/(Kfer*bZrmax);
HZrmin=722;
HZmoyr=(HZrmax+HZrmin)/2;
HZrmoy=(HZrmax+(4*HZmoyr)+HZmoyr)/6;
FZr=HZrmoy*hZr*(10^-3);
F=2*(Fe+FZs+FZr)+Fcs+Fcr;
Ky=F/(2*Fe);
KyZ=(Fe+FZs+FZr)/Fe;
Iy=(p*F)/(0.9*m1*Ws*Ken);
Xm=(Ke*Un)/Iy;
qelt=Scu;
Roucu=24.4*(10^-9);
t1moy=(tsmax+tsmin)/2;
y1moy=y;
b1moy=t1moy*y1moy;
lf1=((1.16+(0.14*p))*b1moy)+15;
lw=2*(la+lf1);
Rs=(Roucu*Ws*lw*(10^3))/(a1*Neff*qelt);
h1=hens-(2*muiso);
h1l=2*muiso;
KB1=0.94;
KB2=0.92;
lendaens=((h1/(3*bens))*KB1)+(((h1l/bens)+((3*hKs)/(bens+(2*bfs)))+(hfs/bfs))*KB2);
Xens=((1.58*f*la*(Ws^2))/(p*q1*(10^8)))*lendaens;
Kfs=1-(((0.033*(bfs^2)))/(e*Taus));
Krr1=0.0052;
Kdd1=1.06896;

```

```

lendasd=((0.9*Taus*((q1*Ken)^2))/(Ke*e))*Kfs*Kdd1*Krr1;
Xsd=((1.58*f*la*(Ws^2))/(p*q1*(10^8)))*lendasd;
lendasf=0.34*(q1/la)*(lf1-(0.64*beta*taus));
Xsf=((1.58*f*la*(Ws^2))/(p*q1*(10^8)))*lendasf;
lendas=lendaens+lendasd+lendasf;
Xs=((1.58*f*la*(Ws^2))/(p*q1*(10^8)))*lendas;
Sb=Senr;
Spp=Sb;
Kpp=Sb/Spp;
Roucur=21.3*(10^-9);
Rb=Roucur*(la/Sb)*Kpp*(10^3);
Rbague=(Roucur*2*pi*Dbaguemoy*(10^3))/(Zr*Sbague);
if Zr/(2*p)<6
    Kred2=2*(sin((pi*p)/Zr));
else
    Kred2=(2*pi*p)/Zr;
end
Rbageram=Rbague/(Kred2^2);
Rr=Rb+Rbageram;
betaob=Taus/Taur;
alphaob=(2*p*pi*betaob)/Zr;
Kob=sin((alphaob*(pi/6.32))/2)/(alphaob/2);
Kred1=((4*m1)/Zr)*((Ws*Ken)^2)/(Kob)^2;
Rrram=Kred1*Rr;
psi=1;
Clenda=psi*(((henr+(0.4*benr))/(3*benr))*(((1-(pi*benr))/(8*Sb))^2)+0.66-(bfs/(2*benr)));
lenda2en=Clenda+(hfr/bfr);
Kdd2=9.15/(100*((Zr/(6*p))^2));
lenda2d=((0.9*Taur*((Zr/(6*p))^2))/(e*Ke))*Kdd2;
lenda2f=((2.3*Dbaguemoy)/(Zr*la*(Kred2^2)))*(log10((4.7*Dbaguemoy)/(2*(hbague+bbague))));
lendaob=(Taur*((betaob)^2))/(9.5*e*Ke*Ky);
lenda2=lenda2en+lenda2d+lenda2f+lendaob;
Xr=7.9*f*la*lenda2*(10^-9);
Xrram=Kred1*Xr;
fi=3;
hb=henr;
hpp=hb/(1+fi);
bpp=(hpp-(benr/2))-benr;
Snonpen=(benr-bpp)*(henr-hpp);
Sbdem=Senr-Snonpen;
Kdep=Sb/Sbdem;
Rbdem=Rb*Kdep;
Rrdem=Rbageram+Rbdem;
Rrdemram=Kred1*Rrdem;
bsi=0.4;

```

```

lendaendem=bsi*(((henr+(0.4*benr))/(3*benr))*(((1-(pi*benr))/(8*Sb))^2))+0.66-
(bfs/(2*benr)));
lenda2dem=lendaendem+lenda2d+lenda2f+lendaob;
Xrdem=7.9*f*la*lenda2dem*(10^-9);
Xrdemram=Kred1*Xrdem;
Pjs=m1*Rs*(ln^2);
m2=Zr;
Pjr=m2*Rr*(lr^2);
Pspec=2.5;
Gc1=7.8*(10^-6)*la*Kfer*hcs*pi*(Dm-hcs);
Pmc1=1.7*Pspec*Gc1*(Betac1^2);
GZ1=7.8*(10^-6)*la*Kfer*((hZs*pi*(D+hZs))-(Sens*Zs));
BetaZs=(BetaZsmax+BetaZsmin)/2;
PmZ1=1.7*Pspec*GZ1*(BetaZs^2);
Pm=Pmc1+PmZ1;
n1=1481;
if 2*p==2
    Kt=1.3*(1-(Dext*(10^-3)));
elseif 2*p>2
    Kt=1;
end
pmec=Kt*((n1*(10^-3))^2)*((Dext*(10^-2))^4);
Psup=(0.005*Pn*(10^3))/rend;
Ptot=Pjs+Pjr+Pm+pmec+Psup;
rendement=(Pn*(10^3))/((Pn*(10^3))+Ptot);
P0a=m1*Rs*(Iy^2);
I0a=(Pm+pmec+P0a)/(m1*Un);
Rm=(Xm*Iy)/I0a;
c1=1+(Xs/Xm);
Vn=Un/(3^(1/2));
P1=3*Vn*ln*phi;
Pu=P1-Ptot;
Prram=Pu+Psup+pmec;
A=((m1*(Un^2))/(2*Prram))-Rs;
R=Rrram*(((Rs/Rrram)*(1+(Xrram/Xm)))^2)+(((Xs/Rrram)*(1+(Xrram/Xm)))+(Xrram/Rrram))^2);
B=(2*A)+R;
g=(A-(((A^2)-((c1^2)*Rrram*B))^(1/2)))/B;
Rreq=(c1*Rs)+((c1^2)*(Rrram/g));
Xreq=(c1*Xs)+((c1^2)*Xrram);
Zreq=(((Rreq)^2)+((Xreq)^2))^(1/2);
IrramL=Un/Zreq;
Irram=c1*IrramL;
cosphir=Rreq/Zreq;
Irram=IrramL*cosphir;
Irram=IrramL*sin(acos(Rreq/Zreq));
Ioa=(P0a+Pm)/(m1*Un);

```

```

Ior=(p*F)/(0.9*m1*Ws*Ken);
Io=((Ioa^2)+(Ior^2))^(1/2);
Ila=Ioa+Irram;
Ilr=Ior+Irram;
Il=((Ila^2)+(Ilr^2))^(1/2);
cosphi1=Ila/Il;
n1=n*(1-g);
Pelm=P1-Pjs-Pm;
omega=(2*pi*n)/60;
Celm=Pelm/omega;
Pmec=Pelm-Pjr;
omega1=(2*pi*n1)/60;
Cmec=Pmec/omega1;
Cu=Cmec-(pmec/omega1);
C=((3*Rrram*(Un^2))/omega)*(g/((((Rs*g)+Rrram)^2)+((g^2)*((Xs^2)+(Xrram^2)))));
gcmax=Rrram/((((Rs^2)+((Xs^2)+(Xr^2))))^(1/2));
Cmax=((3*(Un^2))/(2*omega))*(1/(Rs+((Rs^2)+((Xs^2)+(Xr^2))))^(1/2));
Cdem=((3*(Un^2))/omega)*(Rrram/((((Rs+Rrram)^2)+((Xs^2)+(Xrram^2)))));
Reqdem=(c1*Rs)+((c1^2)*Rrdemram);
Kx=0.0825;
lendaenvar=hfr/bfr;
lenda2var=lendaenvar+lenda2d;
lendaensdem=((3*hKs)/(bens+(2*bfs)))+(hfs/bfs)*KB2;
lendasdem=lendaensdem+lendasd+lendasf;
Xconst=(c1*Xs*((lendas-lendasdem)/lendas))+((c1^2)*Xrdemram*((lenda2-lenda2var)/lenda2));
Xvar=(c1*Xs*(lendasdem/lendas))+((c1^2)*Xrram*lenda2var/lenda2);
Xeqdem=Xconst+(Kx*Xvar);
gcr=(c1*Rrram)/(Xs+(c1*Xrram));
Rcr=2*Rs*(gcr/(Rrram*c1));
K=((g/gcr)+(gcr/g)+Rcr)/(2+Rcr);
Ildem=Un/((((Reqdem^2)+(Xeqdem^2))^(1/2)));

```

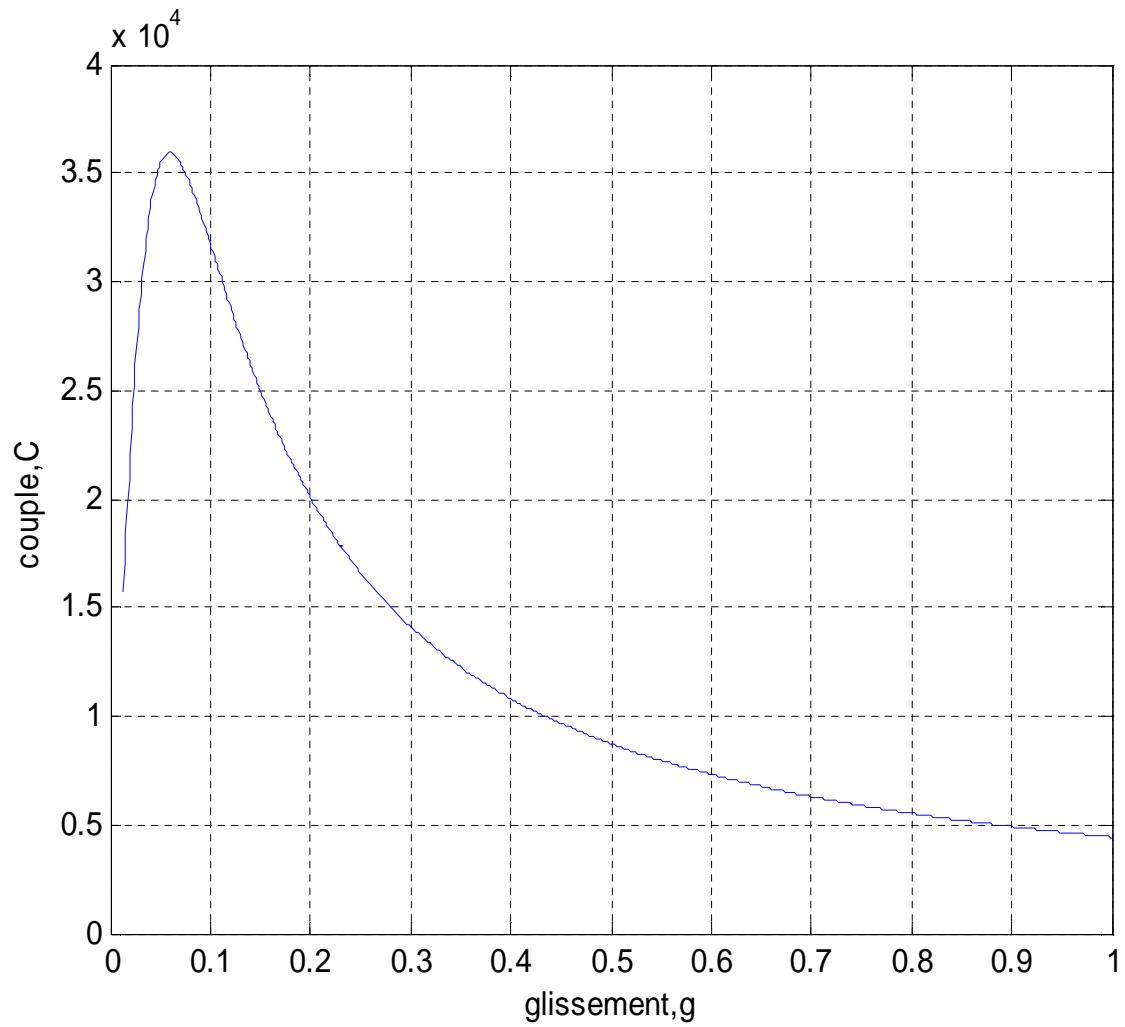



Figure : Courbe du couple en fonction du glissement

Données sur la station boosting du centre de traitement du gaz d'HR SUD

➤ **Compresseur centrifuge à gaz**

Type	BLC306
Puissance	2358 [kW]
Vitesse	13038 [tr/min]
Pression initial du gaz	15,70 [kg/cm ²]
Pression final du gaz	52,9 [kg/cm ²]
Facteur de compression	0,953
Température initiale du gaz	8,2 °c
Température finale du gaz	119,5 °c

➤ **Multiplicateur de vitesse**

Type	TX63/8
Puissance	2610 [kW]
Facteur de service	1,6
Vitesse	1488 [tr/min]
Vitesse de sortie	13045 [tr/min]
Rapport des vitesses	8,77
Ligne grande vitesse	Z = 3
Poids de ligne de grande vitesse	30,1 [kg]
Ligne petite vitesse	Z = 2
Pois de la ligne de petite vitesse	1164 [kg]

➤ **Moteur asynchrone**

Type	AMB560 L4ABSNM
Puissance nominale	2610 [kW]
Nombre de pôles	4
Fréquence	50 [Hz]
Vitesse	1481 [tr/min]
Tension nominale	5,5 [kV]
Courant nominal	310 [A]
Facteur de puissance nominal	0,92
Rendement	90%
Classe d'isolation	F
Mode de refroidissement	IC611/IP54
Indice de protection	IP55
Température	50 [°C]
Poids du stator	6165 [kg]
Poids du rotor	2665 [kg]
Poids du ventilateur	1550 [kg]

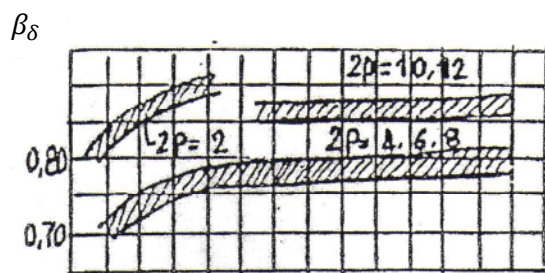


Figure A1 : Induction dans l'entrefer en fonction du nombre de paires de pôles

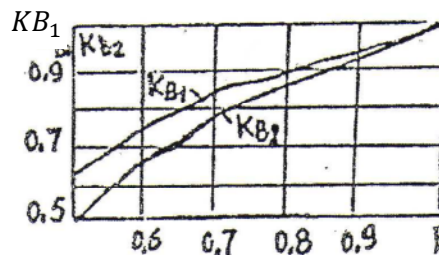


Figure A2 : Courbe des coefficients KB1 et KB2 en fonction de β_δ

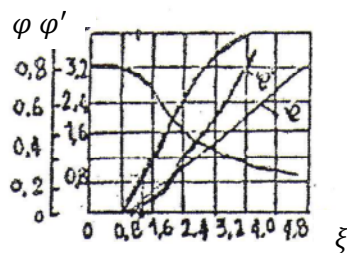


Figure A3 : Courbes φ et φ' en fonction de ξ .

Tableau T.2 : Intensités des champs magnétiques en fonctions des inductions dans les dents statorique et rotorique.

B(H)	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	585	585
1,4	586	595	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	706	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2320	2480	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3500	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5110	5440	5740	5740	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	9940	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Tableau T.1 : Intensités des champs magnétique en fonction des inductions dans les culasses statorique et rotorique.

B(H)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	52	53	54	55	56	57	58	59	60	62
0.5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	79
0.6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0.7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0.8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0.9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1.0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1.1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1.2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1.3	320	327	334	341	349	359	365	373	382	391
1.4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1.5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1.6	750	788	826	864	902	946	982	1020	1070	1110
1.7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1.8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1.9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2.0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8409	9000	9700

Tableau T.4 : Coefficient de fuite différentielle en fonction de Z_r/p et de q .

q_i	Z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99/0,94	0,94/0,87	–	–	–	–	–
3	0,98/0,92	0,93/0,87	0,88/0,84	0,85/0,78	–	–	–
4	–	0,90/0,81	0,84/0,77	0,80/0,75	0,77/0,72	–	–
5	–	–	–	0,75/0,69	0,72/0,67	0,70/0,65	–
6	–	–	–	0,70/0,62	0,66/0,60	0,62/0,58	–
8	–	–	–	–	–	0,53/0,47	0,51/0,46

Tableau T.3 : coefficient K_{rr1} en fonction de q

q_i	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8
K_{rr1}	–	0,0285	–	0,0141	0,0089	0,0065	0,0052	–

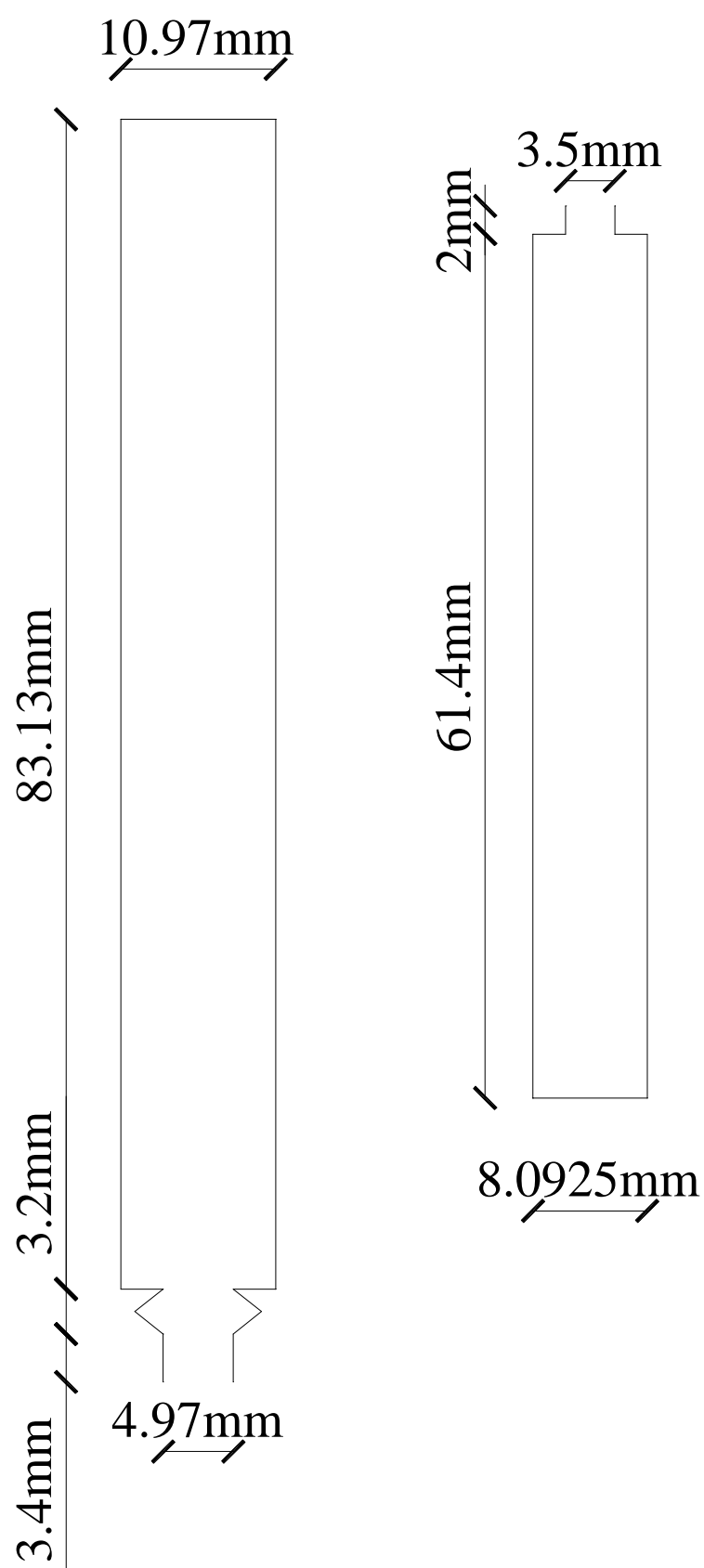


Figure1a : Encoches statorique et rotorique avec leurs dimensions

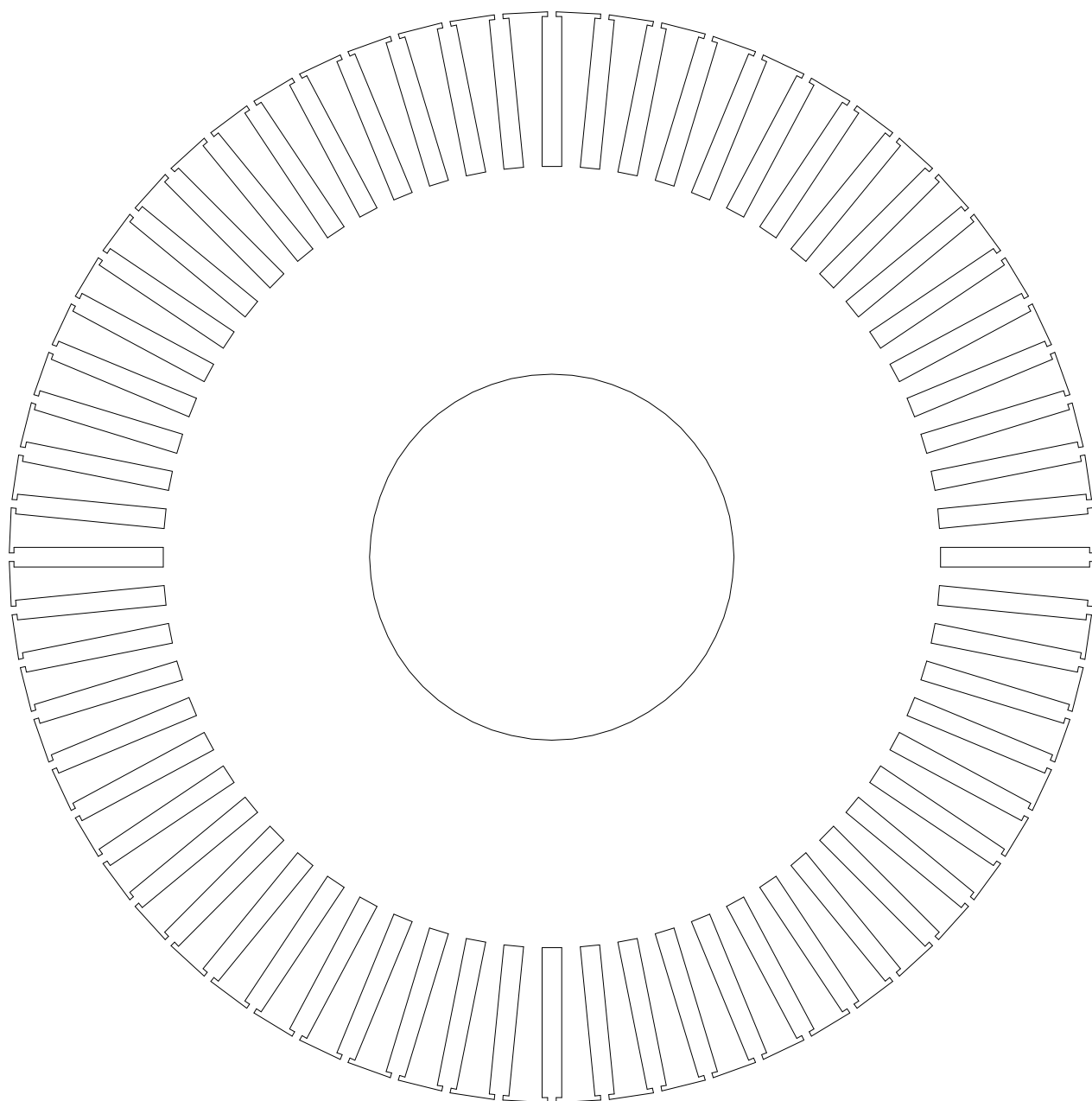


Figure a2 : Feuille rotorique

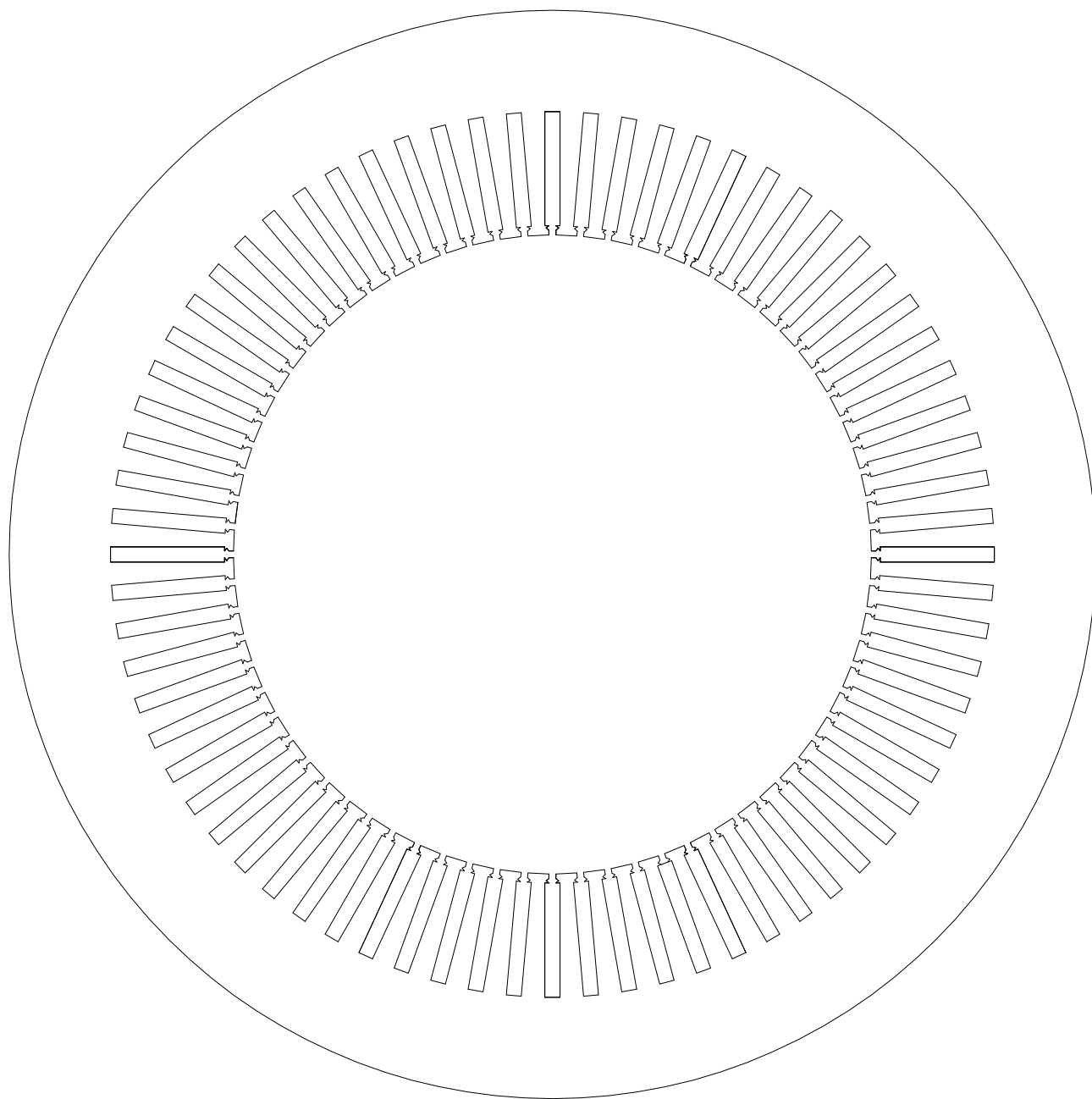


Figure a3 : Feuille statorique

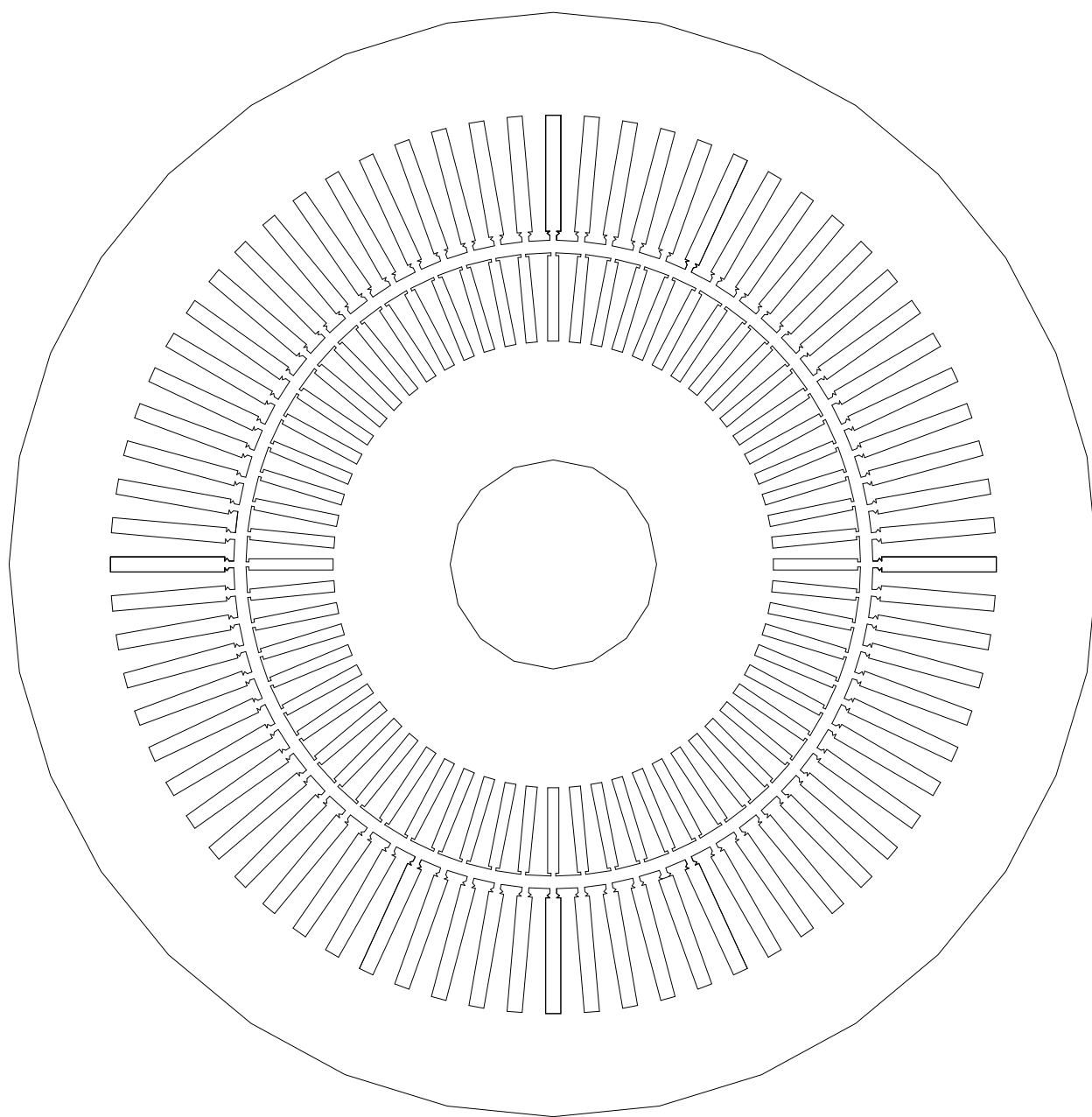


Figure a4 : Vue de l'ensemble feuille statorique, feuille rotorique et entrefer.

[1]T.AMEUR, A.ANKOUR et M.ARTBAS << Conception d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil alimenté par un convertisseur de fréquence >> Mémoire d'ingénieur Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2008.

[2] OD.GOLDBERG << Régimes transitoires dans les machines et appareils électriques et questions de leur protection >>. Edition Ecole supérieure de Moscou 2001.

[3] M.JUFER et JC. SABONNADIÈRE << Conception assistée par ordinateur (CAO) Moteur asynchrone >>. Techniques de l'ingénieur traité du génie électrique D3 590.

(01)Site de Sonatrach : www.Sonatrach-dz.com

(02) M. kOSTENKO et L.PIOVORSKI << Machines électriques, tome II : machines à courant alternatif >>.Edition MIR Moscou, 1979.

(04)ABB industria spa << plan du moteur AMB560L4A >>. Numéro du document : UM208399.

(05)E.GAUCHERON << Les moteurs électriques pour mieux les piloter et les protéger >>. Cahier Technique Schneider Electric n°207, juin 2004.

(06) B.NOGARED << Machines tournantes principes et constitution>> .Techniques de l'ingénieur traité du génie électrique D3 411

(07)M.STOLIDI << Matériaux en électrotechnique >>. IUFM Aix-Marseille

(08) L.AIT OUFELLA et L.GOUMIRI << Contribution au dimensionnement des moteurs asynchrones par implémentation d'un code de calcul interactif sous MATLAB GUI>> Mémoire d'ingénieur université Mouloud MAMMERI de TIZIOUZOU 2010.