

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



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTHERNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
ACADEMIQUE

SPECIALITE: ENTRAINEMENT ELECTRIQUE

THEME

CONCEPTION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A
DOUBLE CAGE DESTINEE AUX VEHICULES
ELECTRIQUES

Proposé par :

M^r: H.MOHELLEBI

Dirigé par :

M^r: F.HOCINI

Présenté par :

M^{elle} HETTAL Nouara

M^r ZADOUD Youcef

Promotion: 2012/2013



remerciement

Nous remercions tout d'abord « DIEU » tout puissant de nous avoir donné la santé et le courage d'effectuer ce projet de fin d'étude, dans les meilleures conditions

Comme nous tenons à adressées tout autres reconnaissances et notre gratitude à :


Tous les membres de service personnel de l'entreprise électro-industrie.

(ENEL) et surtout a monsieur GAOUÏ de nous avoir aidé tout au de notre stage.

Monsieur H.MOHLELLABI et M^r F.HOCINI notre promoteur, de nous avoir encadré, Suivi et orienté tout au long de travail

Nous remercions d'avance, les membres du jury d'accepter d'examiner notre travail

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail





DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de ma très chère sœur « Ouiza » que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.

- *Deux âmes les plus chères au monde mes très chers parents.*
- *Mes très chers frères :
Mohamed , Kamel et Amrane.*
- *Mes très chères sœurs :
Malika, Naima , Linda et son future mari .*
- *Ma très tante Fatima et sa petite famille.*
- *Mes très Chères amies :
Kahina , chafia, tina, Katia , Ouiza, lidia , Kahina et Zahia.*
- *A mon binôme Youssef et sa famille.*

N Ouara





DEDICACES

Pour que ma réussite soit complète, je la partage avec toutes les personnes que j'aime.

je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents pour leur amour et pour le courage et la volonté qu'ils m'ont inculqués

A mes adorables frères et sœurs et à toute la famille ;

A tous mes amis et les résidents de la cité universitaire de

Oued Aissi

A ma collègue de travail Nouara ; Et à tout ceux qui m'ont donnés de l'aide et de soutien durant mon travail ;

A tous ceux qui m'aiment ; et tous ceux que j'aime.

Youcef



SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur la motorisation d'un véhicule électrique.	
I.1. Historique	02
I.2. la chaîne de traction d'un véhicule électrique	03
I.2.1. les sources d'énergie	04
I.3.1.1. Batterie	04
I.2.1.2. Piles à combustible.....	07
1.2.2. Les convertisseurs électriques.....	09
1.2.2.1. Les redresseurs (AC-DC).....	09
1.2.2.2. Les hacheurs (DC-DC).....	10
1.2.2.3. Les onduleurs (DC-AC)	10
I.2.3. Les moteurs électriques.....	11
1.2.3.1. Moteurs à courant continu (MCC).....	11
1.2.3.2. Moteurs synchrones.....	12
I.2.3.3. Moteurs asynchrones	15
I.2.3.3.1. Le principe de fonctionnement du moteur asynchrone.....	16
I.2.3.3.2. Le glissement	16
I.2.3.3.3. Caractéristique du moteur asynchrone.....	16
I.3. Fonctionnement du moteur a puissance maximale constante pour un (V.E)	17
1.4. Gamme de puissance pour divers véhicule	19
I.5. avantages et inconvénients.....	19

Chapitre II : Calcul du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil

II.1. Cahier des charges	22
II.2. Calcul électromagnétique	22
II.2.1. Dimensionnement du moteur asynchrone à double cage	23
II.2.1.1. Dimensionnement du stator	23
II.2.1.2. dimensionnement du rotor	30
II.3. calcul de circuit magnétique	33
II.3.1. circuit magnétique statorique.....	-34
II.3.2. circuit magnétique rotorique	35
II.3.2.1. force magnétomotrice dans l'entrefer.....	37
II.3.2.2. force magnétomotrice totale par paire de pôle	37
II.3.3. Coefficients de saturation	37
II.3.4. Courant magnétisant	38
II.3.5. Réactance de magnétisation.....	38
II.3.6. coefficient de dispersion magnétique du stator	38
II.3.7. force électromotrice à vide	39
II.4. calcul des paramètres électriques des enroulements.....	39
II.4.1. paramètres statoriques	39
II.4.2. Paramètres rotoriques	41
II.4.2.1. Résistances actives des cages	41
II.4.2.2. Réactance du rotor	43
II.4.3. Paramètres au démarrage.....	45
II.4.4. Calcul des pertes et du rendement	47
II.4.4.1. Pertes magnétiques principales.....	47
II.4.4.2. Pertes électriques dans le cuivre et dans le bronze.....	48
II.4.4.3. Pertes mécaniques.....	48
II.4.4.4. Pertes supplémentaires	49
II.4.5. Pertes totales	49

II.4.6. Rendement de la machine	50
II.4.7. Calcul de la résistance de magnétisation	50
II.4.7. Calcul des performances du moteur	51
II.4.7.1. Schéma équivalent d'un moteur à deux cages	51
II.1.6.2 Caractéristique de fonctionnement du moteur	51

Chapitre III : Elaboration d'un programme de calcul

III.1. programme de calcul	59
III.2. comparaison des résultats	78
III.3. Caractéristiques mécaniques du moteur asynchrone	78
Conclusion générale	83

Annexes

Références bibliographiques

Présentation de l'entreprise ELECRO-INDUSTRIE (E-I)

Historique

L'entreprise est issue de la réorganisation de secteur opérée en Algérie entre 1980 et 2000 qui a conduit en 1999 à la restructuration de l'ancienne ENEL (entreprise nationale des industries électrotechniques) en un certain nombre d'entreprise publique économique, société par action (EPE / SPA), parmi lesquelles figure ELECTRO-INDUSTRIE.

Le complexe du matériel électrique industriel MEI d'AZAZGA est la plus grande unité de l'ENEL, le MEI occupe une surface totale de 45 hectares dont 6 hectares de bâtis, il est entré en production en 1985.

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en mains avec des partenaires Allemands, en l'occurrence, SIEMENS pour le produit et FRITZ WERNER pour l'engineering et la construction, l'infrastructure est réalisée par les entreprises Algériennes.

Objectifs

L'ELECTRO-INDUSTRIE est composée de deux unités ; toutes situées sur un même site :

- Unité de fabrication de transformateurs de distribution MT/BT (UTR).
- Unité de fabrication de moteurs électriques et prestations techniques.

Les produits fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIE sont conformes aux recommandations CEI et aux normes Allemandes DIN/VDE et certifié ISO 9001/2000.

Il est à signaler qu'ELECTRO-INDUSTRIE est le seul fabricant de ces produits en Algérie.

Présentation de l'unité des moteurs

L'unité des moteurs asynchrones : s'occupe de la fabrication des moteurs asynchrones à différentes puissances et à différentes hauteurs d'axes.

Parmi les moteurs électriques fabriqués par ELECTRO-INDUSTRIES d'AZAZGA, on cite le moteur asynchrone triphasé à double cage.

Les différents ateliers de fabrication des moteurs asynchrone

- Atelier de découpage.
- Atelier de moulage sous pression.
- Atelier d'usinage.
- Atelier de bobinage.
- Atelier de montage.

Option

Sur demande, les moteurs fabriqués par Electro-industries peuvent être exécutés avec les options suivantes :

Option mécanique :

Bout d'arbre spécial (long, conique, avec filetage, ...).

Deux bouts d'arbres standards ou spéciaux.

- Bride spéciale (bord de centrage, trous de fixation,....).
- Graisseurs pour paliers d'un côté ou des deux côtés.
- Roulements spéciaux.
- Sans ventilateur.
- Capot de protection pour la marche verticale (bout d'arbre vers le bas).
- Degrés de protection IP56 et IP65.

Option électrique :

- Tension spéciale (jusqu'à 690 V).
- Isolation classe H.
- Sonde thermique.
- Résistance de réchauffage.

Performances et applications

Nos moteurs électriques sont alimentés et pilotés par des variateurs électroniques de puissance permettant d'obtenir les performances suivantes :

- Variation de la vitesse de rotation.
- Démarrage progressif.
- Freinage.

Et de répondre aux applications suivantes :

- Charges mécaniques à couple variable : pompes, ventilateurs, compresseurs, broyeurs, extrudeuses, calandres, etc....
- Charges mécaniques à couple constant: mécanisme de manutention (treuils, élévateur, convoyeurs, etc....), machines outil à force de coupe constante (rectifieuses, raboteuses, cisailles, etc....) et laminoirs ou broyeurs à rouleaux.

Gamme de fabrication

Les moteurs électriques, basses tensions, fabriqués par électro-industrie d'AZAZGA sont de type asynchrone triphasé à une ou deux vitesses, et monophasé à condensateurs.

Présentation de l'entreprise

De construction fermée, à carcasse ventilée, alliage d'Aluminium et en fonte. Les rotors sont en court-circuit, à cage d'écureuil, en Aluminium pur (petits et moyens moteurs) et en barre de cuivre (grands moteurs), ces gammes sont données sur les tableaux suivants :

Tableau a : Moteurs triphasés à une seule vitesse

Gamme	Aluminium	Fonte	
Hauteur d'axe (mm)	71 à 132	160 à 250	280 à 400
Puissance (KW)	0,25 à 9	11 à 55	75 à 400
Vitesses (tr /mn)	1000 1500	3000	

Tableau b : Moteurs triphasés à deux vitesses

Vitesses (tr/mn)	750/1500	1000/1500	1500/3000
Puissances (KW)	0,35/0,65 à 3/4,5	0,48/0,68 à 5,7/7,8	0,48/0,6 à 3,7/ 4,4

Tableau c : Moteurs monophasés à condensateurs

Hauteur d'axe (mm)	71 à 100
Puissances (KW)	0,25 à 2,2
Vitesses (Tr/mn)	1500 - 3000

Caractéristiques générales

Les caractéristiques ci-dessous sont relatives aux moteurs standards. De caractéristiques différentes peuvent être fournies sur demande.

- Tensions nominales à 50 Hz : 220V – 380V – 660V (Tolérance $\pm 0,5\%$). Type de service: S₁ continu (Température ambiante 40 °c et altitude 1000 m).
- Classe d'isolation : F (tropicalisée).
- Refroidissement et ventilation: ventilateur externe monté sur l'arbre, protégé par un capot.

Présentation de l'entreprise

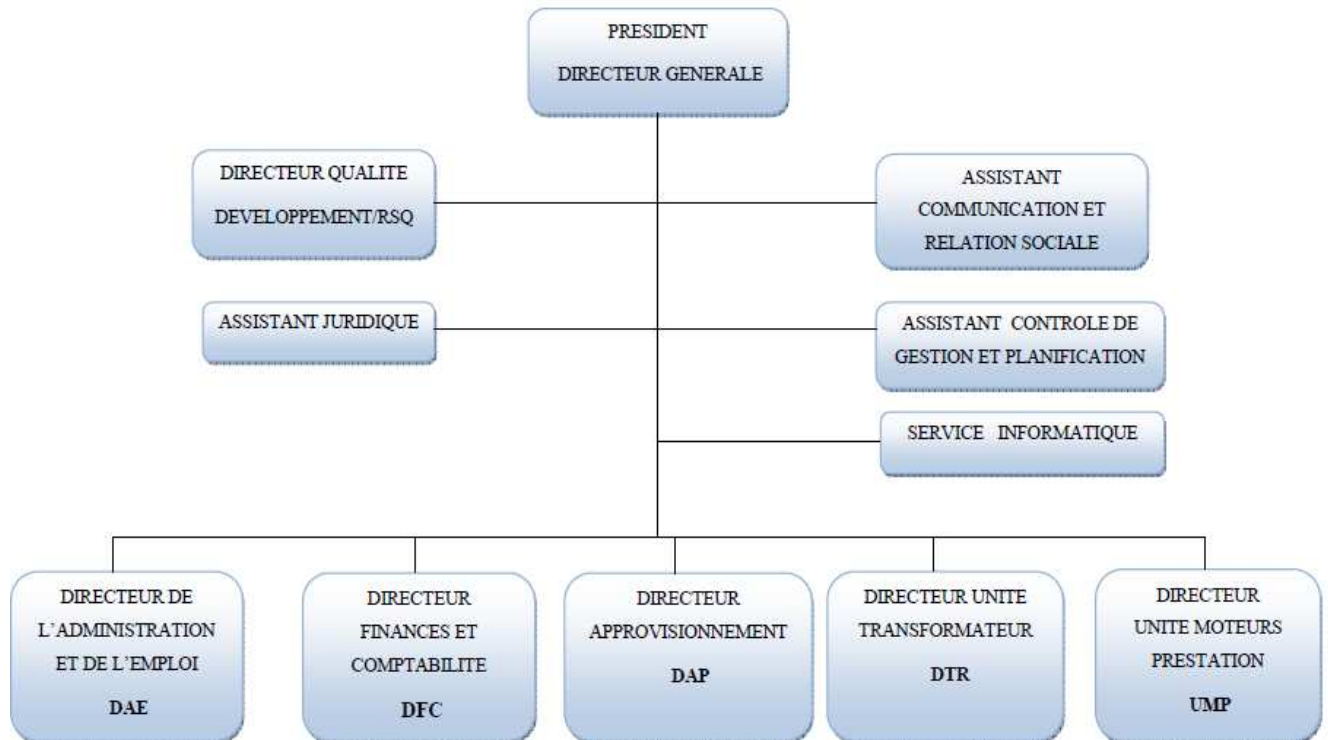
- formes de construction : B3 – B5 – B35.
- Equilibrages Dynamique des rotors avec clavettes.
- Degré de protection : IP54 – IP55.
- Paliers des moteurs de HA 71 à 250 mm sont graissés à vie.
- Paliers des moteurs de HA 280 à 400 sont munis d'un dispositif de graissage.
- Peinture standard : Gris pierre RAL 7030.

Normes

Les moteurs sont conformes aux normes suivantes :

- CEI 34-1: Machines électriques tournantes – caractéristiques assignées et de fonctionnements.
- CEI 34-2 : Méthodes pour la détermination des pertes et du rendement.
- CEI 34-5 : Classification des degrés de protections (code IC).
- CEI 34-6 : Modes de refroidissement (code IC).
- CEI 34-7 : Classification des formes de construction des dispositions de montage (code IM).
- CEI 34-8 : Marque d'extrémité et sens de rotation. CEI 34-9 : limite des bruits.
- CEI 34- 11 : Protection thermique incorporée.
- CEI 34-12 : Caractéristiques de démarrage des moteurs à induction à cage, à une seule vitesse, pour des tensions d'alimentations inférieures ou égales à 660V-50 Hz.
- CEI 34 -14 : Vibrations mécaniques des machines à partir de la hauteur d'axe 56 mm.
- CEI 72 : Dimensions et séries de puissance des machines électriques tournantes.
- VDE 0530 : Règlements relatifs aux machines électriques tournantes.

**ORGANIGRAMME DE L'EPE/ELECTRO-INDUSTRIES/SPA
AZAZGA**



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale :

La pollution atmosphérique soulève actuellement de nombreuses interrogations et constitue un défi aussi bien technique qu'économique. Pour attribuer à une amélioration de la qualité de l'air, le véhicule électrique est une option technologique envisageable. Un siècle s'est écoulé et la voiture électrique reste toujours d'actualité malgré certains obstacles liés à son autonomie. Par conséquent, il est nécessaire de s'intéresser aux nouvelles approches technologiques permettant de diminuer la consommation énergétique de la chaîne de traction. Les constructeurs tendent aujourd'hui à développer les éléments constituant la chaîne de traction (Batterie, système de recharge, moteur électrique,...etc.). Le moteur de traction et les batteries constituent alors les principaux axes de développement des constructeurs et des équipementiers.

Le moteur électrique, constituant le cœur de la chaîne de traction, doit tenir compte de nombreuses contraintes imposées par le fonctionnement du véhicule.

Une machine électrique est un dispositif permettant la conversion d'énergie électrique en travail ou énergie mécanique, produit d'un couple par un déplacement angulaire pour les moteurs rotatifs, ou bien d'une force par un déplacement linéaire pour les moteurs linéaires.

Une multitude de moteurs de types différents sont à notre disposition. Chaque type de moteur possède ses caractéristiques propres qui permettent de l'adapter à une application ou à une autre. On distingue deux types de moteurs, les moteurs à courant continu, les moteurs à courant alternatif.

Objectif du projet

Ce travail est destiné pour réaliser une méthode de conception du moteur asynchrone pour traction d'un véhicule électrique, et pour le bon déroulement de ce travail, il est nécessaire de suivre les étapes suivantes :

- Ch. I: généralités sur la motorisation d'un véhicule électrique.
- Ch. II: dimensionnement du moteur asynchrone à double cage.
- Ch. III: élaboration d'un programme de calcul.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS SUR LA MOTORISATION
D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE.

Introduction :

Depuis plusieurs années, la traction électrique devient un thème de recherche d'actualité. Ce concept englobe un large domaine à caractère pluridisciplinaire. Il fait appel à des connaissances en électrotechnique, électronique, mécanique, automatique, chimie, et informatique. La chaîne de traction doit comporter une source d'énergie, un ou plusieurs convertisseurs statiques, et une ou plusieurs machines électriques, associées à une électronique de calcul et d'instrumentation.

I.1. Historique : [1]

L'idée d'utiliser l'énergie électrique pour mouvoir des véhicules est née dès que les premiers moteurs électriques ont auparavant.

Les premières applications, dans les années 1830-1840, furent des prototypes de véhicules ferroviaires et de bateaux. À la fin du siècle dernier, plusieurs automobiles électriques alimentées cette fois par des accumulateurs électrochimiques, furent réalisées et testées en pensant à leur industrialisation.

À cette époque où les moteurs thermiques étaient loin du stade actuel, il semblait que la propulsion électrique ait ses chances; on connaît la suite. Soulignons toutefois les performances honorables atteintes par ces prototypes. Ainsi, la fameuse Jamais Contente roula à 105 km/h en 1899 et en 1901, un trajet de 307 km sans recharge fut parcouru.

Depuis plusieurs décennies, et malgré les handicaps évoqués dans l'introduction, un nombre marginal de véhicules électriques se sont développés, par exemple, pour la collecte des ordures, la manutention dans les entreprises, le transport de marchandises dans les gares et les aéroports ou encore pour les bateaux de loisirs. Les qualités essentielles recherchées étaient la propreté et le silence de fonctionnement. Dans le domaine ferroviaire, la propulsion électrique est très largement exploitée, mais l'alimentation s'effectue par caténaire ou rails conducteurs. Sur les lignes non électrifiées, on a recours à des locomotives thermoélectriques, un moteur Diesel fonctionnant à régime constant entraîne un générateur alimentant lui-même des moteurs électriques à travers des convertisseurs statiques à semi-conducteurs. Les gros bateaux utilisent également ce mode de propulsion hybride. Dans ces conditions, le moteur thermique peut travailler avec un rendement optimal et une pollution minimale. En outre, le réglage électrique de vitesse est beaucoup plus souple: il permet entre autres une grande plage de réglage sans embrayage ni boîte de vitesses, ainsi qu'un contrôle plus efficace qui améliore confort et sécurité (anti patinage, antiblocage...). Enfin, pour s'affranchir du problème de la masse des accumulateurs électriques ou des machines thermiques ou encore des caténaires, on recherche des solutions de «transmission de l'énergie sans contact». Deux voies ont été explorées dans le cas de véhicules terrestres circulant sur des voies dédiées. L'une consiste à alimenter à distance par induction

(transformateur, ici à haute fréquence). C'est le cas des projets suisses du véhicule *Serpentine* (voiturette automatique) et du *Swiss-méto* (train à lévitation magnétique et à moteur linéaire). L'autre est fondée sur un dispositif de stockage d'une relativement faible quantité d'énergie et d'une recharge rapide par induction en certains points. Ce principe est utilisé dans un tramway mis en service à Bristol en 1998 ; l'accumulateur est ici un volant d'inertie.

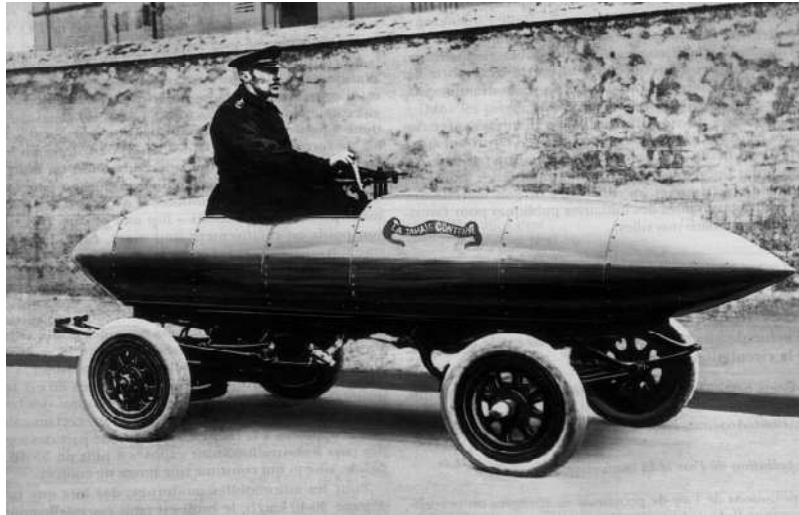


Figure I.1 La « Jamais contente », premier véhicule automobile à avoir

franchi le cap des 100 km/h en 1899. [1]

I.2. La chaîne de traction d'un véhicule électrique [2]

Depuis les premiers modèles de véhicules électriques, les éléments de base constituant la chaîne de traction n'ont guère changés. Le véhicule est toujours constitué d'accumulateurs pour le stockage d'énergie électrique, d'un moteur pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et d'un convertisseur électrique pour transférer et contrôler la puissance des batteries au moteur. Ces convertisseurs font appel à des structures d'électronique de puissance largement développées par ailleurs, en particulier dans la variation de vitesse.

Ces dernières années, la composition des différents éléments d'un véhicule électrique a changé et ces constituants font appel à de nouvelles technologies mais présentent toujours les mêmes principes de fonctionnement. Les premières batteries plomb ont été remplacées par des batteries au lithium qui présentent des densités de puissance les plus importantes actuellement. Les moteurs à courant continu ont cédé la place aux moteurs triphasés qui présentent eux aussi une meilleure densité de puissance, de meilleurs rendements énergétiques et un entretien réduit. Les convertisseurs électriques se sont adaptés pour piloter les moteurs mais gardent le même principe qui est de transférer l'énergie électrique entre les batteries lors des phases de motricité et du moteur électrique aux batteries lors des phases de freinage. Les éléments constituant un véhicule sont présentés à la figure 1-2.

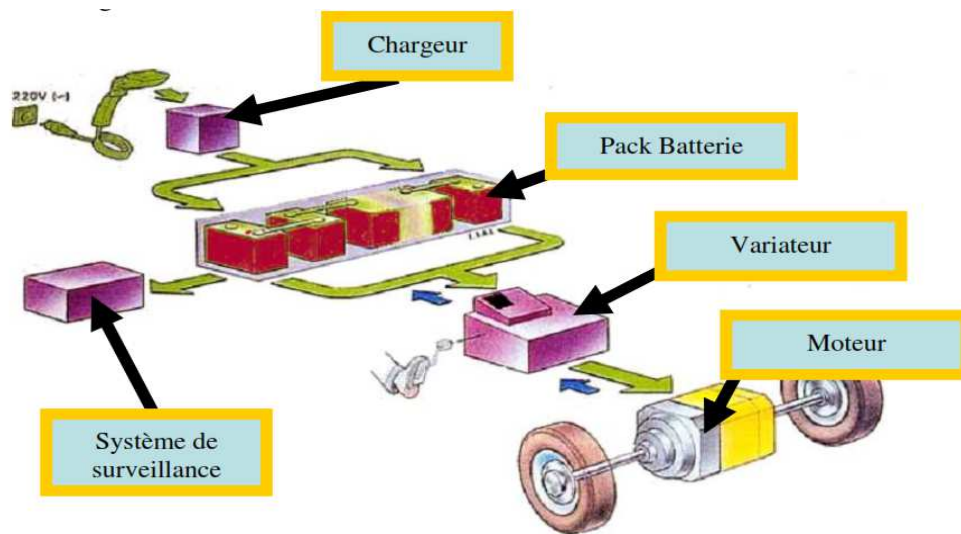


Figure 1-2 : Eléments constituant la chaîne de traction d'un véhicule électrique [2].

D'autres éléments, un peu moins mis en avant, sont nécessaires pour le bon fonctionnement d'un véhicule électrique. L'un de ces éléments est le chargeur de batterie qui puise l'énergie du réseau électrique pour venir recharger les batteries du véhicule. Un autre élément, beaucoup moins connu du grand public, est le système de monitoring des batteries qui permet de connaître l'état de charge du pack de batterie et donc d'estimer l'autonomie du véhicule. Ce système de monitoring se complexifie avec la technologie des batteries. Les batteries lithium nécessitent d'avoir une surveillance très particulière pour ne pas dépasser certains seuils de tension afin de ne pas dégrader la batterie et donc sa durée de vie. Ces systèmes de surveillance font appel au «Battery Management System » (BMS).

I.2.1. les sources d'énergie [3]

Le plus difficile des problèmes techniques à résoudre par bureaux d'étude est l'autonomie de parcours relativement faible de véhicule électrique. Ce problème se rattache surtout à la source d'énergie. Jusqu'ici le plus important des défis à relever pour le développement des véhicules électriques a été la mise au point de batteries très performantes, notamment en termes d'énergie massique (quantité d'énergie par unité de poids). Il est probable que cela reste la difficulté essentielle à surmonter. Les études ont cependant, entre autres objectifs, la réalisation de piles à combustible émancipées des limites d'énergie massique des batteries, ainsi que de généralices et de condensateurs dans le rôle de sources complémentaires de puissance.

I.2.1.1. Batterie

Côté performance, une batterie s'analyse entre densité de puissance (capacité à délivrer beaucoup de puissance aux roues par unité de volume/masse) et densité d'énergie (capacité de

stocker une forte énergie par unité de volume/masse). Pour l'utilisateur, il s'agit donc d'un compromis entre performance, autonomie et coût. [3]

Les véhicules électriques qui circulent actuellement sont équipés surtout au plomb ou au nickel-cadmium. Les chercheurs travaillant actuellement à mettre au point plus de dix types de batteries dépassent l'énergie massique des modèles actuels.

Outre l'énergie massique élevée, on attend d'une batterie véhicule électrique les caractéristiques suivantes :

- puissance massique élevée ;
- long cycle de vie ;
- Faible coût ;
- Sécurité ;
- simplicité d'entretien ;
- recyclabilité ;
- aucun risque de pollution de l'environnement après la mise au rebut ;
- Possibilité d'estimations précises de l'énergie restante ;
- autodécharge faible ;
- recharge rapide ;

La batterie plomb-acide est la plus utilisée de nos jours dans le domaine de l'automobile, puisqu'elle assure, dans quasiment tous les véhicules conventionnels, le démarrage du moteur thermique. Elle présente l'avantage d'un prix de revient faible, une technologie sûre et une infrastructure de recyclage établie. Cependant, ses performances sont limitées en termes de densité de puissance et de densité d'énergie mais également en termes de durée de vie cyclique. Pour pallier au problème de l'électrolyse de l'eau qui peut avoir lieu lorsqu'une surcharge dure longtemps, des batteries étanches sont également commercialisées. Elles présentent des performances accrues par rapport aux batteries ouvertes. Leurs densités d'énergie et de puissance sont typiquement de 30 à 40Wh/kg et de 150 à 200W/kg. [4]

D'une manière générale, les batteries plomb présentent un intervalle de température de fonctionnement plus large que les batteries Ni-MH et Li-ion. En ce qui concerne l'énergie, la puissance, l'acceptation de charge et la durée de vie cyclique, les performances restent cependant limitées. En revanche, leurs performances sont en constante amélioration et une utilisation des batteries plomb à haute puissance spécifique peut être envisageable. [4].

- **Le processus de décharge [5]**

Pendant la décharge, la batterie est génératrice et débite du courant dans le moteur de traction. Pour permettre l'apparition d'un courant électrique, il est nécessaire que les électrons et les ions puissent circuler; un récepteur va permettre la liaison entre l'électrode + et l'électrode -.

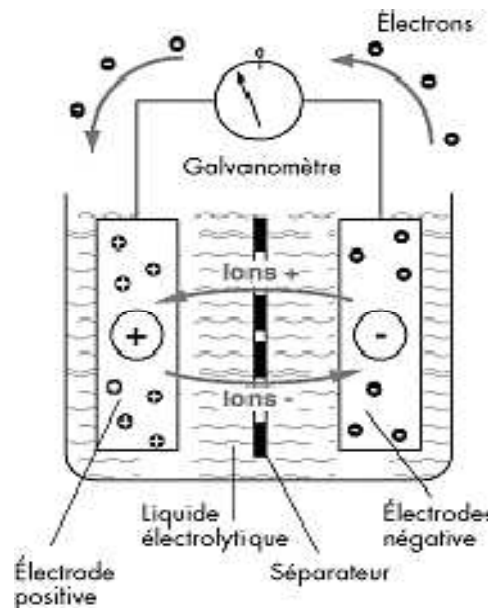


Figure I.3 le processus de décharge d'une batterie.

Le principe de fonctionnement pendant la décharge est le suivant :

Le galvanomètre joue le rôle du récepteur et le déplacement de son aiguille prouve le passage du courant...

La batterie se décharge...

Il est rappelé que l'intensité est proportionnelle à la quantité d'électrons déplacés et à la quantité de matière mise en œuvre.

Une batterie chargée possède un excès d'électrons à sa plaque négative et un manque d'électrons à sa plaque positive.

Lorsque les deux plaques possèdent le même nombre d'électrons, la batterie ne débite plus de courant (on dit qu'elle est "à plat").

- **Le processus de charge**

Pendant la charge, la batterie est réceptrice du courant fourni par le secteur.

Le procédé est l'inverse de la décharge. Un générateur de courant (dynamo, chargeur) est placé aux bornes des électrodes et débite en sens inverse dans le système.

Il va permettre de déplacer les électrons de la plaque positive vers la plaque négative et redonner à la batterie son état initial.

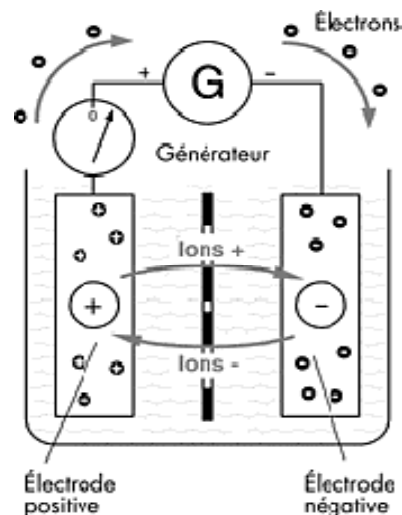


Figure I.4 Le processus de charge d'une batterie.

Pendant la charge, le courant circule en sens inverse. Le galvanomètre dévie dans le sens inverse à celui de la recharge. L'intensité et la quantité de matière déplacée est toujours proportionnelle au nombre d'électrons en mouvement.

Lorsque la plaque négative est en excès d'électrons, la batterie est rechargée. L'utilisation du générateur électrochimique s'effectue en deux phases, la charge et la décharge.

À l'intérieur de la batterie, l'énergie chimique se manifeste par un transfert de matière grâce à une circulation d'ions.

À l'extérieur de la batterie, l'énergie électrique se manifeste par un déplacement d'électrons.

La réaction chimique fait apparaître deux autres phénomènes gênants : un dégagement de gaz et une montée en température.

I.2.1.2. Piles à combustible :

Dans la pile à combustible, l'énergie chimique est transformée en hydrogène directement en énergie électrique. Cette pile diffère de l'accumulateur rechargeable (ou secondaire) tel que ceux des véhicules électriques à batteries, que du moteur thermique, quoiqu'elle soit bien plus proche du premier. La pile à combustible et la batterie sont l'une et l'autre des dispositifs électrochimiques, qui se distinguent principalement par le fait que les réactifs producteurs d'électricité sont régénérés dans la batterie par la recharge, tandis que dans la pile à combustible ils proviennent en continu d'une source externe (par exemple, l'air et un réservoir d'hydrogène). [4]

La génération de l'électricité dans une pile à combustible est obtenue par réaction entre un oxydant dit aussi comburant, généralement l'oxygène de l'air, et un réducteur dit aussi combustible qui est l'hydrogène. Son fonctionnement est particulièrement propre puisqu'elle ne

produit que de l'eau et consomme uniquement des gaz. D'un point de vue écologique, c'est la solution idéale.

Cependant, la pile à combustible est irréversible. Toute seule, elle est incapable de récupérer l'énergie au freinage. D'autre part, elle répond mal aux variations de charges importantes. Même si les réactions électrochimiques sont rapides, la limitation de dynamique provient des systèmes auxiliaires en particulier de l'alimentation en air. Actuellement, cela ne pose pas de problème majeur puisque la pile à combustible peut être hybridée grâce à l'utilisation d'éléments de stockage à hautes puissances spécifiques tels que les Super condensateurs ou les batteries Li-ion de forte puissance.

Une telle hybridation permet de réduire la taille de la pile à combustible et d'assurer une meilleure réponse dynamique.

Les performances des piles à combustible se sont nettement améliorées. Il reste à franchir le défi de l'approvisionnement en hydrogène. En effet, l'hydrogène n'existe pas à l'état naturel, il est combiné à d'autres éléments tels que l'oxygène (H₂O), le soufre (H₂S) et les hydrocarbures. Actuellement, deux voies sont envisageables. La première consiste à fabriquer l'hydrogène en utilisant des hydrocarbures. Cette solution consiste à utiliser le biogaz ou l'alcool issu d'éléments végétaux. Le problème de l'émission de polluant peut être résolu si la production de l'hydrogène se centralise sur des sites et non pas à bord des véhicules. Les polluants peuvent être alors piégés voire même transformés. La deuxième solution consiste à produire l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Le rendement de ce processus est faible ce qui suppose donc la disponibilité d'une source d'énergie primaire économique et inépuisable.[4]

- **Les chargeurs [5]**

Pendant la charge, la batterie se comporte comme un récepteur de courant.

Cette phase de fonctionnement obéit à des valeurs limites à ne jamais dépasser pour :

- la tension ;
- l'intensité ;
- le temps ;
- la température ;
- le dégagement gazeux.

Pour répondre à ces besoins, il existe pour chaque type de batterie un chargeur adapté.

- Le chargeur embarqué pour les véhicules légers et les 2 roues (220V ~ 15 A alimentation secteur) ;
- Le chargeur stationnaire pour les poids lourds et véhicules industriels (380V ~ 20 A et plus, alimentation triphasée).

Ces chargeurs sont pilotés par un micro processeur.

Ils s'adaptent automatiquement aux besoins de la batterie en restant dans les valeurs permises.

La coupure s'effectue automatiquement en fin de charge.

1.2.2. Les convertisseurs électriques [6]

- L'utilisation d'une chaîne de traction électrique dans les véhicules routiers autonomes sous-entend la présence à leur bord d'une source d'énergie électrique qui peut-être :
- une batterie d'accumulateur de capacité appropriée à l'autonomie souhaitée du véhicule dans le cas d'un véhicule tout électrique ;
- une batterie d'accumulateur de plus faible capacité, associée à un groupe thermoélectrique (association d'un moteur thermique et d'un alternateur) ou à une pile à combustible dans le cas d'un véhicule électrique hybride.

Dans la plupart des véhicules électriques, on se trouve confronté à la compatibilité des sources d'énergie à courant continu et à courant alternatif et à l'intérieur d'une même catégorie à des compatibilités entre les tensions des sources et des récepteurs. Ce problème de compatibilité sous-entend la présence à bord des véhicules électriques de convertisseurs électroniques dont le rôle est de lever les incompatibilités de fonctionnement. De ce fait on pourra trouver à bord des véhicules :

- des convertisseurs de courant alternatif en courant continu (AC-DC), que l'on appelle redresseurs ;
- des convertisseurs de courant continu en courant continu de tension différée (DC-DC) que l'on appelle hacheurs ;
- des convertisseurs de courant continu en courant alternatif (DC-AC) que l'on appelle onduleurs.

Le but de cette section n'est pas de donner une description exhaustive de chacun de ces types d'organes mais d'expliquer leurs rôles à bord d'un véhicule automobile.

1.2.2.1. Les redresseurs (AC-DC) :

Les redresseurs sont des convertisseurs d'énergie qui transforment une source électrique à courant alternatif en une source électrique à courant continu. Nous pouvons distinguer:

- des redresseurs à diodes : ces convertisseurs établissent une relation rigide entre la tension continue de sortie et la tension alternative d'entrée ;
- des redresseurs à thyristors, qui permettent de faire varier de manière continue le rapport entre la tension continue récupérée à leurs bornes de sortie et la tension alternative appliquée à leurs bornes d'entrée en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors ;
- des redresseurs mixtes associant des diodes et des thyristors ;
- des groupements de redresseurs à thyristors destinés à améliorer les performances et à diminuer les perturbations ;
- des redresseurs MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) qui associent des IGBT

(Insulated Gate Bipolar Transistor) et des diodes et qui ont pour avantage d'être faiblement perturbateurs des sources alternatives qui les alimentent.

Dans un véhicule électrique, les redresseurs sont utilisés pour transformer l'énergie électrique à courant alternatif fournie, soit par le réseau de distribution général, soit par un alternateur placé à bord du véhicule et accouplé à un moteur thermique ; en énergie électrique à courant continu qui peut être stockée dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques et/ou dans une batterie de grande capacité.

1.2.2.2. Les hacheurs (DC-DC)

Un hacheur est un convertisseur de courant qui permet d'obtenir à partir d'une source de tension à courant continu de valeur sensiblement constante, des tensions et des courants contrôlés, réglables, différents des valeurs d'entrée et adaptés aux besoins nécessaires à l'alimentation de divers récepteurs (moteurs, batteries, etc.).

Dans un véhicule électrique, les hacheurs ont deux usages essentiels :

- ils sont indispensables dans l'alimentation des moteurs de propulsion quand ceux-ci sont des moteurs à courant continu ;
- ils sont nécessaires pour adapter la tension de la batterie principale à celle des auxiliaires électroniques utilisés (capteurs, régulateurs, etc.).

En effet, on ne peut envisager le branchement brutal d'un moteur à courant continu sur une source d'énergie à tension fixe (batterie d'accumulateur par exemple) pour les raisons suivantes :

- aucun réglage du couple moteur ni de la vitesse du moteur ne serait possible ;
- le régime transitoire à la mise sous tension directe du moteur serait destructif tant du point de vue électrique (surintensité) que mécanique (surcouple) ;

L'utilisation d'un hacheur permet en effet de maintenir le courant moteur à la valeur souhaitée tout en assurant le réglage progressif et sans perte notable de la tension du moteur. Il permet également de régler le couple et la vitesse du moteur et donc du véhicule en traction mais aussi en freinage électrique.

1.2.2.3. Les onduleurs (DC-AC)

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le (ou les) moteur(s) de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.

La conversion DC-AC peut être réalisée de multiples manières. Mais l'usage, les particularités des véhicules routiers et la rationalisation des solutions industrielles ont conduit à privilégier une structure d'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels constitués par l'association d'un IGBT et d'une diode montés en antiparallèle et commandés selon une loi du type MLI (Modulation de Largeurs d'Impulsion, en anglais (PMW)). Ce type de montage permet d'associer une source de tension (de type batterie) et un récepteur de type source de courant

(moteur asynchrone, moteur synchrone bobiné, à aimant permanent ou à réluctance variable). La méthode de commande par MLI présente deux avantages importants :

- elle repousse vers les fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie ce qui facilite le filtrage de cette tension ;
- elle permet de faire varier le fondamental de la tension de sortie.
- Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont le plus souvent déterminés en temps réel au moyen d'une électronique de commande appropriée

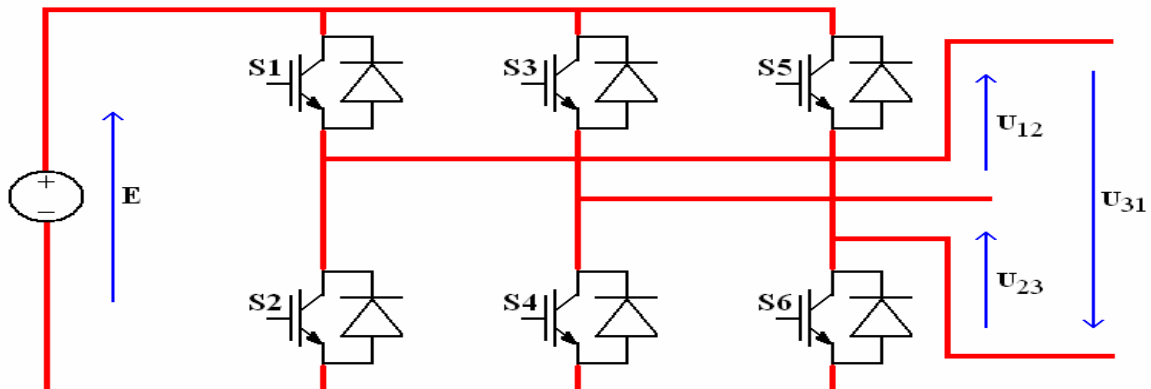


Figure I.6 Schéma onduleur de tension [2]

I.2.3. Les moteurs électriques : [1]

La relation est étroite entre l'augmentation des performances des moteurs et la réalisation des hautes performances des véhicules électriques en exploitation. Il existe trois grandes catégories de moteurs (à courant continu, asynchrone et synchrone)

En ce qui concerne le choix d'une technologie de motorisation, la solution de référence a été pendant longtemps la motorisation à courant continu, soit dans sa version à excitation série, solution robuste qui présente de manière intrinsèque une caractéristique à la traction (Volta), soit plus récemment, dans sa version à excitation séparée commandée par hacheur (Express). Mais l'évolution de l'électronique de puissance et des matériaux tels que les aimants permanents conduit aujourd'hui à s'orienter vers des solutions plus performantes telles que les motorisations synchrones ou asynchrone.

1.2.3.1. Moteurs à courant continu (MCC)

Parmi les différents types de moteurs à courant continu (moteur série, moteur à excitation séparée, moteur à aimants permanents), c'est essentiellement le moteur à excitation séparée qui est utilisé. C'est la solution la plus économique et la plus fiable grâce à son convertisseur d'induit du type hacheur à deux interrupteurs et un hacheur d'inducteur de plus faible puissance. Mais cette technologie comporte les inconvénients suivants

- la difficulté de refroidissement de l'induit tournant ce qui limite l'obtention des possibilités d'un couple massique élevé ;

- la vitesse de rotation de l'induit est limitée par sa constitution ;
- l'usure des balais nécessitant un entretien périodique pour enlever les poussières conductrices qui nuisent à l'isolement du collecteur ;
- le coût de construction est élevé car la machine est complexe : collecteur, bobinage de l'induit

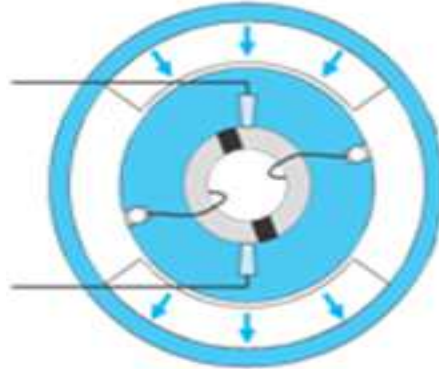


Figure I.7 structure d'un moteur a courant continu

1.2.3.2. Moteurs synchrones :

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs sortes de configurations dont nous citons les plus fréquentes dans la littérature :

a) Moteur synchrone a rotor bobiné:

Il est alimenté par un onduleur en pont à six transistors, C'est le moteur dont le principe et les caractéristiques se rapprochent le plus de ceux du MCC à excitation indépendante. Il permet d'optimiser facilement le rendement (action sur le flux, le courant d'induit, mais également sur l'angle d'autopiloteage, ce qui donne trois paramètres de réglage).

La structure est identique à celle du moteur à courant continu à collecteur, à ceci près que l'induit est fixe (stator) et l'inducteur tournant; c'est l'alimentation électronique qui fait tourner le champ induit chargé d'entraîner le rotor. Enfin, le fonctionnement à puissance maximale constante est aisé à obtenir sur une très large plage de vitesse. Son rotor bobiné inducteur est cependant source de pertes et nécessite un ensemble à bagues lisses et balais qui s'usent. Toutefois, la durée de vie de cet ensemble est bien supérieure à celle exigée par la plupart des applications de traction. Ce moteur équipe les motrices TGV de deuxième génération avec un convertisseur de type commutateur de courant à thyristors en commutation naturelle.

Plusieurs MSRB ont été réalisés pour des applications automobiles, ils ont montré d'excellentes aptitudes. Malgré cela, ce type de moteur reste peu étudié par l'ensemble des industriels et de la communauté scientifique, très

probablement à cause de la présence des balais.

Pour pallier ce problème, un autre moteur synchrone à excitation séparée, mais cette fois à inducteur fixe, a été étudié et réalisé, mais plutôt dans l'optique de grandes vitesses. Il s'agit d'une structure spéciale dont le rotor possède une architecture dite à griffes. Pour avoir des performances massives satisfaisantes, ce moteur doit tourner sensiblement plus vite, ce qui nécessite des technologies avancées de réducteur.

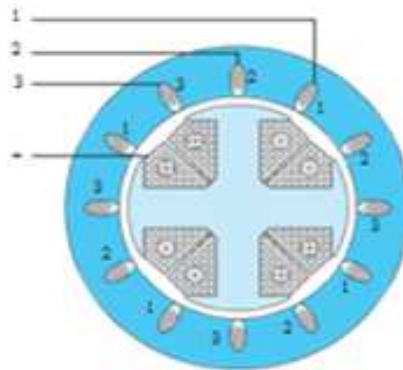


Figure I.8 structure d'un moteur synchrone à rotor bobiné.

b) Moteur synchrone à réluctance variable :

Il constitue une solution envisagée par plusieurs constructeurs, Il s'agit d'un moteur synchrone à champ tournant, du même type que le MSRB précédent, mais dans lequel le rotor à pôles saillants est non excité (ni aimants, ni bobinage inducteur) ; il n'y a pas de balais, donc pas d'usure. Il est également alimenté par un onduleur triphasé en pont «classique». Pour obtenir des performances satisfaisantes aussi bien en terme de couple maximal, de rendement, de facteur de puissance que de plage de fonctionnement à puissance maximale constante, il est nécessaire de maximiser le rapport des inductances extrêmes

C'est en effet un moteur à réluctance variable qui doit avoir la plus grande variation possible d'inductance. Ce rapport reste trop faible avec une structure classique à pôles saillants telle que celle du MSRB. Un rapport supérieur ou

Ces rotors sont constitués de paquets de tôles intercalés entre des couches amagnétiques et montés axialement de telle façon que le flux, dans l'axe dit direct, passe aisément d'un pôle à l'autre. Les performances de ces moteurs sont bonnes mais cette technologie de rotor reste aujourd'hui délicate à réaliser

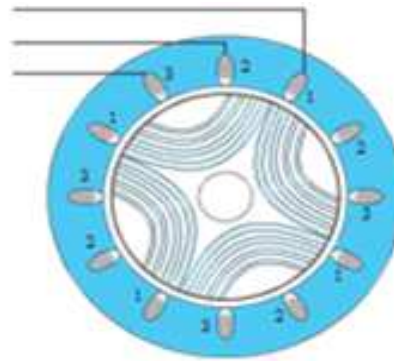


Figure I.9 structure d'un moteur synchrone à réluctance variable

c) Moteur synchrone à aimant permanent :

Alimenté par onduleur triphasé. Il fonctionne sur le même principe que le MSRB mais avec un rotor inducteur excité par un ensemble d'aimants au lieu de bobinages alimentés en courant continu. Il existe de nombreuses façons de disposer les aimants au rotor (en surface insérés ou non entre des pièces polaires, « enterrés » avec ou sans concentration de flux.

Les figures I.10 et I.11 montrent une structure de rotor à quatre pôles à aimants en surface sans pièces polaires. Si l'objectif est d'obtenir un « fonctionnement à puissance constante » (dé fluxage), sachant qu'il est impossible de régler le flux inducteur produit par les aimants, on peut quand même dé fluxer le moteur grâce à la réaction d'induit, mais à condition de contrôler l'angle d'autopilotage (ce qui était impossible avec le moteur à aimants à collecteur). Le rendement de tels moteurs est excellent si l'on dispose d'aimants à hautes performances telles que la technologie fer-néodyme-bore en offre, à des prix qui deviennent compatibles avec les exigences de la production en moyenne ou grande série. Quant aux ferrites, dont le prix est beaucoup plus attractif, ils leur confèrent des performances.

Plus modestes. Les MSAP sont très souvent retenus pour l'entraînement de véhicules électriques et tout particulièrement pour les entraînements directs de roues (grand nombre de pôles. De tous les moteurs électriques, ce sont eux qui offrent les meilleures performances en terme de compromis entre la masse et le rendement mais à un prix parmi les plus élevés

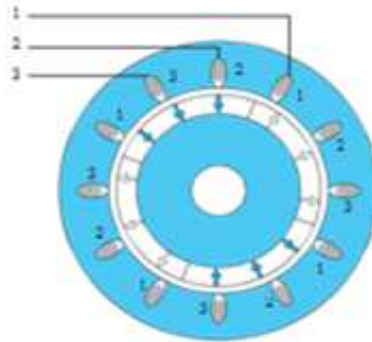


Figure I.10 structure d'un moteur synchrne à aimant permanent

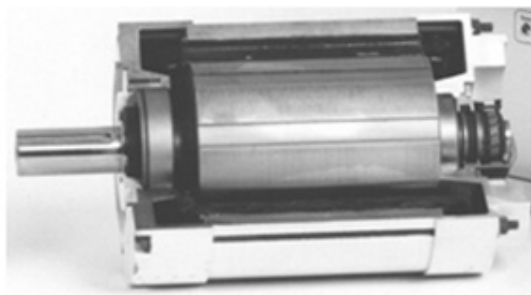


Figure I.11 moteur synchrone de quatre pôles à aimant permanent en surface

I.2.3.3. Moteurs asynchrones :

Il existe différents types de moteurs asynchrones, mais pour la traction électrique, nous n'envisagerons que le moteur asynchrone triphasé à rotor à cage d'écureuil (MAS).

Le rotor de la machine asynchrone a cage d'écureuil est constitué des barres conductrices très souvent en aluminium. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices. [7]

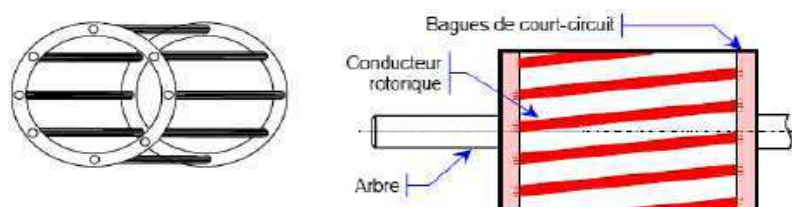


Figure I.12 : Rotor à cage d'écureuil [7]

Le stator est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces en acier au silicium de l'ordre de 0.5mm d'épaisseur, ces tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant. Le feuilletage du circuit magnétique réduit les pertes par courant de Foucault.

Le moteur asynchrone à cage est très répandu dans le domaine industriel, de par sa grande robustesse mécanique et son faible coût. La plage des puissances des machines asynchrones s'étend de la contrainte de watts à la dizaine de mégawatts. [7]

Pour notre travail, la machine étudiée est la machine asynchrone à cage d'écureuil

I.2.3.3.1. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone à cage :

Le fonctionnement de la 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.

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n) car dans le cas contraire $n=n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

I.2.3.3.2. Le glissement [8]

Étant donné que le rotor du moteur asynchrone ne peut pas tourner à la vitesse de synchronisme (si non le champ tournant ne couperait pas les conducteurs rotoriques) et pour caractériser la vitesse du rotor, on définit le glissement g , qui est l'écart relatif entre la vitesse de synchronisme N_s et la vitesse réelle N soit :

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

N_s : vitesse du synchronisme (vitesse du champ tournant) en tr/min.

N : vitesse mécanique du moteur en tr/min.

ω_r : Pulsation des courants induits (courants rotoriques)

ω_s : Pulsation des courants inducteurs (courants statoriques)

I.2.3.3.3. Caractéristique du moteur asynchrone : [9]

Le couple électromagnétique (C_{em}) d'un moteur asynchrone est fonction de la puissance électromagnétique et de la vitesse angulaire. Il s'exprime dans la pratique par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s}$$

Avec :

C_{em} : Couple électromagnétique en [N.m].

P_{em} : Puissance électromagnétique en [w].

Ω_s : Vitesse angulaire de synchronisme en [rad/s].

Le réglage de la vitesse de la machine asynchrone est obtenu en agissant sur le couple qu'elle produit. Le couple varie avec la fréquence de rotation pour le moteur et pour la charge entraînée. Les caractéristiques du moteur et de la charge se croisent au point de fonctionnement pour lequel les couples moteurs et résistant sont identiques. Comme le montre la figure suivante.

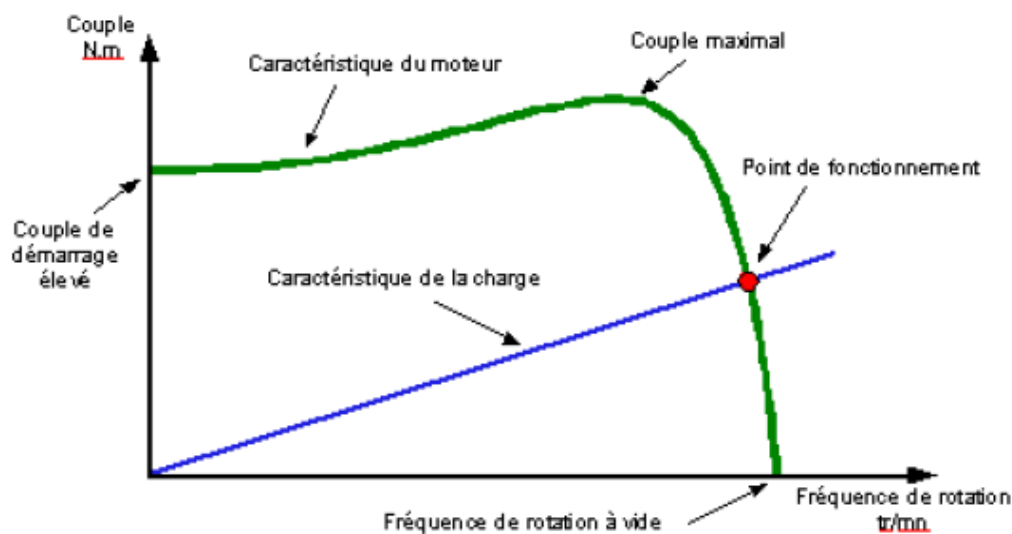


Fig. I.13 caractéristique du couple de la machine asynchrone.

I.3. Fonctionnement du moteur à puissance maximale constante pour un véhicule électrique : [10]

Dans une chaîne de traction ayant un réducteur à rapport de réduction fixe g_r ; le moteur doit satisfaire deux conditions:

- Assurer le couple maximal de démarrage en côte du véhicule C_{max} .
- Assurer la vitesse maximale du véhicule Ω_{max} .

Comme le rapport de réduction est fixe, le couple C_{max} et la vitesse Ω_{max} du moteur sont imposés par les performances du véhicule. Mais, la puissance P_{max} nécessaire pour rouler à la vitesse maximale du véhicule est bien plus petite que la puissance maximale disponible $P_{coin} = C_{max} \cdot \Omega_{max}$. Ainsi, un moteur dimensionné pour le couple et la vitesse maximale engendre un surdimensionnement important de l'alimentation électronique. C'est certainement la manière la plus simple de définir le cahier des charges (prendre

simplement C_{max} et Ω_{max}), mais ce n'est pas la plus approprié pour les applications de traction électrique.

Il est plus intéressant de limiter la puissance du moteur à la valeur maximale nécessaire et de faire en sorte que le moteur puisse la délivrer sur une large plage de vitesse, comme présenté sur la Figure suivante :

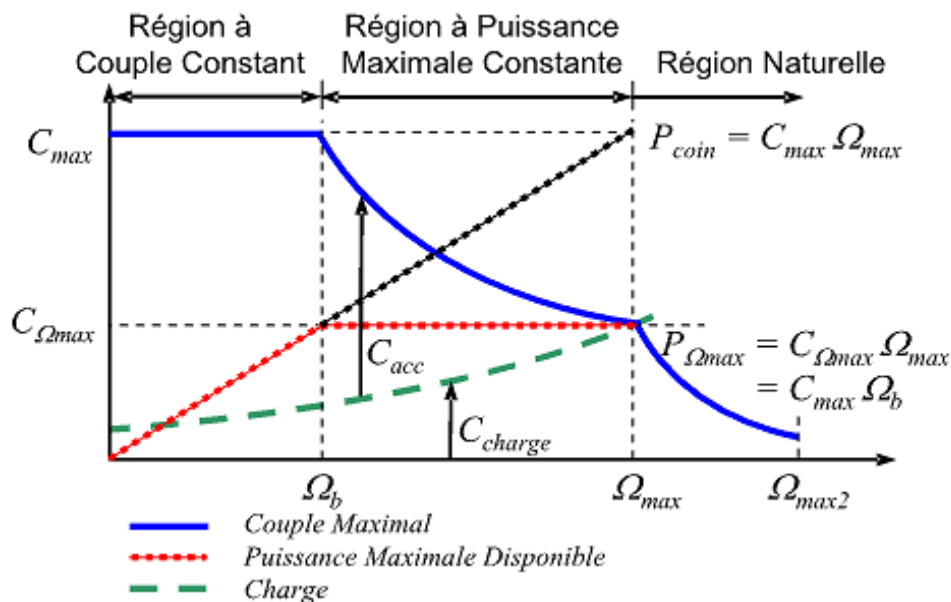


Fig. I.14. Enveloppe du moteur électrique de traction capable de fonctionner à puissance maximale constante.

L'enveloppe du moteur est définie en partant de la valeur du couple C_{max} correspondant à la vitesse maximale Ω_{max} avec une puissance maximale constante $P_{PMC} = P_{\Omega_{max}}$. Ainsi, pour une diminution de la vitesse, le couple augmente jusqu'à sa valeur maximale C_{max} . La vitesse en ce point est appelée vitesse de base Ω_b . Ce point devient le point nominal de la machine. Ainsi, l'enveloppe du moteur contient trois régions, présentées sur la Figure. I.14 la région à couple constant ($C = \text{const.}$), la région à puissance maximale constante ($C \cdot \Omega = \text{const.}$) et la région « naturelle » ($C \cdot \Omega^2 = \text{const.}$)

Le couple maximal est atteint pour un courant d'induit et un flux maximal. La vitesse augmente avec la tension d'alimentation arrivant à sa valeur maximale (tension batterie) lorsque la vitesse atteint la vitesse de base Ω_b . Ensuite, la région à puissance maximale constante est disponible en diminuant le flux d'excitation de la machine. Cette zone correspond à un fonctionnement du moteur en défluxage

Une troisième région existe pour les moteurs à grande vitesse, où le couple descend vite. Cette région se définit entre la vitesse maximale Ω_{max} et la vitesse mécanique limite Ω_{max2}

1.4. Gamme de puissance pour divers véhicule : [1]

Le tableau de la figure I.15 représente la puissance maximale nécessaire pour divers véhicules :

Types de véhicule	Puissance maximale
Bicyclette assistée	100 à 400 W
Scooter	2kW
Motocyclette sportive	14 à 25 kW
Voiturette	8kW
Voiture urbaine	20 à 40kW
Voiture routière	50 à 70 kW
Véhicule utilitaire urbain	40kW
Bus urbain	160 kW

Fig. I.15. Gamme de puissance pour divers véhicule.

I.5. avantages et inconvénients : [10]

a) avantages :

Les véhicules conventionnels équipés avec des moteurs à combustion interne fournissent de bonnes performances routières et une grande autonomie grâce à la grande densité énergétique des carburants pétroliers. Cependant, ces moteurs sont caractérisés par un rendement faible, une pollution environnementale, des émissions de gaz à effet de serre et une grande dépendance envers les ressources pétrolières.

D'autre part, les véhicules tout électriques possèdent de grands avantages par rapport au véhicule traditionnel, représentant la solution idéale aux problèmes annoncés. En effet, ils sont :

- Sans pollution environnementale locale ;
- Sans émission des gaz à effet de serre (en supposant que la production d'électricité est « propre ») ;
- Sans dépendance des ressources fossiles ;
- Avec un bon rendement global de la chaîne de traction ;
- Permettent un freinage électrique avec récupération d'énergie ;
- Une conduite plus souple ;
- D'une conception simplifiée (suppression des boîtes de vitesse, etc.),
- Silencieux ;

b) inconvénients :

- La puissance disponible est forcément limitée, pour éviter tout risque d'échauffement de la prise et des câbles suite à une utilisation intensive pendant de nombreuses heures, en cas de dépassement de la puissance maximale (qui varie de 8 à 10A selon les pays d'Europe) ; et pour éviter
- tout risque d'incendie ou d'électrisation en cas de vétusté de l'installation électrique d'absence de certains dispositifs de protection.
- La puissance de l'installation est impossible à gérer. N'ayant pas de circuit dédié, la prise de recharge partage un départ du tableau avec d'autre ; si la somme des consommations dépasse la limite de la protection (en générale 16A), l'installation disjoncte.
- Conséquence des réserves énoncées ci-dessus, le temps de recharge sera forcément plus long : on l'évalue à 12 heures pour une recharge complète.

Conclusion :

Dans ce chapitre, un aperçu général est donné sur le véhicule électrique, et tout nous laisse à croire que la voiture électrique peut réellement devenir une alternative aux voitures actuelles. Bien sûr qu'il y a encore du chemin, la capacité et le temps de chargement des batteries jouera un rôle très important, et les aspects pratiques tels qu'un chauffage ou un dégivrage devront être correctement résolus. Néanmoins je reste confiant, et je pense que les autres solutions telles que le bio carburant, l'éthanol, ou encore les voitures hybrides ne sont que transitoires, et n'ont pas de réel intérêt.

CHAPITRE II

CALCUL DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ À CAGE D'ÉCUREUIL

Introduction :

Le calcul d'une machine électrique en générale passe par le choix des dimensions principales qui sont :

- Le diamètre de la machine.
- La longueur virtuelle de la machine de la partie active, puis vient le calcul électromagnétique, mécanique, et thermique.

Les résultats obtenus après calcul doivent être vérifiés par rapport à ceux attendus. Dans le cas où ils ne sont pas conformes, on procède à des corrections sur les dimensions et paramètres de départ puis, on refait l'exécution des calculs. Cette opération doit être répétée jusqu'à obtenir une valeur de la machine proche ;(répondante au cahier des charges).

II.1. Cahier des charges :

Le cahier des charges d'un moteur est composé de deux parties complémentaires :

- d'une part, la spécification des performances qui définira la caractéristique électromécanique du moteur ;
- d'autre part, les contraintes de dimensionnement et le mode de fonctionnement qui sera imposé par l'application à laquelle on le destine lorsque celle-ci est connue.

Le circuit magnétique à dimensionner est celui d'un moteur asynchrone triphasé à cage, dont les données sont comme suit :

- La puissance nominale : $P_n = 30\text{Kw}$
- Hauteur d'axe :207 mm.
- Diamètre extérieur :310 mm
- Classe d'isolation :F
- Le courant nominal absorbé : $I_{n1} = 60\text{ A}$.
- Le nombre de pôles : $2p = 4$.
- Les tensions nominales à 50 Hz: $U_{n1} = 220\text{-}380\text{ V}$
- Le rendement :91.5 %.
- Vitesse de rotation : $N = 1470\text{ tr/min}$.
- Le facteur de puissance : $\cos \varphi = 0,83$.
- La densité de courant : $J = 4\text{ (A/mm}^2\text{)}$.

II.2.Calcul électromagnétique :

Pour déterminer les dimensions de la machine asynchrone il faut prendre compte des caractéristiques techniques et des contraintes électromagnétiques.

II.2.1. Dimensionnement du moteur asynchrone à double cage :

Nous déterminons les dimensions géométriques et électriques des différentes parties du moteur toutes en respectant les contraintes électromagnétiques et les critères techniques, exigés.

Et ce dimensionnement nous permet de caractériser simplement la machine et faire une étude et un calcul de fonctionnement.

II.2.1.1. Dimensionnement du stator :

Le stator est dimensionné de la façon suivante

a) Puissance électromagnétique :

C'est la puissance transmise du stator vers le rotor a travers l'entrefer, elle est donnée par la formule suivante :

$$Pe = ke \cdot \frac{P_n}{\cos(\varphi_n) \cdot \eta_n} \quad [\text{KW}] \quad (1.1)$$

P_n : est la puissance utile de moteur en [kw].

$\cos(\varphi_n)$: Facteur de puissance.

η_n : Rendement nominale de la machine.

ke : Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans le stator, donné par la formule suivante :

$$k_e = 0,98 - (5 \cdot P \cdot 10^{-3}) \quad (1.2)$$

b) Longueur virtuelle de l'induit :

Elle est donnée par :

$$Li = \frac{6,1 \cdot Pe \cdot 10^{12}}{(\alpha_i \cdot K_f \cdot N \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot K_{en1})} \quad [\text{mm}] \quad (1.3)$$

Où :

α_i : Coefficient de recouvrement polaire.

k_f : Facteur de forme de la courbe d'induction.

N : vitesse de rotation de synchronisme donné par la formule suivante :

$$N = \frac{60 \cdot f_1}{P} \quad [\text{tr/min}] \quad (1.4)$$

D_1 : Diamètre intérieur du stator.

Le rapport entre le diamètre extérieur du stator et son diamètre intérieur, pour un nombre de pôles donné se situe habituellement entre certaines limites, le tableau de l'annexe 1 indique les plages correspondant en fonction du nombre de pôles.

Pour $2.P=4$ on a $\frac{D_{ext}}{D_1}$ est entre 1.45 à 1.55

A_1 : Charge linéaire est extraite de la figure II-1(Annexe 8)

B_δ : Induction dans l'entrefer en tesla

Φ : Le flux sous un pôle donné par la formule suivante :

$$\Phi = \frac{k_e \cdot U_{n1}}{4 \cdot k_f \cdot w_1 \cdot f_1 \cdot k_{en1}} \quad [\text{Weber}] \quad (1.5)$$

k_{en1} : Facteur de bobinage de l'enroulement statorique, il est donnée par :

$$k_{en1} = k_{d1} \cdot k_{r1} \cdot k_{ob} \quad (1.6)$$

k_{d1} : Coefficient de distribution, donné par :

$$k_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1 \cdot q_1}\right)} \quad (1.7)$$

k_{r1} : Coefficient de raccourcissement polaire, donnée comme suit :

$$k_{r1} = \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \quad (1.8)$$

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

$$k_{ob} = \frac{\sin(\alpha_{ob})}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \quad (1.9)$$

Avec :

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

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot P \cdot \pi \cdot \beta_{ob}}{z_2} \quad [\text{rad}] \quad (1.10)$$

β_{ob} : Rapport des pas dentaires statoriques et rotoriques, donné par :

$$\beta_{ob} = \frac{t_1}{t_2} \quad (1.11)$$

β : Rapport de raccourcissement.

• **Coefficient de longueur :**

C'est le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la tôle du stator :

$$\lambda_i = \frac{L_i}{D_1} \quad 0.7 \leq \lambda_i \leq 1.3 \quad (1.12)$$

• **Pas polaire :**

C'est la distance entre deux axes de pôles voisins distincts, il est donné par :

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (1.13)$$

Avec :

P : Nombre de paires de pôles.

• **Pas polaires en nombre d'encoche :**

$$\tau_p = \frac{Z_1}{2 \cdot p} \quad (1.14)$$

• **Pas dentaire :**

Le pas dentaire est la distance entre les axes des deux encoches voisines. Il est donnée par :

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{z_1} \quad [\text{mm}] \quad (1.15)$$

t_1 : Peut être pris dans les limites suivantes.

$$10 \leq t_1 \leq 45$$

Les valeurs les plus basses sont relatives aux machines à moyenne puissance.

Avec :

z_1 : Nombre d'encoches statoriques.

c) Courant nominale :

Il est donné par la formule suivante :

$$I_{n1} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 n_n \cdot \cos(\varphi_n) U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (1.16)$$

Où :

m_1 : Nombre de phase statoriques

U_{n1} : La tension nominale en [volts].

d) Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche :

Le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche est donné par la formule suivante :

$$U_{en1} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \quad (1.17)$$

Où : a_1 : Nombre de voies parallèles.

e) Nombre de spires d'une voie parallèle :

Il est donné par la formule suivante :

$$w_1 = \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{en1}}{a_1} \quad (1.18)$$

- **Angle électrique entre deux encoches adjacentes :**

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad (1.19)$$

- **Nombre d'encoche par pôle et par phase :**

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (1.20)$$

- **Pas de la section de l'enroulement :**

C'est la distance entre deux faisceaux de la même section qui se suivent.

$$y_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p} - \varepsilon \quad (1.21)$$

Où :

ε : La valeur du raccourcissement du pas d'enroulement.

f) Section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement:

Elle est calculée par la formule suivante :

$$S_{eff1} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.22)$$

Avec :

J_1 : La densité de courant dans les enroulements statorique en A/mm^2 . Varie de [1.5÷15]

Elle est représentée par la figure II.2 (Annexe 8).

Le choix de J_1 influe sur les pertes joules et le rendement. Néanmoins, on ne descend guère au dessous de 2,5 [A/mm²] (grosses machines) même si on dépasse parfois 9 [A/mm²] pour les petites machines bien ventilées.

Cependant du point de vue rendement, il est avantageux de choisir les valeurs relativement basses

a_1 : Est le nombre de branches parallèle de l'enroulement

Pour une disposition plus commode de fils dans l'encoche, il est recommandé de réduire la section S_{eff1} . Pour cela, nous connectons les bobines en deux circuits en parallèle

($a_1=2$)

Remarque :

Conformément à la nécessité de réduire la section effective S_{eff} , de point de vue technologique, il est recommandé d'avoir $S_{eff} \leq 1,767$ [mm²].

Dans le cas contraire, on subdivise la section effective S_{eff} en section élémentaires. et comme la section des conducteurs est normalisée, on choisira la section standard la plus proche de celle calculée.

$$S_{el1} = \frac{S_{eff1}}{N_{el}} \quad [mm^2] \quad (1.23)$$

Où :

N_{el} -Nombre de conducteurs élémentaires.

Les sections normalisées sont données par le tableau de section Normalisée (Annexe 2).

➤ Dimensionnement de la feuille statorique :

La méthode de calcul de la feuille statorique sera illustrée pour une encoche ovale.

a) Largeur de la dent :

La largeur de la dent calculée a partir de la loi de conservation du flux a travers de pas dentaire, elle est donnée comme suit :

$$b_{Z1} = \frac{t1.B\delta}{k_{fer}.B_{Z1max}} \quad [mm] \quad (1.24)$$

Avec :

k_{fer} : Coefficient de remplissage du paquet de tôles statoriques et rotorique. Il tient compte du jeu et de l'isolation entre les tôles.

$k_{fer} = 0.95$ Pour l'isolation avec oxydation.

$k_{fer} = 0.97$ Pour l'isolation en vernis.

B_{Z1max} : Induction maximale dans la dent statorique, varie entre 1.75 et 2 [T]

b) Hauteur de la culasse du stator :

La hauteur du dos du stator est donnée par la formule suivante :

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_{\delta}}{k_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [\text{mm}] \quad (1.25)$$

B_{c1} : Induction magnétique de crête dans la culasse du stator. Elle varie entre 1.5 et 1.65 [T]

c) Hauteur de la dent :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$h_{z1} = 0.5(D_m - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (1.26)$$

D_m : Diamètre médium du stator. Donné par la relation suivante :

$$D_m = \frac{D_{ext} + D_1}{2} \quad [\text{mm}] \quad (1.27)$$

d) Section de l'encoche statorique :

La section occupée par les conducteurs est donnée par la relation suivant :

$$S_{enc1} = (h_{en1} \cdot b_{en1}) - S_{eniso1} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.28)$$

Avec :

S_{eniso1} : La section transversale occupée par l'isolation de l'encoche

$$S_{eniso1} = \mu_{iso} \cdot \delta \quad [\text{mm}^2] \quad (1.29)$$

μ_{iso} : Le diamètre de l'isolation de l'encoche en [mm].

δ : est l'épaisseur de l'entrefer en mm.

h_{en1} : Est la hauteur de l'encoche statorique en [mm], donnée par la formule suivante :

$$h_{en1} = h_{z1} - h_{f1} - h_{k1} \quad [\text{mm}] \quad (1.30)$$

Tel que :

h_{f1} : Est la hauteur de la fonte statorique.

h_{k1} : Est la hauteur de la clavette statorique.

b_{en1} : Est la largeur de l'encoche statorique en [mm], donnée par la formule suivante :

$$b_{en1} = t_{1min} - b_{z1min} \quad [\text{mm}] \quad (1.31)$$

Tel que :

t_{1min} : est le pas dentaire statorique minimal, donné comme suit :

$$t_{1min} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{f1} + 2 \cdot h_{k1})}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (1.32)$$

$$b_{z1min} = \frac{t_{1min} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1max}} \quad [\text{mm}] \quad (1.33)$$

e) Coefficient de remplissage :

Le coefficient de remplissage est défini comme étant le rapport de la section des conducteurs occupants l'encoche et la section utile de l'encoche, il doit varier dans l'intervalle (0.7÷0.75), il est donné par la relation suivante :

$$k_{re1} = \frac{N_{el} \cdot U_{en1} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad (1.34)$$

Avec : d_{iso} est le diamètre des conducteurs avec isolation en [mm]

g) Vérification des charges électromagnétiques :

Après avoir calculé le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et choisi la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire A_1 , l'induction B_δ et flux. La différence relative entre la valeur préliminaire ne doit pas dépasser les 10%.

• Charge linéaire :

La charge linéaire et le courant total dans la partie d'encoche par unité de longueur de périmètre du stator.

Après avoir calculé le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche et choisi la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire A_1 , le flux Φ et l'induction B_δ .

La différence relative entre la valeur recalculée et la valeur préliminaire ne doit pas dépasser les 10%

$$A_1 = \frac{I_{n1} \cdot Z_1 \cdot U_{enc1}}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad [\text{A/m}] \quad (1.35)$$

Z_1 : Est le nombre d'encoches statoriques.

- **Flux sous un pôle:**

$$\Phi = \frac{k_e \cdot U_{n1}}{4 \cdot k_f \cdot w_1 \cdot f_1 \cdot k_{en1}} \quad [\text{weber}] \quad (1.36)$$

- **Induction magnétique dans l'entrefer :**

L'induction magnétique dans l'entrefer est l'un des paramètres les plus importants dans la construction des machines électriques tournantes. Il caractérise l'utilisation magnétique de la machine ; il est limité par les propriétés magnétiques des matériaux actifs utilisés. Cette induction est généralement comprise entre 0.6 et 0.9 Tesla. Elle s'exprime à partir de la formule suivante :

$$B_\delta = \frac{\varnothing}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [\text{T}] \quad (1.37)$$

II.2.1.2. dimensionnement du rotor :

a) Choix du nombre d'encoches rotoriques :

Pour un moteur asynchrone, il est très important de bien choisir le nombre d'encoches du rotor, afin d'éviter la présence de vibration, de bruit magnétique qui est créée par l'attraction entre les dents du stator et les dents du rotor, ainsi que la pulsation périodique du flux. Ces effets indésirables sont principalement causés par la présence d'harmoniques dans le flux de l'entrefer. L'ordre de l'amplitude de ses harmoniques est fonction du rapport entre le nombre d'encoches du stator et le nombre d'encoche du rotor.

Le nombre d'encoches du rotor ne doit jamais être égal à celui du stator, il peut être plus grand mais il est généralement plus petit dans les rotors à cage d'écureuil. On obtient habituellement des bons résultats pour un écart entre 15 et 30%.

b) Diamètre extérieur du rotor :

Connaissons l'épaisseur de l'entrefer (δ) et le diamètre intérieur du stator, le diamètre extérieur du rotor sera alors déterminé par l'expression suivante :

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad [\text{mm}] \quad (1.38)$$

- **Pas dentaire rotorique :**

Le pas dentaire rotorique est défini comme étant distance séparant les axes de deux encoches rotoriques voisines. Il est donné par la formule suivante.

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (1.39)$$

Z_2 : est le nombre d'encoches rotoriques

D_2 : est le diamètre extérieur du rotor en [mm].

c) Courant dans la barre :

En générale, le courant dans la barre de l'enroulement du rotor est donné par :

$$I_2 = \frac{1.11.I_{n1}.6.w_1.\cos(\varphi_n).k_{enc1}}{z_2} \quad [\text{A}] \quad (1.40)$$

Avec:

I_{n1} Est le courant nominal statorique.

w_1 Est le nombre de bobinage d'enroulement statorique.

k_{enc1} Est le facteur de bobinage d'enroulement statorique.

$\cos(\varphi_n)$ Est le facteur de puissance nominal.

➤ Dimensionnement de la feuille rotorique :

Les feuilles rotoriques est dimensionné comme suit :

• Hauteur de la culasse rotorique :

La hauteur de la culasse rotorique est donnée par la formule suivante :

$$h_{c2} = \frac{0.5.\alpha_i.\tau_{p2}.B_\delta}{k_{fer}.B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad (1.41)$$

Où : B_{c2} est l'induction dans la culasse rotorique, elle varie entre [1,15÷1.25] [T]

• Pas polaire rotorique :

$$\tau_{p2} = \frac{\pi.D_2}{2.p} \quad [\text{mm}] \quad (1.42)$$

a) Hauteur de la dent rotorique :

La hauteur de la dent est donnée par la formule suivante :

$$h_{z2} = 0.5.(D_2 - D_{anr}) - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (1.43)$$

h_{c2} : est la hauteur de la culasse rotorique

D_{anr} : Diamètre de l'arbre

b) La largeur de la dent :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$b_{z2} = \frac{t_2.B_\delta}{k_{fer}.B_{z2max}} \quad [\text{mm}] \quad (1.44)$$

Avec :

B_{z2max} : Induction admissible dans les dents rotoriques, elle varie entre [1.75÷ 1.95] [T]

c) La largeur minimale de la dent :

La largeur de la dent est exprimée par l'expression suivante :

$$b_{z2min} = \frac{t_{2min} \cdot B_{\delta}}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \quad [\text{mm}] \quad (1.45)$$

t_{2min} : Le pas dentaire minimal au rotor en [mm] calculé comme suit :

$$t_{2min} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{z2})}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (1.46)$$

d) Calcul de la largeur de l'encoche rotorique :

La largeur de l'encoche rotorique est calculée comme suit :

$$b_{en2} = t_{2min} - b_{z2min} \quad [\text{mm}] \quad (1.47)$$

e) La hauteur de l'encoche rotorique

$$h_{en2} = b_{z2} - h_{f2} \quad [\text{mm}] \quad (1.48)$$

Avec :

h_{f2} : est la hauteur de la fente de l'encoche rotorique

f) La section de l'encoche rotorique :

$$S_{en2} = h_{en2} \cdot b_{en2} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.49)$$

g) Section de la barre rotorique:

Elles sont données en fonction des dimensions de l'encoche :

$$S_b = 0.125 \cdot \pi (d_{enc21}^2 + d_{enc2}^2) + 0.5 (d_{enc21} + d_{enc2}) \cdot h_2 \quad [\text{mm}^2] \quad (1.50)$$

Avec :

d_{enc21} : est le diamètre supérieur de l'encoche rotorique en [mm] donné par la formule suivante :

$$d_{enc21} = \frac{|\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{f2}) - Z_2 \cdot b_{z2}|}{(Z_2 + \pi)} \quad [\text{mm}] \quad (1.51)$$

d_{enc2} : Diamètre inférieur de l'encoche rotorique en [mm] donné par la relation suivante :

$$d_{enc2} = \frac{|\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{z2}) - Z_2 \cdot b_{z2}|}{(Z_2 - \pi)} \quad [\text{mm}] \quad (1.52)$$

$$h_2 = (h_{z2} - h_{f2}) - 0,5 \cdot (d_{enc21} + d_{enc2}) \quad [\text{mm}] \quad (1.53)$$

• **Densité de courant dans la barre**

$$J_b = \frac{I_2}{s_b} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (1.54)$$

En considération du meilleur refroidissement dans le rotor, la densité de courant (J_b) est supérieure à celle du stator J_1

J_b Prend des valeurs allant de 4 à 6 [A/mm²]

➤ **Dimensionnement des anneaux de court circuit :**

Les anneaux de court sont dimensionnés comme suit :

a) La hauteur de l'anneau :

La hauteur de l'anneau est dimensionnée de la manière suivante :

$$h_{an} = (1,1 \div 1,25) \cdot h_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (1.55)$$

b) La section de l'anneau :

La section de l'anneau est donnée par la formule suivante :

$$S_{an} = (0,35 \div 0,45) \cdot \frac{Z_2 \cdot s_b}{2 \cdot P} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.56)$$

c) Largeur de l'anneau :

La largeur de l'anneau s'exprime comme suit

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [\text{mm}] \quad (1.57)$$

d) Diamètre moyen de l'anneau :

$$D_{an} = (D_2 - h_{an}) \quad [\text{mm}] \quad (1.58)$$

II.3. calcul de circuit magnétique :

Le circuit magnétique des machines à courant alternatif en général, et les machines asynchrones en particulier, doit canaliser les lignes de forces du champ magnétique tournant.

L'objet de ce calcul consiste à déterminer les forces magnétomotrices (Fmm) qui nous permettra de calculer le courant magnétisant et de déduire par la suite la réactance de magnétisation. Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique ; $\oint H \cdot dl$, qui se ramène dans notre cas à la somme des $(\sum H_x \cdot l_x)$.

Où :

H_x : représente l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans le tronçon x ; il est donné en [A/m].

l_x : représente la ligne moyenne du tronçon choisi en [m].

Le calcul du champ magnétique sera fait pour une paire de pôles

Le circuit magnétique de la machine asynchrone est constitué de cinq parties distinctes suivant:

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

Pour pouvoir déterminer les intensités de champ magnétique dans les différentes parties de la machine, il faut au préalable calculer les inductions dans ces tronçons.

II.3.1. circuit magnétique statorique :

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

a) La longueur moyenne des lignes des champs dans la culasse statorique :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2P} (D_{ext} - h_{c1}) \quad [\text{mm}] \quad (2.1)$$

b) Force magnétomotrice dans la culasse statorique :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (2.2)$$

Avec :

H_{c1} : L'intensité du champ magnétique dans la culasse statorique qui correspond à l'induction B_{c1} . Représenté dans le tableau de l'annexe 3

c) Force magnétomotrice dans la dent du stator :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{z1} = H_{z1moy} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (2.3)$$

Où:

h_{z1} Est la hauteur de la dent statorique en [mm].

H_{z1moy} Est l'intensité du champ magnétique moyen de la dent statorique déterminée par la formule de SYMPSON

$$H_{z1moy} = \frac{H_{z1max} + 4 \cdot H_{zmoy1} + H_{z1min}}{6} \quad [\text{A/m}] \quad (2.4)$$

H_{z1max} : L'intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur minimale de la dent statorique qui correspond à l'induction B_{z1max} . Représenté dans le tableau de l'annexe 4

H_{z1min} : L'intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur maximale de la dent statorique qui correspond à l'induction B_{z1min} et qui est donné par la formule suivante

$$B_{z1min} = (t_{1max} \cdot B_{\delta}) / (k_{fer} \cdot b_{z1max})$$

H_{z1min} : est représenté dans le tableau de l'annexe 4.

Avec :

t_{1max} : est le pas dentaire maximum au stator. S'exprime par la formule suivante :

$$t_{1max} = \pi \cdot \frac{D_1 + 2 \cdot h_{z1}}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (2.5)$$

b_{z1max} : est la largeur maximale de la dent statorique .calculée comme suit :

$$b_{z1max} = t_{1max} - b_{enc1} \quad [\text{mm}] \quad (2.6)$$

H_{zmoy1} : L'intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur moyenne de la dent statorique, calculée comme suit :

$$H_{zmoy1} = \frac{H_{z1max} + H_{z1min}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (2.7)$$

II.3.2. circuit magnétique rotorique :

Pour pouvoir calculer le circuit magnétique rotorique d'une machine asynchrone il faut procéder de la manière suivante on tenant compte des données :

a) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (2.8)$$

• Longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \frac{\pi}{2P} + h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (2.9)$$

Avec :

h_{z2} : est la hauteur de la dent rotorique en [mm]

h_{c2} : est hauteur de la culasse rotorique en [mm]

H_{c2} : est l'intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction B_{c2} . (tableau de l'annexe3)

b) Force magnétomotrice dans la dent du rotor :

Pour le type d'encoche utilisé on a :

$$F_{z2} = H_{z2moy} \cdot L_{z2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (2.10)$$

Où:

$$L_{z2} = h_{z2}.$$

H_{z2moy} : Est l'intensité du champ magnétique dans la dent rotorique qui est donnée par la formule suivante :

$$H_{z2moy} = \frac{H_{z2max} + 4 \cdot H_{z2moy2} + H_{z2min}}{6} \quad [\text{A/m}] \quad (2.11)$$

Avec:

H_{z2max} : Intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur minimale de la dent rotorique, correspond à B_{z2max} (tableau de l'annexe 4).

H_{z2min} : Intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur maximale de la dent rotorique, correspond à B_{z2moy} . (Tableau de l'annexe 4).

$$B_{z2min} = \frac{t_{2max} \cdot B_{\delta}}{K_{fer} \cdot b_{z2max}} \quad [\text{T}] \quad (2.12)$$

Avec :

t_{2max} : est le pas dentaire maximal au rotor en [mm], calculé comme suit :

$$t_{2max} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_{f2}}{z_2} \quad [\text{mm}] \quad (2.13)$$

b_{z1max} : est la largeur maximale de la dent statorique .calculée comme suit :

$$b_{z2max} = t_{2max} - b_{enc2} \quad [\text{mm}] \quad (2.14)$$

H_{zmoy2} : Intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur moyenne de la dent rotorique, calculée comme suit :

$$H_{zmoy2} = \frac{H_{z2max} + H_{z2min}}{2} \quad [\text{A/m}] \quad (2.15)$$

II.3.2.1. force magnétomotrice dans l'entrefer :

La force magnétomotrice dans l'entrefer est proportionnelle à l'induction dans celui-ci

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{+3} \quad [\text{A}] \quad (2.16)$$

Avec : K_{δ} est le coefficient de CARTER qui tient compte de la non-uniformité dans l'entrefer, due aux ouvertures des encoches statoriques et rotoriques. Il est donné par la relation suivante :

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad (2.15)$$

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}}} \quad (2.16)$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}}} \quad (2.17)$$

Où : b_{f1} et b_{f2} sont respectivement les largeurs des fentes des dents statoriques et rotoriques en [mm].

II.3.2.2. force magnétomotrice totale par paire de pôle :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum Fi = 2 \cdot (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [\text{A}] \quad (2.18)$$

Le numéro 2 est du au fait que l'entrefer, les dents statoriques et rotoriques sont parcourus deux fois par les lignes de champs magnétique.

Les valeurs des champs magnétiques sont données en fonction des inductions par les tableaux de l'annexe 3 et 4.

II.3.3. Coefficients de saturation

Ils sont donnés comme suit :

a) Coefficient de saturation des dents

Il est donné par la formule suivante :

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad (2.19)$$

b) Coefficient de saturation de la machine

Il est donné comme suit :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{2F_{\delta}} \quad (2.20)$$

II.3.4. Courant magnétisant

Il représente la composante réactive du courant à vide, il est donné par la formule suivante :

$$I_{\mu} = \frac{P \cdot \sum F_i}{0.9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{enc1}} \quad [A] \quad (2.21)$$

Pour avoir des bonnes performances il faut s'assurer que le courant magnétisant ne dépassant pas 10% du courant nominale.

II.3.5. Réactance de magnétisation:

Elle est donnée par la relation suivante :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad [\Omega] \quad (2.22)$$

K_e : Facteur de majoration, il varie entre 0.9 et 0.98

II.3.6. coefficient de dispersion magnétique du stator :

Il est donné par la formule suivante :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m} \quad (2.23)$$

Avec :

X_1 Est la réactance inductive de dispersion d'une phase de l'enroulement statorique.

II.3.7. force électromotrice à vide :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{1+\sigma\mu} \quad [\text{V}] \quad (2.24)$$

Pour avoir des bonnes performances il faut s'assurer que la différence entre E_0 et U_{n1} est supérieur à 5% de U_{n1} .

II.4. calcul des paramètres électriques des enroulements :

Pour pouvoir déterminer les caractéristiques de la machine on procédera au calcul de tous les paramètres suivants ($R_1, R_2, X_1, X_2, R'_2, X'_2$).

II.4.1. paramètres statoriques :

Le calcul des paramètres statoriques s'effectue comme suit :

a) Résistance active d'une phase du stator :

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \cdot \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^{+3}}{\alpha_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}} \quad [\Omega] \quad (3.1)$$

Avec S_{elt1} : est la section standard d'un conducteur.

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

$$T=20^{\circ}\text{C} \quad \rho_{cu} = 17,2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$T=115^{\circ}\text{C} \quad \rho_{cu} = 24,4 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$T=75^{\circ}\text{C} \quad \rho_{cu} = 21,3 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

Avec :

L_{w1} : est la longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, calculée comme suit :

$$L_{w1} = 2 \cdot (L_1 + L_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad (3.2)$$

Où :

L_1 Est la longueur de l'induit ($L_1 \approx L_i$).

L_{f1} : Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi spire; telle que

$$L_{f1} = (1.16 + 0.14 \cdot P) \cdot b_{1moy} + 15 \quad [\text{mm}] \quad (3.3)$$

b_{1moy} : Largeur moyenne d'une section. Donné par la formule suivante :

$$b_{1moy} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot y_{1moy}}{z_1} \quad [\text{mm}] \quad (3.4)$$

y_{1moy} : Le pas moyen d'un groupe de section.

b) Réactances de fuites et perméances de fuites du stator :

La réactance de fuite globale du stator comprend :

- **Réactance de fuite d'encoche :**

Elle est due aux flux de fuite qui se ferme autour des conducteurs :

$$X_{enc1} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot w_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_{enc1} \quad [\Omega] \quad (3.5)$$

- **Réactance de fuite différentielle :**

C'est le résultat des flux suivants

- flux de fuite de dent à dent a dent a travers l'entrefer.
- flux différentielle de phase.
- Flux différentielle de l'encoche.

Elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot w_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad (3.6)$$

- **Réactance de fuite frontale :**

C'est la réactance présentée par les parties frontales des enroulements situés dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles. Elle est donnée par :

$$X_{1f} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot w_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad (3.7)$$

La réactance est donnée par :

$$X_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_i \cdot w_1^2}{q_1 \cdot p \cdot 10^8} \cdot \lambda_1 \quad [\Omega] \quad (3.8)$$

Avec :

λ_1 : Perméance de dispersion de l'enroulement statorique, elle est calculée comme suit :

$$\lambda_1 = \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \quad (3.9)$$

λ_{enc1} : Perméance d'encoche elle est donnée par :

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1 \cdot k_{B1}}{3 \cdot b_{enc1}} + \left(\frac{h'_1}{b_{enc1}} + 3 \cdot \frac{h_{k1}}{b_{enc1} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot k_{B2} \quad (3.10)$$

Où :

k_{B1}, k_{B2} : Coefficients donnés suivant la figure la figure II.3(l'annexe 8) , ils sont en fonction de rapport de raccourcissement β .

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_{k1}, h_{f1} : Respectivement hauteur de la clavette et de la fonte statorique.

λ_{1d} : Perméance différentielle proportionnelle à la réactance de fuite différentielle, elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0.9 t_1 \cdot q_1^2 \cdot k_{en1}^2}{k_\delta \cdot \delta} \cdot k_{rr1} \cdot k_{dd1} \cdot k_{r1} \quad (3.11)$$

$$k_{r1} = 1 - \frac{0.033 \cdot b_{f1}^2}{\delta \cdot t_1} \quad (3.12)$$

Où : q_1 : coefficient qui dépend de la hauteur d'axe et du nombre de paires de pôles, tableaux de l'annexe 6.

k_{rr1} : Coefficient qui dépend de q_1 , tableau de l'annexe 7

k_{dd1} : Coefficient de fuite différentielle donné en fonction de $\frac{Z_2}{p}$ et q_1 , tableau de l'annexe 5

λ_{1f} : Perméance frontale proportionnelle à la réactance de fuite frontale, elle est donnée par l'expression suivante :

$$\lambda_{1f} = 0,34 \frac{q_1 \cdot (l_{f1} - 0.64 \beta \cdot \tau_{p1})}{l_i} \quad [\Omega] \quad (3.13)$$

II.4.2. Paramètres rotoriques :

Le rotor contient des paramètres électriques qui permettent de définir et comprendre le fonctionnement d'un moteur asynchrone.

II.4.2.1. Résistances actives des cages :

$$k_{red} = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) \quad (4.1)$$

k_{red} : Coefficient de réduction.

a) Résistance active de la barre rotorique

Elle est donnée par :

$$R_b = \rho_{cu}(T) \cdot \frac{k_{pp} \cdot l_i \cdot 10^3}{s_b} \quad [\Omega] \quad (4.2)$$

$$T=75^\circ\text{c} \quad \rho_{cu}(T) = 21,3 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$T=115^\circ\text{c} \quad \rho_{cu}(T) = 24,4 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$k_{pp} = \frac{S_b}{S_{pp}}$$

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 $S_{pp} = S_p$.

• Résistance de la partie de l'anneau qui se situe entre deux barres voisines

Elle se calcul par l'expression suivante :

$$R_{an} = \rho_{cu}(T) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{anmoy} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot S_{an}} \quad [\Omega] \quad (4.3)$$

Avec :

S_{an} : Est la section de l'anneau de court-circuit [mm^2].

Z_2 : Nombre d'encoches rotoriques.

D_{anmoy} : Diamètre moyen de l'anneau [mm].

• Resistance de l'anneau ramenée à la barre :

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

$$R''_{an} = \frac{R_{an}}{k_{red2}^2} \quad [\Omega] \quad (4.4)$$

Avec :

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

$$\text{Pour : } \frac{Z_2}{2 \cdot p} < 6 \quad k_{red2}^2 = 2 \cdot \sin\left(\frac{180^\circ \cdot P}{Z_2}\right)$$

$$\text{Pour : } \frac{Z_2}{2 \cdot p} \geq 6 \quad k_{red2}^2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot P}{Z_2}$$

- **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 :

$$R_2 = R_b + R''_{an} \quad [\Omega] \quad (4.5)$$

- **Resistance de la cage ramenée au stator :**

$$R'_2 = K_{red1} \cdot (R_b + R''_{an}) \quad [\Omega] \quad (4.6)$$

Avec :

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

$$K_{red1} = \left(\frac{4 \cdot m_1}{Z_2} \right) \cdot \left(w_1 \cdot \frac{k_{en1}}{k_{ob}} \right)^2 \quad (4.7)$$

II.4.2.2. 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 :

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (4.11)$$

Avec :

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

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (4.12)$$

λ_{2enc} , λ_{2d} , λ_{2f} , λ_{ob} : sont respectivement les perméances d'encoche, différentielle, frontale et oblique, elles sont donnée par les formule suivantes :

- **Perméance d'encoche :**

$$\lambda_{2enc} = C_\lambda + \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right) \quad (4.13)$$

Avec :

$$C_{\lambda} = \psi \cdot \left[\frac{(h_{enc2} + 0.4 \cdot b_{enc2})^2}{(3 \cdot S_b)^2} \cdot \frac{(1 - \pi \cdot b_{enc2})^2}{(8 \cdot S_b)^2} + 0.66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot b_{enc2}} \right) \right] \quad (4.14)$$

$\psi = f(\xi)$: Donnée par la courbe de l'annexe 7 figure (II.4).

- **Perméance différentielle :**

La perméance de dispersion différentielle est donnée par :

$$\lambda_{dd2} = 0.9 \cdot \tau_2 \cdot \frac{\left(\frac{Z_2}{2 \cdot p} \right)^2}{\delta \cdot K_{\delta}} \cdot k_{dd2} \quad (4.15)$$

Avec :

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

$$q_2 = \frac{Z_2}{3 \cdot 2 \cdot P} \quad (4.16)$$

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

$$K_{dd2} = \frac{9.15}{100 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot p} \right)^2} \quad (4.17)$$

- **Perméance frontale :**

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

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3 \cdot D_{anmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot k_{red2}^2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{anmoy}}{2(h_{an} + b_{an})} \right) \quad (4.18)$$

- **Perméance d'inclinaison d'encoche rotorique :**

$$\lambda_{ob} = \frac{\tau_2 \cdot (\beta_{ob})^2}{9.5 \cdot \delta \cdot K_{\delta} \cdot k_{\mu}} \quad (4.19)$$

Avec :

k_{μ} : Coefficient de saturation de la machine.

- **Réactance de fuite de l'enroulement rotorique ramenée a l'enroulement statorique :**

Elle est donnée par la formule suivante :

$$X_2' = K_{red1} \cdot X_2 \quad [\Omega] \quad (4.20)$$

II.4.3. Paramètres au 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 ($f=50$ Hz); la profondeur de pénétration du courant est alors faible (effet refoulement des courants) ; seule la partie supérieure des barres est le siège des courants induits d'où une forte résistance de la cage au démarrage.

Avec l'augmentation de la vitesse, le glissement diminue et par conséquent, la fréquence du champ ($f_r=g \cdot f_s$), donc la profondeur de pénétration augmente et la résistance de la cage diminue.

a) Profondeur de pénétration :

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1+\varphi_1} \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

Où :

h_b Est la hauteur de la barre.

φ_1 : Coefficient qui dépend de la valeur de

$$\xi_1 = 0.064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g_d} \quad (5.2)$$

b) La largeur de la barre pénétrée par le courant de démarrage :

$$b_{pp} = \left(h_{pp} - \frac{b_{enc2}}{2} \right) - b_{enc2} \quad [\text{mm}] \quad (5.3)$$

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

Elle est donnée par :

$$S_{bdem} = S_{enc2} - S_{nonpén} \quad [\text{mm}^2] \quad (5.4)$$

Avec :

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

$$S_{nonpén} = (b_{enc2} - b_{pp}) \cdot (h_{enc2} - h_{pp}) \quad [\text{mm}^2] \quad (5.5)$$

d) Résistance de la barre au démarrage :

Pour le type d'encoche donnée on a :

$$R_{bdm} = R_b \cdot k_{dep} \quad [\Omega] \quad (5.6)$$

Où : k_{dep} est le coefficient de déplacement du courant, c'est le rapport entre la section de la barre totale et la section de la barre au démarrage.

$$k_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad (5.7)$$

e) Résistance de la cage au démarrage

Elle est donnée par :

$$R_{2dem} = R_{an}'' + R_{bdem} \quad [\Omega] \quad (5.8)$$

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

Elle est donnée par :

$$R_{2dem}' = K_{red1} \cdot R_{2dem} \quad [\Omega] \quad (5.9)$$

g) Réactance de fuite au démarrage :

Pour le type d'encoche utilisé on a :

$$X_{2dem} = 7.9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot \lambda_{2dem} \cdot 10^{-9} \quad [\Omega] \quad (5.10)$$

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

$$\lambda_{2dem} = \lambda_{endem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (5.11)$$

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

$$\lambda_{2encdem} = C_\lambda + \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}}\right) \quad (5.12)$$

$$C_\lambda = \psi \cdot \left[\frac{(h_{enc2} + 0.4 \cdot b_{enc2})^2}{(3 \cdot S_b)^2} \cdot \frac{(1 - \pi \cdot b_{enc2})^2}{(8 \cdot S_b)^2} + 0.66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot b_{enc2}}\right) \right] \quad (5.13)$$

ψ : Donnée sur la courbe(II.4) de l'annexe 8.

h) Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator :

Elle se calcul comme suit :

$$X_{2dem}' = K_{red1} \cdot X_{2dem} \quad [\Omega] \quad (5.14)$$

II.4.4. Calcul des pertes et du rendement :

Pour chaque norme, il existe plusieurs méthodes de détermination du rendement η dont :

1. Méthode directe :

$$\eta = \frac{\text{puissance de sortie}}{\text{puissance d'entrée}}$$

2. Méthode des pertes séparée :

$$\eta = \frac{\text{puissance d'entrée} - \Sigma \text{pertes}}{\text{puissance d'entrée}}$$

La transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique s'accompagne inévitablement de perte d'énergie dans les différentes parties du moteur telles que le circuit magnétique, les enroulements statoriques et rotoriques, ainsi que les différentes parties mécaniques.

Cette partie est consacrée à l'évaluation des pertes dans le moteur asynchrone, et cela pour permettre d'estimer le rendement en sachant d'avoir aussi proche que possible de celui qui figure dans le cahier de charge.

On peut distinguer quatre groupes de pertes :

- Pertes principales dans le fer.
- Pertes électriques dans le cuivre et le bronze.
- Pertes mécaniques.
- Pertes supplémentaires.

II.4.4.1. Pertes magnétiques principales :

Ce sont les pertes qui surviennent dans le dos du stator, elles sont

a) Pertes dans les dents :

Les pertes dans les dents sont données par la formule suivante exprimées par la relation suivante :

$$P_{mz1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1}^2 \cdot G_{z1} \quad [\text{w}] \quad (6.1)$$

$$P_{1/50} = 2 \text{ [w} \cdot \text{kg}^{-1}] \text{ Pour 1T et 50Hz (acier allié 2013)}$$

$$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot k_{fer} \cdot [h_{z1} \cdot \pi (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1] \quad [\text{Kg}] \quad (6.2)$$

G_{z1} : Poids des dents statorique en [kg].

b) Pertes dans la culasse statorique :

Les Pertes dans la culasse statorique sont proportionnelles au carré de l'induction dans la culasse :

$$P_{mc1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{c1}^2 \cdot G_{c1} \quad [\text{w}] \quad (6.3)$$

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot k_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot (D_{ext} - h_{c1}) \quad [\text{Kg}] \quad (6.4)$$

G_{c1} : Poids de la culasse statorique en [Kg]

Les pertes dans le fer sont égales à la somme des pertes dans les dents et celle du dos du stator

$$P_m = P_{mc1} + P_{mz1} \quad [\text{w}] \quad (6.5)$$

II.4.4.2. Pertes électriques dans le cuivre et dans le bronze:

Ce sont les pertes par effet joules dans les enroulements statorique et rotorique. Elles sont proportionnelles au carré des courants qui circulent dans ces enroulements.

a) Pertes joules statoriques :

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

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad [\text{w}] \quad (6.6)$$

R_1 : Résistance d'une phase de l'enroulement statorique.

I_{n1} : Courant dans une phase statorique.

b) Pertes joules rotoriques :

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

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{w}] \quad (6.7)$$

Avec :

m_2 : Nombre de phases rotoriques ($m_2 = Z_2$)

I_2 : Courant dans la barre [A].

R_2 : Résistance d'une phase de l'enroulement rotorique [Ω]

II.4.4.3. Pertes mécaniques :

Les pertes mécaniques comprennent :

- Les pertes par frottement sur les paliers : ils ont un comportement compliqué qui dépend de nombreux paramètres tel que la qualité d'usinage, lubrification, etc. il est impossible de donner une formule les chiffrant précisément.
- Les pertes par ventilation et frottement avec l'air : dues au déplacement de l'air par les parties mobiles, elles sont également difficile à calculer.

Pour un moteur donné, les pertes mécaniques ne dépendent que de la vitesse. Elles sont exprimées par :

$$P_{mec} = k_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad [\text{w}] \quad (6.8)$$

Avec :

k_t : Facteur de majoration, donné en fonction de nombre de paires de pôles :

$$k_t = 1,3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3}) \quad \text{Pour } 2p=2$$

$$k_t = 1 \quad \text{Pour } 2p>2$$

II.4.4.4. Pertes supplémentaires :

Ces pertes ont pour origine le champ de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines, ainsi que les pertes liées au contact entre les barres et les tôles du rotor.

Le calcul analytique de ces pertes présentes, sur présente, sur certains points, de grandes difficultés. C'est pourquoi l'on devrait, en général, se limiter à une estimation basée sur des mesures effectuées sur des machines déjà construites. Conformément aux normes allemandes, elles sont estimées à 0,5% de la puissance absorbée par la machine.

$$P_{sup} = 0.005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad [\text{w}] \quad (6.9)$$

II.4.5. Pertes totales:

Les pertes totales s'expriment comme la somme de toutes les pertes définies précédemment :

$$P_{tot} = P_m + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad [\text{w}] \quad (6.10)$$

- Schéma de bilan de puissance et les pertes dans le moteur :

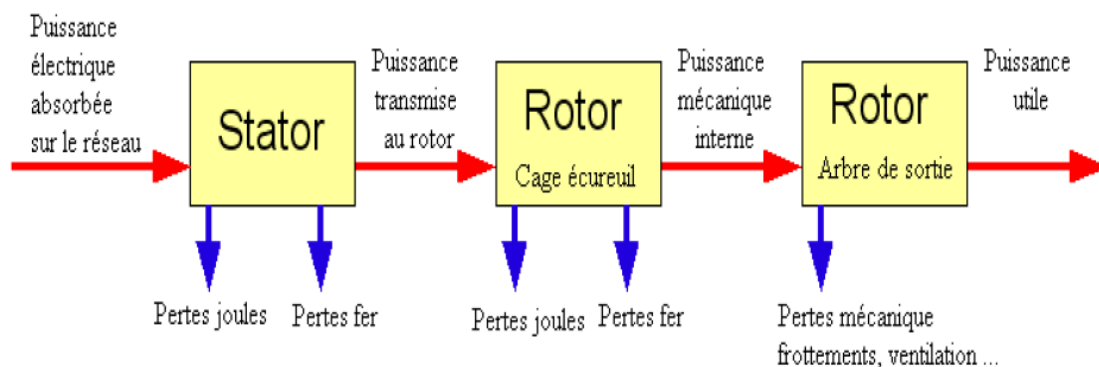


Figure.II.1 bilan des puissances d'un moteur asynchrone.

II.4.6. Rendement de la machine :

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}} \quad (6.11)$$

II.4.7. 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 :

$$I_{0a} = \frac{P_m + P_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} = \frac{P_m + P_{mec} + R_1 \cdot m_1 \cdot I_\mu^2}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (6.12)$$

D'où

$$R_m = \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{0a}} \quad [\Omega] \quad (6.13)$$

P_{a10} : Est la puissance absorbée à vide

$$P_{a10} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_\mu^2 \quad [w] \quad (6.14)$$

Avec :

I_μ : Courant magnétisant.

X_m : Réactance magnétisante.

II.4.7. Calcul des performances du moteur :

Dans cette partie de calcul, nous étudions les performances du moteur, en utilisant une méthode analytique on se basant sur le schéma équivalent de la machine asynchrone à rotor double cage.

II.4.7.1. Schéma équivalent d'un moteur à deux cages :

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator.

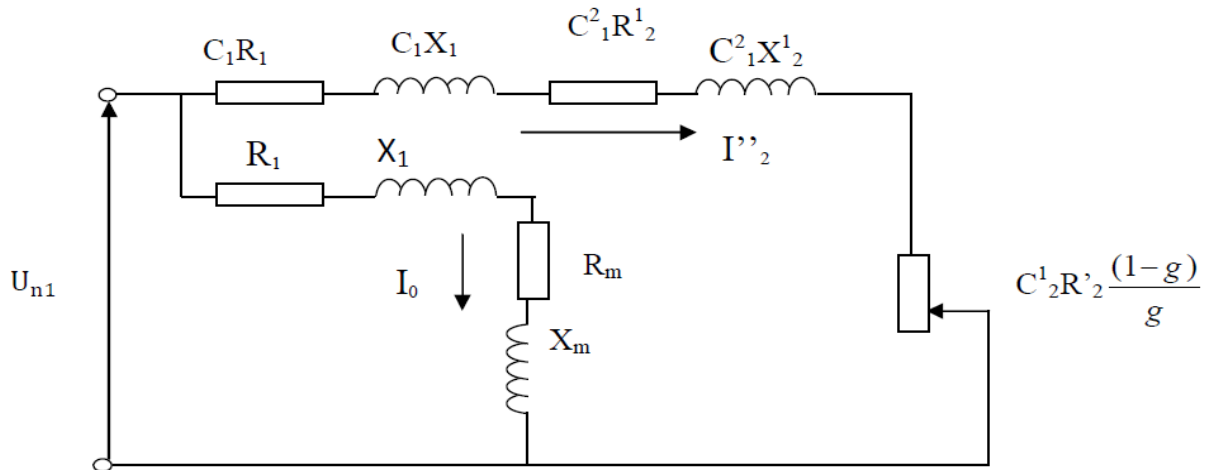


Figure. II.2 schéma équivalent en L d'un moteur asynchrone à double cage

R_1 : Résistance statorique en $[\Omega]$

X_2 : Réactance de fuite du stator en $[\Omega]$

X'_2 : Réactance de fuite du rotor ramené au stator en $[\Omega]$

R'_2 : Résistance rotorique de la barre ramené au statorique $[\Omega]$

R_m : Résistance magnétisante en $[\Omega]$

X_m : Réactance magnétique en $[\Omega]$

C_1 : Constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L. Elle est donnée par :

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad (6.15)$$

II.1.6.2 Caractéristique de fonctionnement du moteur :

Les caractéristiques de fonctionnement d'un moteur asynchrone sont :

a) Le glissement :

$$g = \frac{A - \sqrt{(A^2 - C_1^2 \cdot R_2' \cdot B)}}{B} \quad (6.16)$$

Avec :

$$B = 2 \cdot A + R' \quad (6.17)$$

$$A = \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot P_2'} - R_1 \quad (6.18)$$

$$R' = R_2' \cdot \left[\left[\frac{R_1}{R_2'} \cdot \left(1 + \frac{X_2'}{X_m} \right) \right]^2 + \left[\frac{X_1}{R_2'} \cdot \left(1 + \frac{X_2'}{X_m} \right) + \left(\frac{X_2'}{R_2'} \right) \right]^2 \right] \quad [\Omega] \quad (6.19)$$

P_2' : La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire, elle est donnée par :

$$P_2' = P_u + P_{sup} + P_{mec} \quad [W] \quad (6.20)$$

P_u : Puissance utile, calculée comme suit

$$P_u = P_1 - P_{tot} \quad [W] \quad (6.21)$$

$$P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_{n1} \cdot \cos \varphi \quad [W] \quad (6.22)$$

b) Impedance equivalente:

Elle est exprimée comme suit:

$$Z_{2eq} = \sqrt{(R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2)} \quad [\Omega] \quad (6.23)$$

$$R_{2eq} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{g} \quad [\Omega] \quad (6.24)$$

$$X_{2eq} = C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \quad [\Omega] \quad (6.25)$$

c) Calcul du courant secondaire :

Le courant dans le circuit secondaire est donné par :

$$I_2'' = \frac{U_{n1}}{Z_{2eq}} \quad [A] \quad (7.1)$$

$$I_2' = C_1 \cdot I_2'' \quad [A] \quad (7.2)$$

I_2'' – Le courant dans le circuit secondaire transformé en L.

I_2' – Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire.

d) Facteur de Puissance rotorique :

Le facteur de puissance rotorique est donnée par :

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}}$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{2eq}}{Z_{2eq}} \quad (7.3)$$

D'ou :

- **Courant actif :**

$$I''_{2a} = I''_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad [A] \quad (7.4)$$

- **Courant réactif :**

$$I''_{2r} = I''_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad [A] \quad (7.5)$$

- **Courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joules statorique à vide :**

$$I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_m}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (7.6)$$

- **Courant magnétisant :**

$$I_{0r} = \frac{P \sum F_i}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_1 K_{en1}} \quad [A] \quad (7.7)$$

- **Courant total à vide :**

$$I_0 = \sqrt{(I_{0a}^2 + I_{0r}^2)} \quad [A] \quad (7.8)$$

- **Courant absorbé :**

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [A] \quad (7.9)$$

Avec:

$$I_{1a} = I_{0a} + I''_{2a} \quad [A] \quad (7.10)$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I''_{2r} \quad [A] \quad (7.11)$$

- **Le facteur de puissance de la machine :**

Il est donné par :

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (7.12)$$

e) Vitesse de rotation du moteur :

Elle est donnée par la relation

$$N_2 = N(1 - g) \quad [\text{tr/min}] \quad (7.13)$$

Avec :

N-Vitesse du synchronisme.

f) Expression du couple

• **Couple électromagnétique**

Il est exprimé comme suit :

$$C_{\text{élm}} = \frac{P_{\text{élm}}}{\Omega} \quad [\text{N.m}] \quad (7.14)$$

Avec:

$P_{\text{élm}}$: puissance électromagnétique en [W] , elle est exprimée comme suit :

$$P_{\text{élm}} = P_1 - P_{j1} - P_m \quad [\text{W}] \quad (7.15)$$

Ω : vitesse angulaire de rotation du champ tournant en [rad/s], elle est calculée comme suit :

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \quad [\text{rad/s}] \quad (7.16)$$

• **Couple mécanique :**

Il est donné par la formule suivante :

$$C_{\text{mec}} = \frac{P_{\text{mec}}}{\Omega_2} \quad [\text{N.m}] \quad (7.17)$$

Ω_2 : vitesse angulaire de rotation du moteur en [rad/s].

• **Le couple utile :**

Il est exprimé comme suit :

$$C_u = C_{\text{mec}} - \frac{p_{\text{mec}}}{\Omega_2} \quad [\text{N.m}] \quad (7.18)$$

p_{mec} : Pertes mécaniques.

g) Caractéristiques mécaniques :

C'est la caractéristique donnant le couple en fonction du glissement $C=f(g)$.

L'expression du couple est :

$$C = \frac{P_{elm}}{\Omega} = \frac{3.R'_2.I_2'^2}{g.\Omega} \quad [\text{N.m}] \quad (7.19)$$

On remplace I_2' par son expression et on obtient :

$$C = \frac{3.R'_2.U_{n1}^2}{\Omega} \cdot \frac{g}{(R_1.g+R'_2)^2 + g^2(X_1^2+X_2'^2)} \quad [\text{N.m}] \quad (7.20)$$

Si $g=0$ Alors $C=0$

Pour de faibles valeurs de g qui correspond à la zone normale de fonctionnement, les termes $R_1.g$ et $g^2(X_1^2 + X_2'^2)$ sont faibles devant R_2' , alors le couple est proportionnel au glissement.

Quand g continue 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 $\frac{dc}{dg}$ (figure I en annexe).

$$g_{cmax} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1^2 + X_2'^2)}}$$

Ce qui donne:

$$C_{max} = \frac{3.U_{n1}^2}{2.\Omega} \cdot \frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1^2 + X_2'^2)}} \quad [\text{N.m}] \quad (7.21)$$

Au démarrage: $g=1$

$$C_{dem} = \frac{3.U_{n1}^2}{2.\Omega} \cdot \frac{R'_2}{(R_1+R'_2)^2 + (X_1^2+X_2'^2)} \quad [\text{N.m}] \quad (7.22)$$

h) Caractéristique de démarrage et capacité de surcharge:

- **Resistance équivalente de démarrage**

Elle est exprimée comme suit :

$$R_{eqdem} = C_1.R_1 + C_1^2.R'_{2dem} \quad [\Omega] \quad (8.1)$$

Avec :

R'_{2dem} : Résistance de démarrage rotorique ramenée au stator.

• **Réactance équivalente au démarrage :**

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$X_{eqdem} = X_{const} + K_x \cdot X_{var} \quad [\Omega] \quad (8.2)$$

Avec :

K_x : Coefficient qui est donné suivant la forme d'encoche.

Pour les encoches ouvertes on a $K_x = 0.0825$.

X_{const} : Réactance de dispersion du moteur qui ne dépend pas de la saturation de la machine.

X_{var} : Réactance variable de dispersion du moteur qui dépend de la saturation de la machine.

Les réactances X_{const} et X_{var} sont respectivement données par les relations suivantes :

$$X_{const} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1dem}}{\lambda_1} + C_1^2 \cdot X'_{2dem} \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad [\Omega] \quad (8.3)$$

Avec :

λ_{2var} : Composante variable de la perméance rotorique, elle est donnée par :

$$\lambda_{2var} = \lambda_{encvar} + \lambda_{2d} \quad [\Omega] \quad (8.4)$$

Avec :

λ_{encvar} : Composante variable de la perméance d'encoche rotorique pour le type d'encoche utilisées, elle est donnée comme suit :

$$\lambda_{encvar} = \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad (8.5)$$

λ_1 : Perméance statorique

λ_{1dem} : Perméance statorique au démarrage, elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{1dem} = \left[\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc1} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right] \cdot k_{\beta 2} \quad (8.7)$$

$$X_{var} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_{1dem}}{\lambda_1} + C_1^2 \cdot X'_{2dem} \cdot \frac{\lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad [\Omega] \quad (8.8)$$

J) 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 :

$$K = \frac{C_{max}}{C_n} = \frac{\frac{g_{nom} + g_{cr}}{g_{cr}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}} \quad (8.9)$$

Avec :

R_{cr} : Résistance critique calculée comme suit :

$$R_{cr} = 2 \cdot R_1 \cdot \frac{g_{cr}}{R_2' \cdot C_1} \quad [\Omega] \quad (8.10)$$

g_{nom} : Glissement nominal.

g_{cr} : Glissement critique donné par la formule suivante.

$$g_{cr} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{X_1 + C_1 \cdot X_2'} \quad (8.11)$$

Où :

R_2' : Résistance rotorique ramenée au stator.

X_2' : Réactance rotorique ramenée au stator.

k) Courant de démarrage :

Au démarrage le moteur asynchrone est assimilable à un transformateur dont le secondaire a une faible résistance, dans ces conditions le courant de démarrage est très considérable ; il peut atteindre 7 à 8 fois le courant nominal, sa valeur est donnée par l'expression suivante :

$$I_{1dem} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{(R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)}} \quad [A] \quad (9.1)$$

Conclusion :

Le moteur asynchrone avec tous ses avantages présente cependant des inconvénients qui sont reliés à ses caractéristiques de démarrage, notamment le courant absorbé qui présente un point de surintensité de 5 à 10 fois le courant nominal et un à-coup de couple. Donc il faut essayer de minimiser le courant de démarrage et maximiser le couple.

CHAPITRE III

ELABORATION D'UN PROGRAMME DE

CALCUL

Dimensionnement du stator :

Le stator est dimensionné de la façon suivante :

Calcul électromagnétique

Le facteur de majoration

$$k_e = 0,98 - (5 \cdot p \cdot 10^{-3})$$

$$k_e = 0.97$$

La puissance nominale

$$P_n = 30 \text{ [kW]}$$

Le facteur de puissance

$$\cos(\phi_n) = 0.83$$

Le rendement nominal

$$\eta_n = 0.915$$

La puissance électromagnétique

$$P_e = k_e \cdot \frac{P_n}{\cos(\phi_n) \cdot \eta_n}$$

$$P_e = 38.3172 \text{ [kw]}$$

Nombre de phase statorique

$$m_1 = 3$$

Le coefficient de recouvrement polaire.

$$\alpha_i = 0.64$$

Le facteur de forme de la courbe d'induction

$$k_f = 1.11$$

La fréquence nominale

$$f_1 = 50 \text{ [Hz]}$$

La vitesse de rotation de synchronisme.

$$N = \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

$$N = 1500 \text{ [tr/mn]}$$

Le diamètre extérieur du stator

$$D_{ext} = 310 \text{ [mm]}$$

Le diamètre intérieur du stator.

$$D_1 = \frac{D_{ext}}{1.55}$$

$$D_1 = 200 \text{ [mm]}$$

La charge linéaire

$$A_1 = 24000 \text{ [A.m]}$$

L'induction magnétique dans l'entrefer

$$B_\delta = 0.6494 \text{ [T]}$$

Le pas polaire

$$\tau_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p}$$

$$\tau_{p1} = 157.0796 \text{ [mm]}$$

Le pas polaires en nombre d'encoche

$$\tau_p = \frac{Z_1}{2.p} \qquad \tau_p = 12$$

Pas dentaire

$$t_1 = \frac{\pi.D_1}{z_1} \qquad t_1 = 13.09 \text{ [mm]}$$

La tension nominale

$$U_{n1} = 380 \text{ [v]}$$

Le courant nominal

$$I_{n1} = \frac{P_n.10^3}{m_1 n_n \cos(\varphi_n) U_{n1}} \qquad I_{n1} = 59.8519 \text{ [A]}$$

Le nombre d'encoches statoriques

$$Z_1 = 48$$

Le nombre d'encoche par pôle et par phase

$$q_1 = \frac{Z_1}{2.p.m_1} \qquad q_1 = 4$$

Le coefficient de distribution, donné par

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \sin\left(\frac{\pi}{2m_1 q_1}\right)} \qquad K_{d1} = 0.9577$$

Le pas l'enroulement

$$y_1 = \frac{Z_1}{2.p} - \varepsilon$$

Enroulement concentrique $\Rightarrow \varepsilon = 0$

$$y_1 = 12$$

Le coefficient de raccourcissement polaire

$$k_{r1} = \sin\left(\frac{\beta.\pi}{2}\right) \qquad k_{r1} = 0.9988$$

Le rapport des pas dentaires statoriques et rotoriques

$$\beta_{ob} = \frac{t_1}{t_2} \qquad \beta_{ob} = 0.8573$$

L'angle central d'inclinaison des encoches, donné par

$$\alpha_{ob} = \frac{2.P.\pi.\beta_{ob}}{z_2} \qquad \alpha_{ob} = 0.2693$$

Le coefficient d'inclinaison des encoches rotoriques

$$k_{ob} = \frac{\sin(\alpha_{ob})}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \qquad k_{ob} = 0.997$$

Le facteur de bobinage de l'enroulement statorique, il est donnée par :

$$k_{en1} = k_{d1} \cdot k_{r1} \cdot k_{ob} \quad k_{en1} = 0.9577$$

La longueur virtuelle de l'induit

$$L_i = \frac{6,1 \cdot P_e \cdot 10^{12}}{(\alpha_i \cdot K_f \cdot N \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot K_{en1})} \quad L_i = 224.3282 \text{ [mm]}$$

Coefficient de longueur

$$\lambda_i = \frac{L_i}{D_1} \quad \lambda_i = 1.1216$$

Angle électrique entre deux encoches adjacentes

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad \gamma = 1.0472$$

Le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

$$U_{en1} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \quad U_{en1} = 10$$

Le nombre de voies parallèles

$$a_1 = 2$$

Le nombre de spires d'une voie parallèle

$$w_1 = \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{en1}}{a_1} \quad w_1 = 42$$

La densité de courant

$$J_1 = 4 \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

La section effective transversale d'un conducteur de l'enroulement

$$S_{eff1} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad S_{eff1} = 7.5 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Le nombre de conducteurs élémentaires

$$N_{el} = 5$$

La section élémentaire

$$S_{el1} = \frac{S_{eff1}}{N_{el}} \quad S_{el1} = 1.5 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Le coefficient de remplissage du paquet de tôles statoriques et rotorique

$$k_{fer} = 0.97$$

L'induction maximale dans les dents du stator

$$B_{Z1max} = 1.75 \text{ [T]}$$

La largeur de la dent

$$b_{z1} = \frac{t1.B\delta}{k_{fer}.B_{z1max}} \quad b_{z1} = 5.0124 \text{ [mm]}$$

L'induction magnétique de crête dans la culasse du stator $B_{c1} = 1.5 \text{ [T]}$

La hauteur du dos du stator

$$h_{c1} = \frac{0.5.\alpha_i.\tau_{p1}.B\delta}{k_{fer}.B_{c1}} \quad h_{c1} = 36.7425[\text{mm}]$$

Le diamètre médium du stator

$$D_m = \frac{D_{ext}+D_1}{2} \quad D_m = 255 \text{ [mm]}$$

La hauteur de la dent

$$h_{z1} = 0.5.(D_m - D_1) - h_{c1} \quad h_{z1} = 18.2575 \text{ [mm]}$$

L'épaisseur de l'entrefer $\delta = 2.8 \text{ [mm]}$

Le diamètre de l'isolation de l'encoche $\mu_{iso} = 2 \text{ [mm]}$

La section transversale occupée par l'isolation de l'encoche

$$S_{eniso1} = \mu_{iso} \cdot \delta \quad S_{eniso1} = 5.6 \text{ [mm}^2\text{]}$$

La hauteur de la fonte de l'encoche statorique $h_{f1}=1.45 \text{ [mm]}$

La hauteur de la clavette d'encoche statorique $h_{k1} = 2.9663 \text{ [mm]}$

Le pas dentaire statorique minimal

$$t_{1min} = \frac{\pi(D_1+2.h_{f1}+2.h_{k1})}{Z_1} \quad t_{1min} = 1.1078 \text{ [mm]}$$

La largeur minimale de la dent statorique

$$b_{z1min} = \frac{t_{1min}.B\delta}{K_{fer}.B_{z1max}} \quad b_{z1min} = 0.4308 \text{ [mm]}$$

La largeur de l'encoche statorique.

$$b_{en1} = t_{1min} - b_{z1min} \quad b_{en1} = 0.6953 \text{ [mm]}$$

La hauteur de l'encoche statorique

$$h_{en1} = h_{z1} - h_{f1} - h_{k1} \quad h_{en1} = 13.8412 \text{ [mm]}$$

La section de l'encoche statorique

$$S_{enc1} = (h_{en1} \cdot b_{en1}) - S_{eniso1} \quad S_{enc1} = 4.0232 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Le diamètre des conducteurs avec isolation $d_{iso} = 1.192$ [mm]

Le coefficient de remplissage

$$k_{re1} = \frac{N_{el} \cdot U_{en1} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad k_{re1} = 0.7134$$

La charge linéaire

$$A_1 = \frac{I_{n1} \cdot Z_1 \cdot U_{enc1}}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad A_1 = 24000 \text{ [A/m]}$$

Le flux sous un pôle

$$\Phi = \frac{k_e \cdot U_{n1}}{4 \cdot k_f \cdot w_1 \cdot f_1 \cdot k_{en1}} \quad \Phi = 0.024 \text{ [weber]}$$

L'induction magnétique dans l'entrefer

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad B_\delta = 0.6494 \text{ [T]}$$

Dimensionnement du rotor

Le nombre d'encoche rotorique

$$Z_2 = 40$$

Le diamètre extérieur du rotor

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad D_2 = 194.4 \text{ [mm]}$$

Le pas dentaire rotorique

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad t_2 = 15.2681 \text{ [mm]}$$

Le courant dans la barre

$$I_2 = \frac{1.11 \cdot I_{n1} \cdot 6 \cdot w_1 \cdot \cos(\varphi_n) \cdot k_{enc1}}{Z_2} \quad I_2 = 254.0782 \text{ [A]}$$

L'induction admissible dans la culasse du rotor

$$B_{c2} = 1.65 \text{ [T]}$$

La hauteur de la culasse rotorique

$$h_{c2} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_\delta}{k_{fer} \cdot B_{c2}} \quad h_{c2} = 32.4367 \text{ [mm]}$$

Le pas polaire rotorique

$$\tau_{p2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad \tau_{p2} = 152.6814 \text{ [mm]}$$

Le diamètre de l'arbre

$$D_{anr} = 75 \text{ [mm]}$$

La hauteur de la dent rotorique

$$h_{z2} = 0.5 \cdot (D_2 - D_{anr}) - h_{c2} \quad h_{z2} = 30.7433 \text{ [mm]}$$

L'induction admissible dans les dents rotoriques

$$B_{z2max} = 1.95 \text{ [T]}$$

La largeur de la dent :

$$b_{z2} = \frac{t_{2.B\delta}}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \quad b_{z2} = 5.2419 \text{ [mm]}$$

Le pas dentaire minimal au rotor

$$t_{2min} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{z2})}{Z_2} \quad t_{2min} = 10.439 \text{ [mm]}$$

La largeur minimale de la dent

$$b_{z2min} = \frac{t_{2min} \cdot B\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \quad b_{z2min} = 3.5839 \text{ [mm]}$$

La largeur de l'encoche rotorique

$$b_{en2} = t_{2min} - b_{z2min} \quad b_{en2} = 6.8551 \text{ [mm]}$$

La hauteur de la fente de l'encoche rotorique

$$h_{f2} = 1.2 \text{ [mm]}$$

La hauteur de l'encoche rotorique

$$h_{en2} = h_{z2} - h_{f2} \quad h_{en2} = 29.5433 \text{ [mm]}$$

La section de l'encoche rotorique

$$S_{en2} = h_{en2} \cdot b_{en2} \quad S_{en2} = 202.5208 \text{ mm}^2$$

Le diamètre supérieur de l'encoche rotorique

$$d_{enc21} = \frac{|\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{f2}) - Z_2 \cdot b_{z2}|}{(Z_2 + \pi)} \quad d_{enc21} = 9.1214 \text{ [mm]}$$

Le diamètre inferieur de l'encoche rotorique

$$d_{enc2} = \frac{|\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{z2}) - Z_2 \cdot b_{z2}|}{(Z_2 - \pi)} \quad d_{enc2} = 5.6401 \text{ [mm]}$$

La hauteur h_2 :

$$h_2 = (h_{z2} - h_{f2}) - 0.5 \cdot (d_{enc21} + d_{enc2}) \quad h_2 = 22.1625$$

La section de la barre rotorique

$$S_b = 0.125 \cdot \pi \cdot (d_{enc21}^2 + d_{enc2}^2) + 0.5 \cdot (d_{enc21} + d_{enc2}) \cdot h_2$$

$$S_b = 148.7565 \text{ [mm}^2\text{]}$$

La densité de courant dans la barre

$$J_b = \frac{I_2}{s_b}$$

$$J_b = 4.1768 \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

Dimensionnement des anneaux de court circuit :

La hauteur de l'anneau

$$h_{an} = 1.1 \cdot h_{z2}$$

$$h_{an} = 33.8176 \text{ [mm]}$$

La section de l'anneau de la cage externe

$$S_{an} = (0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot P}$$

$$S_{an} = 669.4041 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Largeur de l'anneau

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}}$$

$$b_{an} = 19.7946 \text{ [mm]}$$

Le diamètre moyen de l'anneau

$$D_{an} = (D_2 - h_{an})$$

$$D_{an} = 160.5824 \text{ [mm]}$$

Calcul de circuit magnétique

Le circuit magnétique statorique

L'induction magnétique dans les dents du stator

$$B_{z1} = 1.75 \text{ [T]}$$

⇒ Le champ magnétique dans les dents du stator

$$H_{z1} = 1330 \text{ [A/m]}$$

La longueur moyenne des lignes des champs dans la culasse statorique

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2P} (D_{ext} - h_{c1})$$

$$L_{c1} = 214.6159 \text{ [mm]}$$

L'induction magnétique dans la culasse du stator

$$B_{C1} = 1.5 \text{ [T]}$$

⇒ Le champ magnétique dans la culasse statorique

$$H_{C1} = 520 \text{ [A/m]}$$

Force magnétomotrice dans la culasse statorique

$$F_{c1} = H_{C1} \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3}$$

$$F_{c1} = 111.6003 \text{ [A]}$$

Le pas dentaire maximum au stator

$$t_{1max} = \pi \cdot \frac{D_1 + 2 \cdot h_{z1}}{Z_1}$$

$$t_{1max} = 15.4799 \text{ [mm]}$$

La largeur maximale de la dent statorique

$$b_{z1max} = t_{1max} - b_{enc1}$$

$$b_{z1max} = 7.1633 \text{ [mm]}$$

L'induction magnétique minimale dans les dents du stator

$$B_{z1min} = (t_{1max} \cdot B_{\delta}) / (k_{fer} \cdot b_{z1max}) \quad B_{z1min} = 1.4467 \text{ [T]}$$

$$\Rightarrow H_{z1min} = 2320 \text{ [A/m].}$$

L'induction magnétique maximale dans les dents du stator

$$B_{z1max} = 1.75. \text{ [T]}$$

Le champ magnétique maximale dans les dents statorique

$$\Rightarrow H_{z1max} 1330 \text{ [A/m].}$$

L'intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur moyenne de la dent statorique

$$H_{z1moy1} = \frac{H_{z1max} + H_{z1min}}{2} \quad H_{z1moy1} = 1825 \text{ [A/m]}$$

L'intensité du champ magnétique moyen de la dent statorique

$$H_{Z1moy} = \frac{H_{Z1max} + 4 \cdot H_{Z1moy1} + H_{Z1min}}{6} \quad H_{Z1moy} = 1437.5 \text{ [A/m]}$$

La force magnétomotrice dans la dent du stator

$$F_{z1} = H_{Z1moy} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad F_{z1} = 33.3199 \text{ [A]}$$

La longueur moyenne des lignes du champ magnétique dans la culasse du rotor

$$L_{c2} = (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \frac{\pi}{2P} + h_{c2} \quad L_{c2} = 111.351 \text{ [mm]}$$

L'induction magnétique dans la culasse rotorique

$$B_{c2} = 1.65 \text{ [T]}$$

Le champ magnétique dans la culasse rotorique

$$\Rightarrow H_{c2} = 455 \text{ [A/m]}$$

Force magnétomotrice dans la culasse du rotor

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad F_{c2} = 50.6647 \text{ [A]}$$

La hauteur de la fente de l'encoche rotorique

$$h_{f2} = 1.2 \text{ [mm]}$$

Le pas dentaire maximum au rotor

$$t_{2max} = \pi \cdot \frac{D_2 + 2 \cdot h_{f2}}{Z_1} \quad t_{2max} = 15.0796 \text{ [mm]}$$

La largeur maximale de la dent du rotor

$$b_{z2max} = t_{2max} - b_{enc2} \quad b_{z2max} = 8.2246 \text{ [mm]}$$

L'induction magnétique minimale dans les dents du rotor

$$B_{z2min} = (t_{2max} \cdot B_{\delta}) / (k_{fer} \cdot b_{z2max}) \quad B_{z2min} = 1.2275 \text{ [T]}$$

Le champ magnétique minimale dans les dents du rotor

$$\Rightarrow H_{z2min} = 479 \text{ [A/m].}$$

L'induction magnétique maximale dans les dents du rotor

$$B_{z2max} = 1.95 \text{ [T]}$$

Le champ magnétique maximale dans les dents du rotor $\Rightarrow H_{z2max} = 2520$ [A/m].

L'intensité du champ magnétique dans la zone de la largeur moyenne de la dent rotorique

$$H_{z2moy2} = \frac{H_{z2max} + H_{z1min}}{2} \quad H_{z2moy2} = 1437.5 \text{ [A/m]}$$

L'intensité du champ magnétique moyen de la dent rotorique

$$H_{z2moy} = \frac{H_{z2max} + 4.H_{z2moy2} + H_{z2min}}{6} \quad H_{z2moy} = 1499.5 \text{ [A/m]}$$

La force magnétomotrice dans la dent du rotor

$$F_{z2} = H_{z2moy} \cdot h_{z2} \cdot 10^{-3} \quad F_{z2} = 46.0995 \text{ [A]}$$

Le coefficient de CATER

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}}} \quad K_{\delta 1} = 1.0694$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}}} \quad K_{\delta 2} = 1.0096$$

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \quad K_{\delta} = 1.0797$$

La force magnétomotrice dans l'entrefer

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot 10^{+3} \quad F_{\delta} = 1570.6 \text{ [A]}$$

La force magnétomotrice totale par paire de pole

$$F = \sum Fi = 2 \cdot (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad F = 3462.2 \text{ [A]}$$

Le coefficient de saturation des dents

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad K_{\mu z} = 1.0506$$

Le coefficient de saturation de la machine

$$K_{\mu} = \frac{\sum Fi}{2F_{\delta}} \quad K_{\mu} = 1.1022$$

Le courant magnétisant

$$I_{\mu} = \frac{P \cdot \sum Fi}{0.9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{enc1}} \quad I_{\mu} = 63.9322 \text{ [A]}$$

La réactance inductive de dispersion d'une phase de l'enroulement statorique

$$X_1 = 0.2232 \text{ [\Omega]}$$

La réactance de magnétisation

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_\mu}$$

$$X_m = 3.3379 \text{ } [\Omega]$$

Le coefficient de dispersion magnétique du stator

$$\sigma_\mu = \frac{X_1}{X_m}$$

$$\sigma_\mu = 0.0669$$

La force électromotrice à vide

$$E_0 = \frac{U_{n1}}{1 + \sigma_\mu}$$

$$E_0 = 206.2086 \text{ } [V]$$

A T=20⁰c

$$\rho_{cu} = 17,2 \cdot 10^{-9} \text{ } [\Omega \cdot m]$$

Le pas moyen d'un groupe de section

$$y_{1moy} = 12$$

La largeur moyenne d'une section

$$b_{1moy} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot y_{1moy}}{z_1}$$

$$b_{1moy} = 171.419 \text{ } [mm]$$

La longueur moyenne de la partie frontale d'une demi-spire

$$L_{f1} = (1.16 + 0.14P) \cdot b_{1moy} + 15$$

$$L_{f1} = 261.8434 \text{ } [mm]$$

La longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique

$$L_{w1} = 2 \cdot (L_i + L_{f1})$$

$$L_{w1} = 972.3432 \text{ } [mm]$$

La résistance active d'une phase du stator

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \cdot \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^{+3}}{\alpha_1 \cdot N_{el} \cdot S_{elt1}}$$

$$R_1 = 0.1656 \text{ } [\Omega]$$

Le rapport de raccourcissement

$$\beta = 1$$

$$\Rightarrow k_{B1} = 0.98 \text{ Et } k_{B2} = 0.92$$

La hauteur de l'encoche occupée par les conducteurs statoriques

$$h_1 = 13.8412 \text{ } [mm]$$

La hauteur de l'encoche occupée par l'isolation de l'encoche

$$h'_1 = 1.45 \text{ } [mm]$$

La largeur de la clavette de l'encoche statorique

$$b_{f1} = 3.9 \text{ } [mm]$$

La perméance d'encoche

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1 \cdot k_{B1}}{3 \cdot b_{enc1}} + \left(\frac{h'_1}{b_{enc1}} + 3 \cdot \frac{h_{k1}}{b_{enc1} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot k_{B2}$$

$$\lambda_{enc1} = 1.62 \text{ } [mm]$$

La réactance de fuite d'encoche

$$X_{enc1} = \frac{1,58.f_1.l_i.w_1^2}{q_1.p.10^8} \cdot \lambda_{enc1} \quad X_{enc1} = 0.063 [\Omega]$$

Le coefficient k_{r1}

$$k_{r1} = 1 - \frac{0.033.b_{f1}^2}{\delta.t_1} \quad k_{r1} = 0.9988$$

Pour $q_1 = 4$ on a

$$k_{rr1} = 0.0089$$

Pour $\frac{Z_2}{p}=20$ et $q_1 = 4$

On a le coefficient de fuite différentielle

$$k_{dd1} = 1.0909$$

La perméance différentielle proportionnelle

$$\lambda_{1d} = \frac{0.9t_1.q_1^2.k_{en1}^2}{k_\delta.\delta} \cdot k_{rr1} \cdot k_{dd1} \cdot k_{r1} \quad \lambda_{1d} = 3.1456$$

La réactance de fuite différentielle

$$X_{1d} = \frac{1,58.f_1.l_i.w_1^2}{q_1.p.10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad X_{1d} = 0.1232[\Omega]$$

La perméance frontale

$$\lambda_{1f} = 0,34 \frac{q_1.(l_{f1}-0.64\beta.\tau_{p1})}{l_i} \quad \lambda_{1f} = 0.9780$$

La réactance de fuite frontale

$$X_{1f} = \frac{1,58.f_1.l_i.w_1^2}{q_1.p.10^8} \cdot \lambda_{1f} \quad X_{1f} = 0.0380 [\Omega]$$

La perméance de dispersion de l'enroulement statorique

$$\lambda_1 = \lambda_{enc1} + \lambda_{1d} + \lambda_{1f} \quad \lambda_1 = 5.7435$$

La réactance est donnée par :

$$X_1 = \frac{1,58.f_1.l_i.w_1^2}{q_1.p.10^8} \cdot \lambda_1 \quad X_1 = 0.2232 [\Omega]$$

Les paramètres rotoriques

Le coefficient de réduction

$$k_{red} = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) \quad k_{red} = 0.3129$$

$$T=75^{\circ}\text{C}$$

$$\rho_{cu}(T) = 21,3 \cdot 10^{-9} [\Omega \cdot \text{m}]$$

Le rapport de la section de la barre rotorique sur la section théorique de la barre

$$k_{pp} = \frac{S_b}{S_{pp}}$$

Pour le régime de fonctionnement $S_{pp} = S_p$

$$\Rightarrow k_{pp} = 1$$

La résistance active de la barre rotorique

$$R_b = \rho_{cu}(T) \cdot \frac{k_{pp} \cdot l_i \cdot 10^3}{s_b}$$

$$R_b = 3.2112 \cdot 10^{-5} [\Omega]$$

Le diamètre moyen de l'anneau

$$D_{anmoy} = 160.8661 [\text{mm}]$$

La résistance de la partie de l'anneau qui se situe entre deux barres voisines

$$R_{an} = \rho_{cu}(T) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D_{anmoy} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot s_{an}}$$

$$R_{an} = 8.0262 \cdot 10^{-7} [\Omega]$$

Le coefficient de réduction du courant de l'anneau au courant de la barre

$$\text{Pour : } \frac{Z_2}{2 \cdot p} \geq 6 \quad k_{red2}^2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot P}{Z_2}$$

$$K_{red2} = 0.3142$$

La résistance de l'anneau ramenée à la barre

$$R''_{an} = \frac{R_{an}}{k_{red2}^2}$$

$$R''_{an} = 8.1322 \cdot 10^{-6} [\Omega]$$

La résistance d'une phase rotorique

$$R_2 = R_b + R''_{an}$$

$$R_2 = 4.0253 \cdot 10^{-5} [\Omega]$$

Le coefficient de réduction de la résistance de la cage vers l'enroulement du stator

$$K_{red1} = \left(\frac{4 \cdot m_1}{Z_2} \right) \cdot \left(w_1 \cdot \frac{k_{en1}}{k_{ob}} \right)^2$$

$$K_{red1} = 485.68$$

La résistance de la cage ramenée au stator

$$R'_2 = K_{red1} \cdot (R_b + R''_{an})$$

$$R'_2 = 0.0196 [\Omega]$$

La hauteur de l'encoche rotorique

$$h_{enc2} = 29.5433 [\text{mm}]$$

$$\psi = 1$$

Le coefficient C_λ :

$$C_\lambda = \psi \cdot \left[\frac{(h_{enc2} + 0.4 \cdot b_{enc2})^2}{(3 \cdot S_b)^2} \cdot \frac{(1 - \pi \cdot b_{enc2})^2}{(8 \cdot S_b)^2} + 0.66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot b_{enc2}} \right) \right] \quad C_\lambda = 0.5511$$

La perméance d'encoche

$$\lambda_{2enc} = C_\lambda + \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right)$$

$$\lambda_{2enc} = 1.3511$$

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

$$K_{dd2} = \frac{9.15}{100 \cdot \left(\frac{Z_2}{6.p}\right)^2} \quad K_{dd2} = 0.0082$$

La perméance de dispersion différentielle

$$\lambda_{2d} = 0.9 \cdot \tau_2 \cdot \frac{\left(\frac{Z_2}{2.p}\right)^2}{\delta \cdot K_\delta} \cdot k_{dd2} \quad \lambda_{2d} = 4.1591$$

La perméance frontale

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3 \cdot D_{anmoy}}{Z_2 \cdot L_i \cdot k_{red2}^2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{anmoy}}{2(h_{an} + b_{an})} \right) \quad \lambda_{2f} = 0.8138$$

La perméance d'inclinaison d'encoche rotorique

$$\lambda_{ob} = \frac{\tau_2 \cdot (\beta_{ob})^2}{9.5 \cdot \delta \cdot K_\delta \cdot k_\mu} \quad \lambda_{ob} = 3.5452$$

La perméance de dispersion du rotor

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad \lambda_2 = 9.8692$$

La réactance du rotor

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad X_2 = 8.745 \cdot 10^{-7} \text{ } [\Omega]$$

La réactance de fuite de l'enroulement rotorique ramenée a l'enroulement statorique

$$X'_2 = K_{red1} \cdot X_2 \quad X'_2 = 4.2473 \cdot 10^{-4} \text{ } [\Omega]$$

Les paramètres au démarrage

La hauteur de la barre $h_b = 7.5$ [mm]

Au démarrage $g_d = 1$

Le coefficient ξ_1

$$\xi_1 = 0.064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g_d} \quad \xi_1 = 0.48$$

$$\Rightarrow \varphi_1 = 3.2$$

La profondeur de pénétration

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1 + \varphi_1} \quad h_{pp} = 1.7857 \text{ } [\text{mm}]$$

La largeur de la barre pénétrée par le courant de démarrage

$$b_{pp} = \left(h_{pp} - \frac{b_{enc2}}{2} \right) - b_{enc2} \quad b_{pp} = 0.78 \text{ [mm]}$$

La surface de la barre non pénétrée par le courant de démarrage

$$S_{nonpén} = (b_{enc2} - b_{pp}) \cdot (h_{enc2} - h_{pp}) \quad S_{nonpén} = 111.0984 \text{ [mm}^2\text{]}$$

La section de la barre pénétrée par le courant de démarrage

$$S_{bdem} = S_{enc2} - S_{nonpén} \quad S_{bdem} = 29.1146 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Le coefficient de déplacement du courant

$$k_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad k_{dep} = 0.91$$

La résistance de la barre au démarrage

$$R_{bdem} = R_b \cdot k_{dep} \quad R_{bdem} = 2.923 \cdot 10^{-5} [\Omega]$$

La résistance de la cage au démarrage

$$R_{2dem} = R_{an''} + R_{bdem} \quad R_{2dem} = 3.7362 \cdot 10^{-5} [\Omega]$$

La résistance de la cage au démarrage ramenée au stator

$$R_{2dem}' = K_{red1} \cdot R_{2dem} \quad R_{2dem}' = 0.0181 [\Omega]$$

La perméance d'encoche au rotor

$$\lambda_{2encdem} = C_\lambda + \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right) \quad \lambda_{2encdem} = 1.3511$$

La perméance de dispersion du rotor au démarrage

$$\lambda_{2dem} = \lambda_{endem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad \lambda_{2dem} = 9.8692$$

La réactance de fuite au démarrage

$$X_{2dem} = 7.9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot \lambda_{2dem} \cdot 10^{-9} \quad X_{2dem} = 8.745 \cdot 10^{-4} [\Omega]$$

La réactance de fuite au démarrage ramenée au stator

$$X_{2dem}' = K_{red1} \cdot X_{2dem} \quad X_{2dem}' = 0.4247 [\Omega]$$

Les pertes spécifiques

$$P_{1/50} = 2 \text{ [W} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$$

Le poids des dents statorique

$$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot k_{fer} \cdot [h_{z1} \cdot \pi (D_1 + h_{z1}) - S_{enc1} \cdot Z_1] \quad G_{z1} = 2.5564 \text{ [Kg]}$$

Les pertes dans les dents

$$P_{mz1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1}^2 \cdot G_{z1}$$

$$P_{mz1} = 33.2732[\text{W}]$$

Le poids de la culasse statorique en [Kg]

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot k_{fer} \cdot h_{c1} \cdot \pi \cdot (D_{ext} - h_{c1})$$

$$G_{c1} = 53.5354[\text{Kg}]$$

Les pertes dans la culasse du stator

$$P_{mc1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{c1}^2 \cdot G_{c1}$$

$$P_{mc1} = 511.9322[\text{w}]$$

Les pertes dans le fer

$$P_m = P_{mc1} + P_{mz1}$$

$$P_m = 545.2054[\text{w}]$$

Les pertes joules statoriques

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2$$

$$P_{j1} = 1780 [\text{w}]$$

Le nombre de phase au rotor

$$m_2 = z_2 = 40$$

Les pertes joules rotoriques

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2$$

$$P_{j2} = 103.9427 [\text{w}]$$

Le facteur de majoration

Pour $2p > 2$

$$k_t = 1$$

Les pertes mécaniques

$$p_{mec} = k_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4$$

$$p_{mec} = 199.5637 [\text{w}]$$

Les pertes supplémentaires

$$P_{sup} = 0.005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n}$$

$$P_{sup} = 163.9344 [\text{w}]$$

Les pertes totales

$$P_{tot} = P_m + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup}$$

$$P_{tot} = 2792.7[\text{w}]$$

Le rendement de la machine

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}}$$

$$\eta = 0.9148$$

La puissance absorbée à vide

$$P_{a10} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_\mu^2$$

$$P_{a10} = 4569.7[\text{w}]$$

Le courant actif à vide

$$I_{0a} = \frac{P_m + p_{mec} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{n1}} = \frac{P_m + p_{mec} + R_1 \cdot m_1 \cdot I_{\mu}^2}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad I_{0a} = 3.9033[\text{A}]$$

La résistance de magnétisation

$$R_m = \frac{X_m \cdot I_{\mu}}{I_{0a}} \quad R_m = 50.7408[\Omega]$$

Les paramètres de schéma équivalent

La constante de transformation du schéma en T vers le schéma en L

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad C_1 = 1.0669$$

Les caractéristiques de fonctionnement du moteur

$$A = \frac{m_1 \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot P_2'} - R_1 \quad A = 1.1738$$

$$R' = R_2' \cdot \left[\left[\frac{R_1}{R_2'} \cdot \left(1 + \frac{X_2'}{X_m} \right) \right]^2 + \left[\frac{X_1}{R_2'} \cdot \left(1 + \frac{X_2'}{X_m} \right) + \left(\frac{X_2'}{R_2'} \right) \right]^2 \right] \quad R' = 132.3264[\Omega]$$

$$B = 2 \cdot A + R' \quad B = 134.6740$$

Le glissement

$$g = \frac{A - \sqrt{(A^2 - C_1^2 \cdot R_2' \cdot B)}}{B} \quad g = 0.02$$

La puissance absorbée

$$P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_{n1} \cdot \cos\varphi \quad P_1 = 5.6632 \cdot 10^4 [\text{w}]$$

Puissance utile, calculée comme suit

$$P_u = P_1 - P_{tot} \quad P_u = 5.3839 \cdot 10^4 [\text{w}]$$

La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire

$$P_2' = P_u + P_{sup} + P_{mec} \quad P_2' = 54.203 \cdot 10^3 [\text{w}]$$

La résistance équivalente

$$R_{2eq} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{g} \quad R_{2eq} = 1.2893[\Omega]$$

La réactance équivalente

$$X_{2eq} = C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \quad X_{2eq} = 0.2387[\Omega]$$

L'impédance équivalente

$$Z_{2eq} = \sqrt{(R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2)}$$

$$Z_{2eq} = 1.3112[\Omega]$$

Le courant secondaire

$$I_2'' = \frac{U_{n1}}{Z_{2eq}}$$

$$I_2'' = 167.7796[A]$$

Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire

$$I_2' = C_1 \cdot I_2''$$

$$I_2' = 179.0008[A]$$

Le facteur de Puissance rotorique

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}}$$

$$\cos \varphi_2 = 0.9833$$

$$\sin \varphi_2 = \frac{X_{2eq}}{Z_{2eq}}$$

$$\sin \varphi_2 = 0.182$$

Le courant actif

$$I_{2a}'' = I_2'' \cdot \cos \varphi_2$$

$$I_{2a}'' = 164.9772[A]$$

Le courant réactif

$$I_{2r}'' = I_2'' \cdot \sin \varphi_2$$

$$I_{2r}'' = 30.5372[A]$$

Le courant actif qui correspond aux pertes fer et aux pertes joules statorique à vide

$$I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_m}{m_1 \cdot U_{n1}}$$

$$I_{0a} = 3.9033[A]$$

Le courant magnétisant

$$I_{0r} = \frac{P \sum F_i}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_1 K_{en1}}$$

$$I_{0r} = 63.9322[A]$$

Le courant total à vide

$$I_0 = \sqrt{(I_{0a}^2 + I_{0r}^2)}$$

$$I_0 = 64.0512[A]$$

Le courant actif I_{1a} :

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}''$$

$$I_{1a} = 168.8805[A]$$

Le courant réactif I_{1r}

$$I_{1r} = I_{0r} + I_{2r}''$$

$$I_{1r} = 94.4693[A]$$

Le courant absorbé

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$$

$$I_1 = 193.5073[\text{A}]$$

Le facteur de puissance de la machine

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1}$$

$$\cos \varphi_1 = 0.8727$$

La vitesse de rotation du moteur

$$N_2 = N(1 - g)$$

$$N_2 = 1470 \text{ [tr/min]}$$

La puissance électromagnétique

$$P_{\acute{e}lm} = P_1 - P_{j1} - P_m$$

$$P_{\acute{e}lm} = 54.307 \cdot 10^3 \text{ [w]}$$

Le couple électromagnétique

$$C_{\acute{e}lm} = \frac{P_{\acute{e}lm}}{\Omega}$$

$$C_{\acute{e}lm} = 345.7270[\text{N.m}]$$

La vitesse angulaire de rotation du champ tournant

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60}$$

$$\Omega = 157.0796 \text{ [rad/s]}$$

La vitesse angulaire de rotation du moteur

$$\Omega_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_2}{60}$$

$$\Omega_2 = 153.938 \text{ [rad/s]}$$

Le couple mécanique

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{\Omega_2}$$

$$C_{mec} = 352.1074[\text{N.m}]$$

Le couple utile

$$C_u = C_{mec} - \frac{P_{mec}}{\Omega_2}$$

$$C_u = 350.8110[\text{N.m}]$$

Le glissement maximal

$$g_{cmax} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1^2 + X_2^2)}}$$

$$g_{cmax} = 0.0703$$

Le couple maximal

$$C_{max} = \frac{3 \cdot U_{n1}^2}{2 \cdot \Omega} \cdot \frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1^2 + X_2^2)}}$$

$$C_{max} = 1041.9[\text{N.m}]$$

Le couple de démarrage

Au démarrage: $g=1$

$$C_{dem} = \frac{3.U_{n1}^2}{2.\Omega} \cdot \frac{R_2'}{(R_1+R_2')^2 + (X_1^2+X_2'^2)}$$

$$C_{dem} = 522.1487[\text{N.m}]$$

La résistance équivalente de démarrage

$$R_{eqdem} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_2'$$

$$R_{eqdem} = 0.1974[\Omega]$$

Le coefficient qui est donné suivant la forme d'encoche

$$K_x = 0.0083$$

La perméance statorique au démarrage

$$\lambda_{1dem} = \left[\frac{3.h_{k1}}{b_{enc1}+2.b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right] \cdot k_{\beta 2}$$

$$\lambda_{1dem} = 5.0290$$

La composante variable de la perméance d'encoche rotorique

$$\lambda_{encvar} = \frac{h_{f2}}{b_{f2}}$$

$$\lambda_{encvar} = 0.8$$

La composante variable de la perméance rotorique

$$\lambda_{2var} = \lambda_{encvar} + \lambda_{2d}$$

$$\lambda_{2var} = 4.9591$$

La réactance de dispersion du moteur

$$X_{const} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1dem}}{\lambda_1} + C_1^2 \cdot X_2' \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_{2var}}{\lambda_2}$$

$$X_{const} = 0.2702[\Omega]$$

La réactance variable de dispersion du moteur

$$X_{var} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_{1dem}}{\lambda_1} + C_1^2 \cdot X_2' \cdot \frac{\lambda_{2var}}{\lambda_2}$$

$$X_{var} = 49.155[\Omega]$$

La réactance équivalente au démarrage

$$X_{eqdem} = X_{const} + K_x \cdot X_{var}$$

$$X_{eqdem} = 0.6757[\Omega]$$

Le glissement critique donné par la formule suivante.

$$g_{cr} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{X_1 + C_1 \cdot X_2'}$$

$$g_{cr} = 0.0932$$

La résistance critique

$$R_{cr} = 2 \cdot R_1 \cdot \frac{g_{cr}}{R_2' \cdot C_1}$$

$$R_{cr} = 1.4809[\Omega]$$

La capacité de surcharge

$$K = \frac{C_{max}}{C_n} = \frac{\frac{g_{nom} + g_{cr} + R_{cr}}{g_{cr} g_{nom}}}{2 + R_{cr}} \quad K = 1.8264$$

Le courant de démarrage

$$I_{1dem} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{(R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)}} \quad I_{1dem} = 539.8375[A]$$

III.2.Comparaison des résultats:

	Moteur existant	Moteur calculé
La longueur virtuelle du paquet [mm]	205	224.3282
Le rendement (%)	91.5	91.48
Le facteur de puissance	0.83	0.8727
Le courant nominal [A]	60	59.8519
Le couple nominale [N.m]	195	194.898
Le rapport de couple de démarrage et le couple nominal	2.6	2.6791

Interprétation des résultats des tableaux :

Le moteur calculé soumis à des modifications lors de la conception par rapport à celui existant. On remarque ce qui suit :

- les deux rendements sont presque équivalents.
- une différence minimale entre les deux facteurs de puissance.
- Par contre, il y a une légère augmentation du rapport de couple.

III.3. caractéristiques mécaniques du moteur asynchrone :

C'est la caractéristique donnant le couple en fonction du glissement $C=f(g)$.

L'expression du couple est :

$$C = \frac{P_{elm}}{\Omega} = \frac{3.R'_2.I_2'^2}{g.\Omega}$$

On remplace I'_2 par son expression et on obtient :

$$C = \frac{3.R'_2.U_{n1}^2}{\Omega} \cdot \frac{g}{(R_1.g+R'_2)^2 + g^2(X_1^2+X_2'^2)}$$

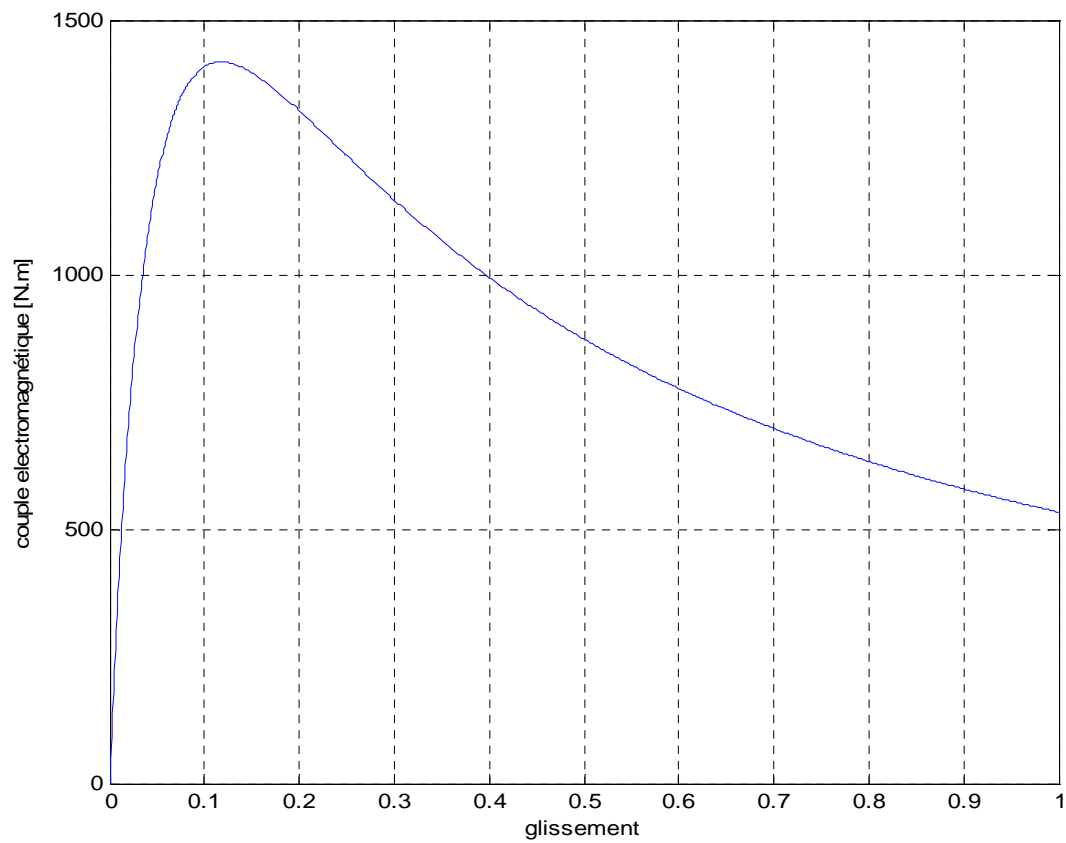


Fig.III.1 Couple électromagnétique en fonction de glissement.

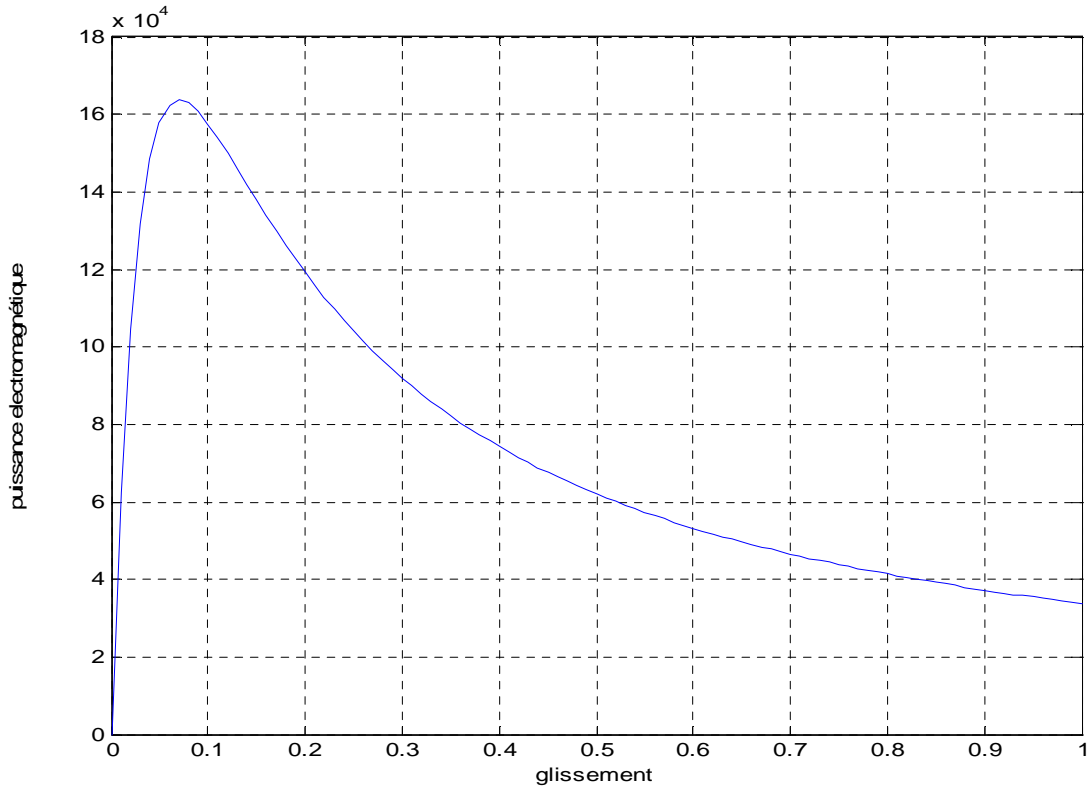


Fig.III.2. Puissance électromagnétique en fonction de glissement.

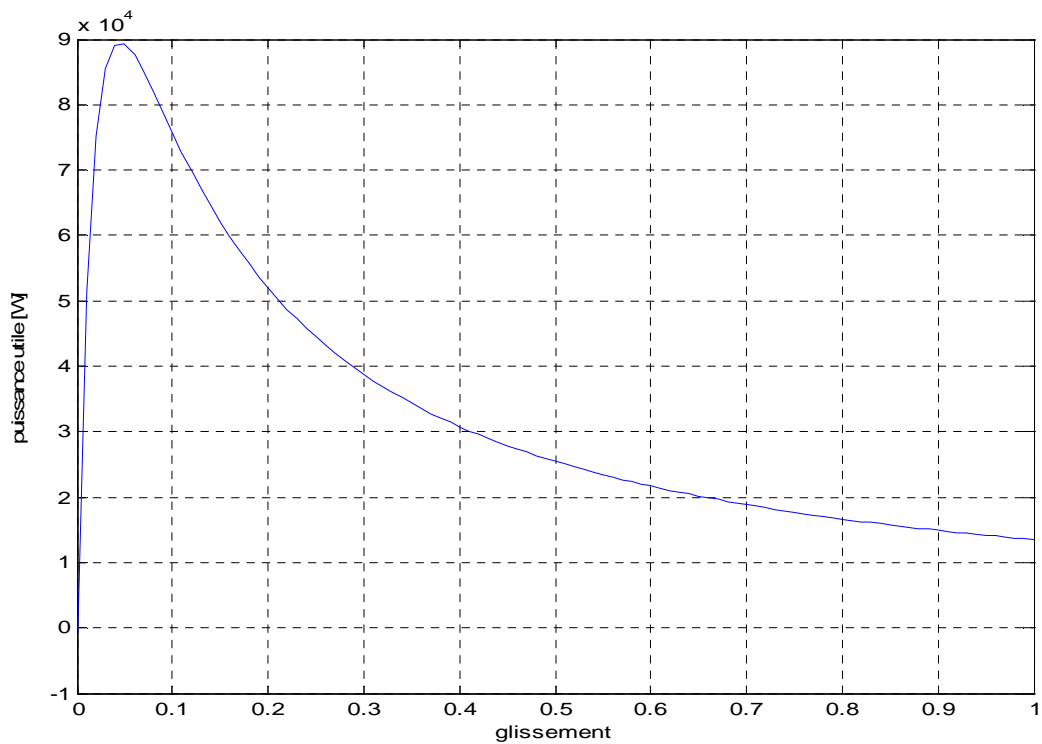


Fig.III.3. Puissance utile en fonction de glissement.

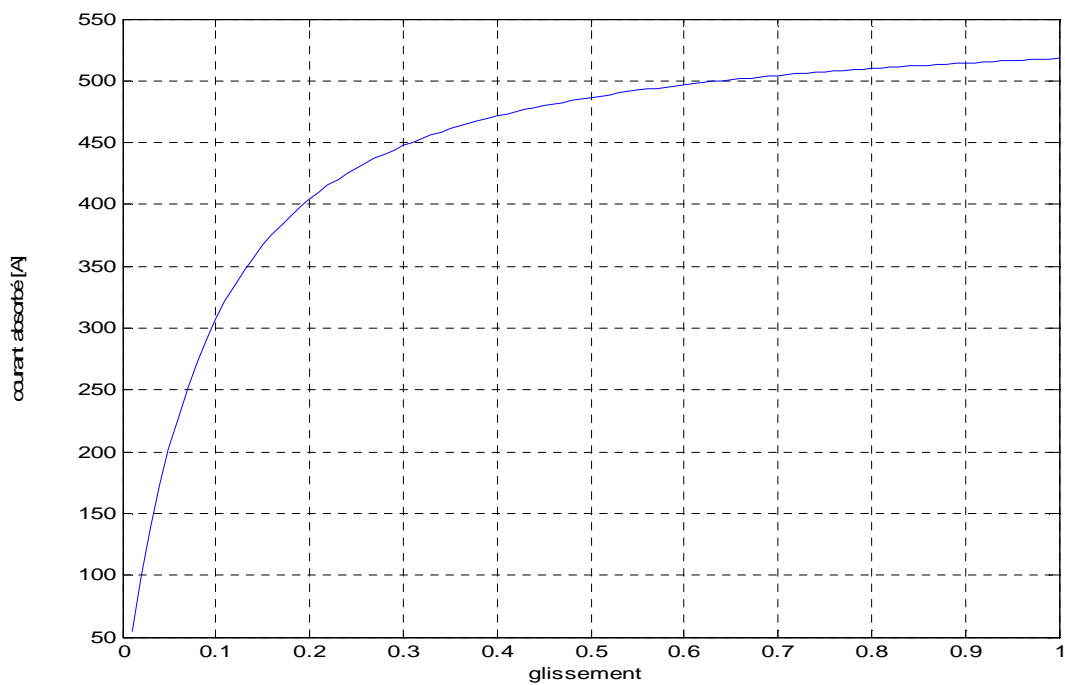


Fig.III.4. Le courant absorbé en fonction de glissement.

Conclusion:

En définitive, les résultats obtenus sont satisfaisants ; ceux-ci impliquent que le moteur calculé est réalisable avec un gain de matériaux, d'argent et du temps en gardant toutes les caractéristiques et les performances exigées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Pour arriver à notre objectif, on a pris en considération toutes les différentes valeurs des données recommandées par l'Entreprise ELECTRO-INDUSTRIE D'AZAZGA et les choix de nos valeurs calculées pour lesquels on doit faire des compromis, nous sommes parvenus à des résultats satisfaisants du fait que toutes les contraintes électriques, mécaniques et magnétiques sont dans la limite admissible.

Notre méthode de calcul ainsi que le programme informatique utilisé, nous ont été d'un apport considérable en matière du temps et de précision surtout au niveau du calcul de rendement et des caractéristiques de démarrage.

Toutefois, on peut estimer que le domaine de la construction et surtout l'optimisation d'un moteur électrique asynchrone triphasé à double cage, en réduisant sa hauteur d'axe est un sujet d'actualité, mais aussi est un domaine très vaste qui nous a permis d'ajouter beaucoup de compréhension aux connaissances déjà acquises sur son fonctionnement dans notre cursus universitaire.

La difficulté des calculs de la machine asynchrone réside dans le nombre élevé de formules qui sont liées entre elle par des paramètres. L'imposition des marges d'admissibilité liée à la matière utilisée accroît d'avantage cette difficulté, ce qui nous emmène à chercher une solution optimale.

Enfin, nous espérons que nous avons apporté un appui considérable pour les étudiants des promotions futurs afin d'optimiser les moteurs asynchrones triphasés à double cage d'écureuil et nous souhaitons que d'autres études seront faites sur ce sujet, en prenant en considération d'autre paramètres et en particulier de s'intéresser à l'étude thermique et au refroidissement.

ANNEXES

Annexe

Annexe 1: le rapport D_{ext}/D_1 en fonction de nombre de pôles.

2. p	D_2/D_1
2	1.85 à 1.95
4	1.45 à 1.55
6	1.35 à 1.43
8	1.28 à 1.35
10	1.23 à 1.28
12	1.21 à 1.23

Annexe2 : section Normalisée

Section nominale (S_{nom}) en mm^2	Diamètre nu (d_{nu}) en mm	Diamètre avec isolation (d_{iso}) en mm
0.00785	0.1	0.125
0.00882	0.106	0.131
0.00985	0.112	0.139
0.01094	0.118	0.145
0.01227	0.125	0.153
0.01368	0.132	0.161
0.01539	0.14	0.170
0.01767	0.15	0.181
0.02011	0.16	0.192
0.02270	0.17	0.203
0.02545	0.18	0.215
0.02835	0.19	0.225
0.03142	0.2	0.236
0.03530	0.217	0.250
0.03941	0.224	0.262
0.04374	0.236	0.276
0.04909	0.25	0.290
0.05515	0.265	0.307
0.06158	0.28	0.322
0.07069	0.30	0.344
0.07793	0.315	0.360
0.08814	0.335	0.381
0.09898	0.355	0.403
0.1104	0.375	0.424
0.1257	0.4	0.450
0.1419	0.425	0.478
0.1590	0.45	0.503
0.1772	0.475	0.531
0.1964	0.5	0.556
0.2124	0.52	0.576
0.2206	0.53	0.587
0.2463	0.56	0.619
0.2642	0.58	0.640
0.2827	0.6	0.661
0.3117	0.63	0.692
0.3318	0.65	0.713
0.3526	0.67	0.735
0.3959	0.71	0.776
0.4418	0.75	0.817
0.4778	0.78	0.848
0.5027	0.8	0.869
0.5281	0.82	0.890
0.5674	0.85	0.921
0.6082	0.88	0.952
0.6362	0.9	0.973
0.7088	0.95	1.024
0.7854	1.00	1.076
0.8825	1.06	1.137
0.9852	1.12	1.199
1.095	1.18	1.260
1.225	1.25	1.332
1.368	1.32	1.404

Section normalisée (S_{nom}) en mm^2	Diamètre <i>nu</i> (d_{nu}) en mm	Diamètre avec isolation(d_{iso}) en mm
1.539	1.4	1.485
1.767	1.5	1.585
2.011	1.6	1.685
2.27	1.7	1.785
2.54	1.8	1.895
2.83	1.9	1.995
3.14	2	2.095
3.53	2.12	2.22
3.94	2.24	2.34
4.36	2.36	2.46

Annexe 3 : représente l'intensité du champ magnétique dans la culasse statorique et rotorique qui correspond à B_{c1} et B_{c2}

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	1010
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

Annexe 4 : représente l'intensité du champ magnétique dans la dent statorique et rotorique qui correspond à B_{z1} et B_{z2}

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	207	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	4180	4700	4920

B(H)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
2.1	5000	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

Annexe 5 : représente le coefficient de fuite différentielle k_{dd1} en fonction de $\frac{z_2}{p}$ et q_1 :

q_1	$\frac{z_2}{p}$						
	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

Annexe 6 : représente q_1 en fonction de $2p$ et la hauteur d'axe

Hauteur d'axe [mm]	$2p=2$	$2p=4$	$2p=6$
63	4	2	2
71	4	2	2
80-100	4	3	2
112-225	4	3	3
160	6	4	3
180-225	6	4	4
250	8	5	4
280-355	8	5	4

Annexe 7 : représente Krr_1 en fonction de q_1

q_1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8
Krr_1	-	0.0285	-	0.0141	0.0065	0.0052	-	-

ANNEXE 8 :

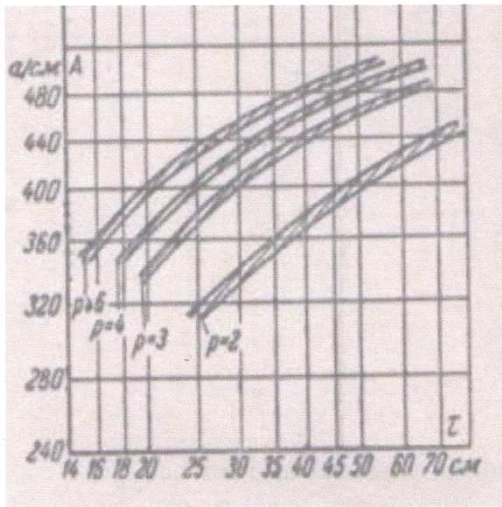


Fig. II.1 La charge linéaire en fonction du nombre de poles et le pas polaire

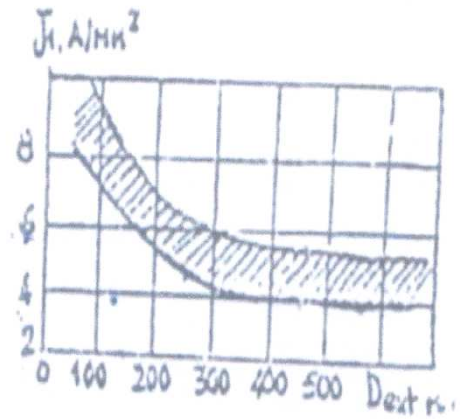


Fig. II.2 La densité de courant en fonction de diametre extérieur

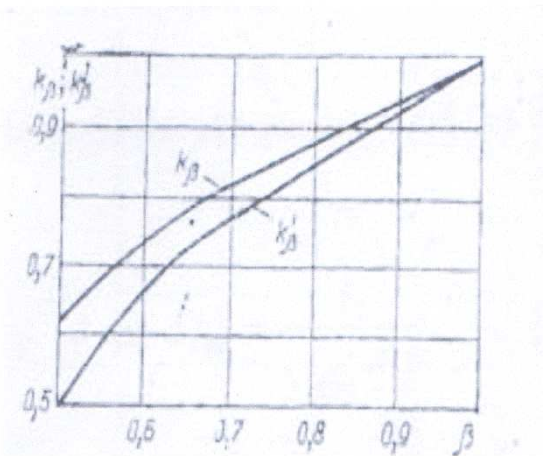


Fig. II.3 K_{B1}, K_{B2} en fonction de rapport de raccourcissement β

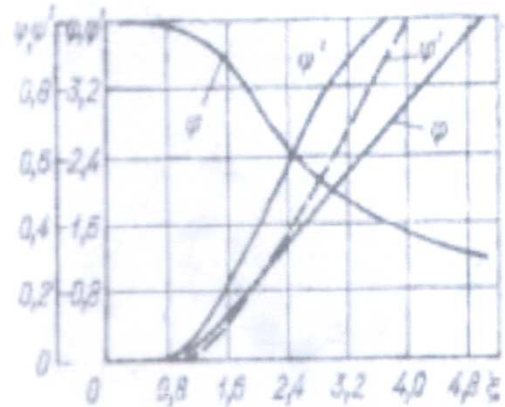


Fig. II.4. Les coefficients φ, φ' en fonction de ξ

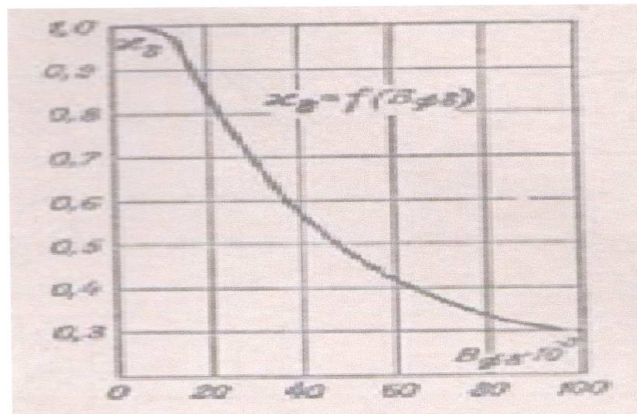
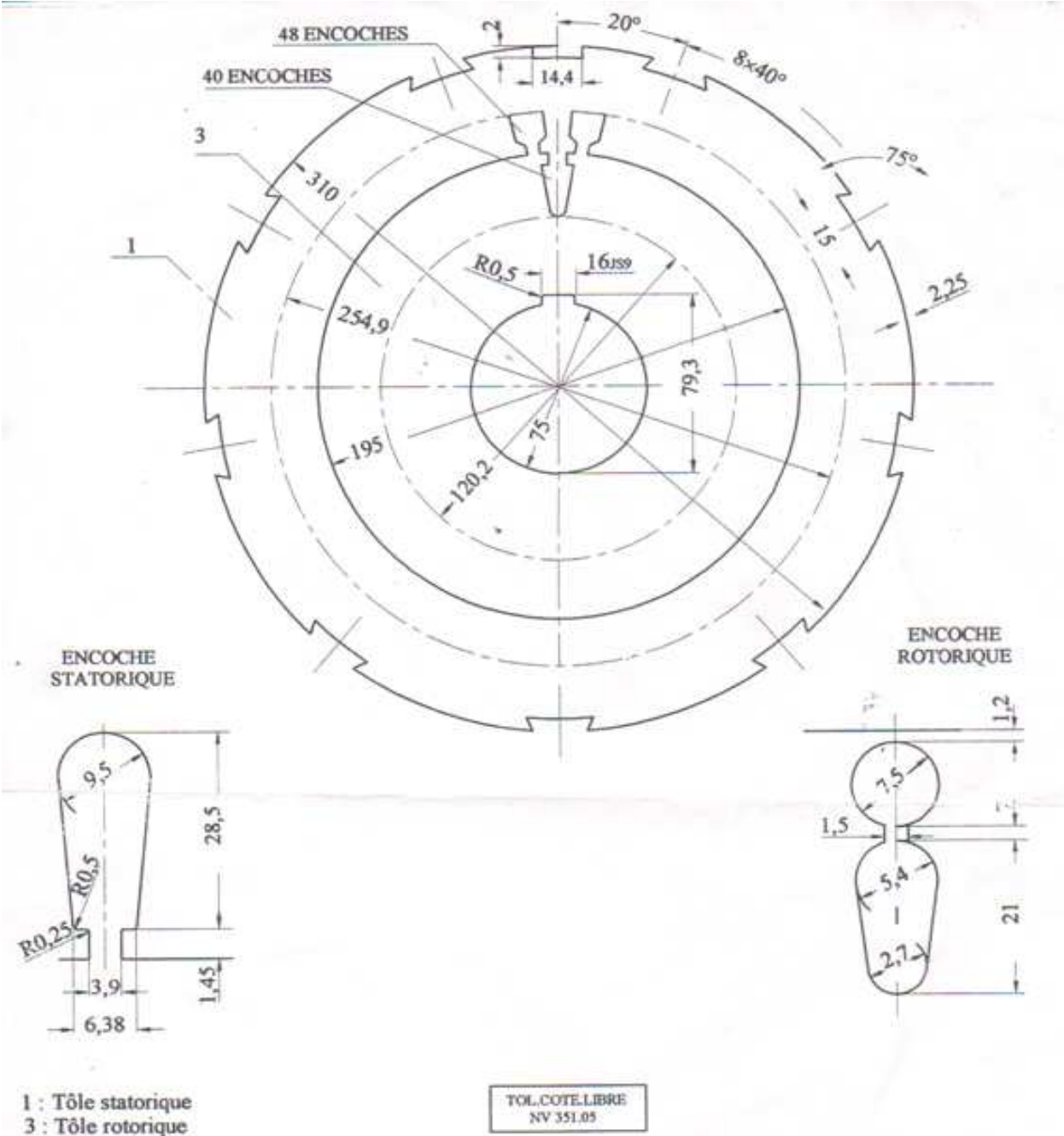


Fig. II.5. La constante x en fonction de B_ϕ

ANNEXE 9 :



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographique

[1] technique de l'ingénieur E3 996, 2/2001. Motorisation d'un véhicule électrique.

[2] véhicule électrique : technologie, performances et perspectives.

[3] les cahiers du Challenge Bibendum Roulons électrique

Véhicule hybrides et électriques paris 2011.

[4] Walid LAJNEF

Thèse doctorat 2006 «Modélisation des super condensateurs et évaluation de leur vieillissement en cyclage actif à forts niveaux de courant pour des applications véhicules électriques et hybrides » L'université Bordeaux1 école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur

[5] Le véhicule électrique Dossier technique A.N.F.A. Edition 1997.

[6] Aiman Nouh thèse doctorat «contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routières, l'université de technologie de Belfort-Montbéliard .Edition 26 Mars 2008

[7] Aigoun Abdellah DEUA 2010 « étude des pertes d'un moteur asynchrone a cage».

[8] Hosni Hassene master ETH 2012 « calcul optimal d'un moteur asynchrone à double cages à haut rendement ».

[9] Meddeb Abdelmoumen

Génie électrique « moteur asynchrone triphasé »Lycée secondaire Carthage présidence.
Année scolaire : 2000/2001.

[10] Victor Mester. Thèse doctorat 2007.

« Conception optimale systémique des composants des chaines de traction électrique »