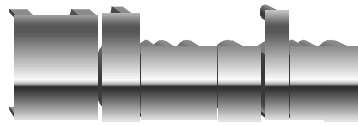


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



De fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION : **MACHINES ELECTRIQUES**

THEME

**CALCUL OPTIMAL D'UNE SERIE DE
MACHINES ASYNCHRONES
TRIPHASEES A CAGE D'ECUREUIL**

Présenté par :

M^f : HADJIH takfarinas

M^f : ADDAR yahia

M^f : AFLIHAOUI rezki



Encadré par :

M^f : BELASSEL

PROMOTION 2008

SOMMAIRE

Introduction générale	01
Liste des symboles	02

PARTIE I. CALCUL ELECTROMAGNETIQUE

Chapitre I. Dimensionnement du stator et du rotor

Introduction	06
I.1. Calcul et choix des dimensions principales du stator	06
I.2. Calcul et choix de l'enroulement statorique	11
I.3. Dimensionnement de la feuille statorique	13
I.4. Choix de l'entrefer	14
I.5. Dimensionnement du rotor	14

Chapitre II. Calcul du circuit magnétique.

Introduction	22
II.1. Circuit magnétique statorique	22
II.2. La force magnétomotrice dans l'entrefer	23
II.3. Circuit magnétique rotorique	24
II.4. La force magnétomotrice totale	26
II.5. Coefficient de saturation	26
II.6. Courant magnétisant	26
II.7. Réactance de magnétisation	26
II.8. Coefficient de dispersion magnétique du stator	27
II.9. Force électromotrice à vide	27

Chapitre III. Calcul des paramètres

Introduction	29
III.1. Paramètres statoriques	29
III.2. Paramètres rotoriques	31
III.3. Paramètres au démarrage	37

Chapitre IV. Calcul des pertes et du rendement

Introduction	41
IV.1. Pertes principales dans le fer	41
IV.2. Pertes électrique dans le cuivre et l'Aluminium	42
IV.3. Pertes mécaniques	42
IV.4. Pertes supplémentaires	42
IV.5. Pertes totales	43
IV.6. Rendement de la machine	43
IV.7. Calcul de la résistance de magnétisation	43

Chapitre V. Calcul des performances du moteur

Introduction	44
V.1. Schéma équivalent en L du moteur	44
V.2. Caractéristiques de fonctionnement du moteur	45
V.3. Caractéristique de démarrage et capacité de surcharge	47

PARTIE II. CALCUL THERMIQUE

Chapitre I. Calcul de l'échauffement

Introduction	50
I.1. Calcul de l'écart de température entre la surface intérieure du noyau statorique et celle de l'air à l'intérieur du moteur	51
I.2. Calcul de la chute de température dans l'isolation de la partie d'encoche de l'enroulement du stator	51

I.3. Calcul de l'augmentation de température dans la surface extérieure des parties frontales sur la température de l'air à l'intérieur du moteur.....	52
I.4. Calcul de la chute de température dans l'isolation des parties frontales de l'enroulement statorique.....	52
I.5. La valeur moyenne de l'augmentation de la température de l'enroulement statorique sur la température de l'air à l'intérieur du moteur.....	52
I.6. Surface conventionnelle de refroidissement du moteur.....	52
I.7. Pertes transmises dans l'air à l'intérieur du moteur.....	52
I.8. Ecart moyen de température entre l'air à l'intérieur du moteur et la température du milieu réfrigérant.....	53
I.9. Ecart moyen de température de l'enroulement statorique et la température du milieu réfrigérant.....	53

Chapitre II. Calcul de la ventilation

Introduction	54
II.1. Importance du problème.....	54
II.2. Calcul.....	55

PARTIE III. CALCUL MECANIQUE

Chapitre I. Calcul mécanique

Introduction	57
I.1. Calcul de l'arbre.....	57
I.2. Contraintes dans l'arbre.....	59
I.3. Vitesse critique.....	60
Organigramme général	63
Résultats et Courbes	68
Conclusion générale	88

Annexe

Bibliographie

INTRODUCTION GENERALE

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs employés le plus fréquemment dans l'industrie, cette importance peut être déduite d'une statistique qui indique que plus de 50 % de l'énergie électrique produite est transformée en énergie mécanique par les machines asynchrones. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile.

Les moteurs asynchrones sont largement utilisés dans l'industrie faite qu'ils sont construits dans une large gamme du point de vue de leurs puissances et de leurs caractéristiques de fonctionnement.

La méthode de calcul des machines asynchrones à cage d'écureuil utilisée dans notre projet repose sur des méthodes pratiques (par expérience) et théoriques.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, la tâche qui nous a été confiée est le calcul optimal d'une série de moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil, en élaborant un programme informatique permettant de calculer les différents paramètres de la machine en variant le rapport du diamètre intérieur et du diamètre extérieur, le nombre de voie parallèle, la densité du courant dans un conducteur et la charge linéaire.

Notre travail est reparti en trois parties :

La première partie est consacrée pour le calcul électromagnétique, elle est constituée de cinq chapitres, le premier est le dimensionnement du stator et du rotor, tandis que le deuxième chapitre est réservé au calcul du circuit magnétique. Au troisième chapitre, nous avons procédé à la détermination des paramètres de la machine. L'évaluation des pertes et du rendement est faite dans le quatrième chapitre, suivi du calcul des performances dans le cinquième chapitre.

La deuxième partie qui est le calcul thermique, est répartie en deux chapitres, le premier traite le calcul de l'échauffement, quant au deuxième, il est réservé au calcul de la ventilation.

La troisième partie est constituée d'un seul chapitre qui est consacré au calcul mécanique.

Et on termine notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I**DIMENSIONNEMENT DU STATOR ET DU ROTOR****Introduction**

Dans ce chapitre, nous déterminons toutes les dimensions géométriques du stator et du rotor ainsi que l'épaisseur de l'entrefer. Toutes en respectant les critères économiques et techniques exigées.

I.1.Calcul et choix des dimensions principales du stator

Le choix des dimensions principales du stator est basé sur :

I.1.a.Choix du diamètre extérieur

Le diamètre extérieur statorique des machines asynchrones pour différentes hauteurs d'axe est données suivant le tableau I.1.a (voir annexe).

I.1.b.Calcul du diamètre intérieur

Le diamètre intérieur du stator est déduit de la relation suivante : $D_1 = k_D \cdot D_{ext}$ et le coefficient K_D est donné en fonction du nombre de pôles $2P$ suivant le tableau I.1.b (voir annexe).

I.1.c.Longueur virtuelle de l'induit

La longueur virtuelle de l'induit c'est la longueur de l'induit fictif présentant la même reluctance d'induit réel sans canaux de ventilation, L_i est donnée par la formule suivante :

$$L_i = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot P_e}{\alpha_i \cdot K_f \cdot K_{enr1} \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot D_1^2 \cdot N} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-1}]$$

Avec : α_i - coefficient de recouvrement polaire ; K_f - Coefficient de forme de l'onde d'induction dans l'entrefer , et Dans le cas d'un champ sinusoïdal :

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} \quad , \quad K_f = \frac{\Omega}{2\sqrt{2}}$$

I.1.d.Facteur de géométrie de la machine

Le facteur géométrique de la machine décrit d'une manière la géométrie de la machine. Si λ est petit la machine aura un bon refroidissement et le montage des enroulements plus facile mais aura un grand diamètre donc un grand flux par rapport à

la longueur, et cela conduit consommation très élevée du cuivre. Lorsqu'il est élevé le moment d'inertie de la machine est plus petit et la quantité du cuivre pour les parties frontales est plus faible. λ doit être dans l'intervalle $[0,5 \div 0,8]$.

$$\lambda = L_i / D_1 \quad [\text{I-2}]$$

I.1.e.Le pas polaire

C'est la distance entre deux pôles voisins de nom différents, il est donné par l'expression suivante :

$$\tau = \pi \cdot D_1 / 2P \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-3}]$$

I.1.f.Puissance électromagnétique

C'est la puissance transmise du stator vers le rotor à travers l'entrefer lors du fonctionnement du moteur. Elle définie comme suit :

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n}{\eta_n \cos \varphi_n} \quad [\text{KVA}] \quad [\text{I-4}]$$

Avec : P_n — la puissance nominale de la machine, [KW].

$\cos \varphi_n$ — facteur de puissance nominale de la machine.

η_n — le rendement nominal de la machine.

K_e — coefficient qui tient compte de la chute de tension dans la phase statorique. Il est donné en fonction du nombre de paires de pôles par l'expression suivante :

$$K_e = 0,985 - 5 \cdot P \cdot 10^{-3} \quad [\text{I-5}]$$

P — nombre de paires de pôles.

I.1.g.Force électromotrice

La force électromotrice est donnée par la relation suivante :

$$E_1 = 4 \cdot K_f \cdot K_{enr1} \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot \phi \cdot 10^{-6} \quad [\text{V}] \quad [\text{I-6}]$$

Avec : K_{enr1} — coefficient de l'enroulement statorique.

W_1 — le nombre de spires en série d'une phase de l'enroulement statorique.

K_f — coefficient de la forme de l'onde d'inclinaison dans l'entrefer.

f_1 — la fréquence du réseau d'alimentation, elle est donnée par :

$$f_1 = N \cdot P / 60 \quad [\text{HZ}] \quad [\text{I-7}]$$

$N = \frac{60 f_1}{P}$: la vitesse de synchronisme, [Tour/min]

ϕ — le flux utile par pôle est donné par :

$$\phi = \alpha_i \cdot \tau \cdot L_i \cdot B_\delta \cdot 10^{-6} \quad \text{[Weber]} \quad \text{[I-8]}$$

I.1.h.Charge linéaire

Elle représente le courant total de la partie d'encoche par unité de longueur du périmètre de l'induit. Elle caractérise l'utilisation électrique de la machine, elle est donnée en fonction du diamètre extérieur pour différentes paires de pôles. Elle s'exprime comme suit :

$$A_1 = \frac{m_1 \cdot 2 \cdot I_{1n} \cdot W_1}{\pi \cdot D_1} \quad \text{[A/m]} \quad \text{[I-9]}$$

Avec : m_1 — nombre de phase statorique.

I_{1n} — courant nominal dans une phase statorique, [A].

En remplaçant le flux par son expression dans [I-8] on aura :

$$E_1 = 4 \cdot K_f \cdot K_{enr1} \cdot W_1 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot L_i \cdot B_\delta \quad \text{[V]} \quad \text{[I-10]}$$

En exprimant I_{1n} par la charge linéaire, et en remplacement I_{1n} et E_1 par leurs expressions on aura :

$$\frac{P_e}{D_1^2 \cdot L_i \cdot N} = \frac{\alpha_i \cdot K_f \cdot K_{enr1} \cdot A_1 \cdot B_\delta}{6,1 \cdot 10^{12}} = C_{ut} \quad \text{[I-11]}$$

C_{ut} — est appelé coefficient d'utilisation de la machine.

I.1.i.L'induction magnétique dans l'entrefer

L'induction magnétique dans l'entrefer est une grandeur importante dans la détermination des dimensions de la machine. Car c'est elle qui détermine la f.e.m et le couple d'où la puissance de la machine ce que nous amène à choisir une valeur de l'induction aussi élevée que possible, mais la saturation du fer limite notre choix, pour cela nous devons toujours veiller à ce que la valeur de l'induction soit comprise entre 0,6 et 0,9. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$B_\delta = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot P_e}{K_f \cdot K_{enr1} \cdot \alpha_i \cdot N \cdot A_1 \cdot L_i \cdot D_1^2} \quad \text{[T]} \quad \text{[I-12]}$$

Avec : A_1 — la charge linéaire, [A/m]

P_e — puissance électromagnétique, [KW]

α_i — coefficient de recouvrement polaire.

K_f — coefficient de forme de l'onde d'induction dans l'entrefer.

I.1.j. Coefficient d'enroulement statorique :

Il est défini comme étant le produit du coefficient de distribution par le coefficient de raccourcissement.

$$\mathbf{K}_{enr1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad [\text{I-13}]$$

Avec : K_{d1} — coefficient de distribution, il est calculé comme suit :

$$\mathbf{K}_{d1} = \frac{\sin(\alpha / 2)}{q_1 \sin(\alpha / 2 \cdot q_1)} \quad [\text{I-14}]$$

K_{r1} — coefficient de raccourcissement défini par :

$$\mathbf{K}_{r1} = \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) \quad [\text{I-15}]$$

Avec : q_1 — nombre d'encoches par pôles et par phases :

$$q_1 = Z_1 / 2 \cdot P \cdot m_1$$

$\beta = \frac{Y}{\tau}$: Rapport de raccourcissement.

I.1.k. Densité du courant

C'est le rapport entre l'intensité du courant et la surface du conducteur traversé par celui-ci, elle est choisie en fonction du degré de protection de la machine et la classe d'isolation. La valeur de la densité doit être comprise dans la partie hachurée de la figure 1.6 (voir annexe) pour minimiser le plus possible l'échauffement des enroulements.

I.2. calcul et choix de l'enroulement statorique

Le choix de l'enroulement du stator est basé sur :

I.2.a. Choix du type d'enroulement statorique

Le choix de l'enroulement statorique dépend essentiellement de la puissance de la machine et de plus au moins d'autres paramètres comme l'intensité du courant et de la quantité du cuivre.

Pour les machines asynchrones de puissance inférieure à 100KW, l'enroulement statorique est de type concentrique à une seule couche.

Il existe deux types d'enroulements concentriques :

- enroulement concentrique à une seule couche.
- enroulement concentrique à deux couches.

Dans notre étude on opte pour l'enroulement concentrique à une seule couche exécutée dans des encoches semi-ouvertes (trapézoïdales).

I.2.b.pas dentaire :

Le pas dentaire est défini comme étant la distance entre les axes de deux encoches voisines, il est donné par la relation suivante :

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-16}]$$

Avec : D_1 — diamètre intérieur du stator, [mm]
 Z_1 — nombre d'encoches statorique.

I.2.c. Le courant nominal dans une phase statorique

Il est donné par l'expression suivante :

$$I_{1n} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_n \cdot \eta_n \cdot \cos \varphi_n} \quad [\text{KA}] \quad [\text{I-17}]$$

Avec : P_n — la puissance nominale, [KW]
 U_n — la tension simple nominale, [V]
 η_n - rendement nominal.

$\cos \varphi_n$ — facteur de puissance nominal.

I.2.d.Nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche :

Il est défini comme étant le nombre de conducteur occupant une encoche. Il est donné par :

$$U_{encl} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{1n}} \quad [\text{I-18}]$$

Avec : A_1 — la charge linéaire, [A/m]
 a_1 — nombre de voies parallèles.

I.2.e. Nombre de spires par phase

C'est le nombre de spires que contient une phase statorique. Il est donné par :

$$W_1 = \frac{U_{enc1} \cdot Z_1}{2 \cdot a_1 \cdot m_1} \quad [I-19]$$

I.2.f. Section effective d'un conducteur

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff} = \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot J_1} \quad [mm^2] \quad [I-20]$$

Avec : J_1 — densité du courant dans l'enroulement statorique. Elle est donnée en fonction du diamètre extérieur.

Si la section effective calculée est supérieure à $1,8 \text{ mm}^2$, on doit deviser celle-ci en section élémentaire, et comme la section des conducteurs étant normalisée, on choisira la section standard la plus proche de celle calculée.

$$S_{el} = S_{eff} / N_{el} \quad [I-21]$$

Où : N_{el} — est un entier définit comme étant le nombre de conducteurs élémentaires.

Toutes ces opérations se fait automatiquement par le programme informatique, les sections standard sont données dans le tableau I.2.f (voir annexe).

I.3 Dimensionnement de la feuille statorique

La feuille statorique est dimensionnée comme suit :

I.3.a. Largeur de la dent

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

$$b_{Z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{Z1max}} \quad [mm] \quad [I-22]$$

Avec : K_{fer} — coefficient de remplissage du paquet des tôles statorique et rotorique : $K_{fer} = 0,95$ pour l'isolation avec oxydation
 $= 0,97$ pour l'isolation en vernie

B_{Z1max} — induction maximale dans la dent statorique en [T], elle est donnée par le tableau I.3.a (voir annexe).

Dans notre programme informatique $K_{fer} = 0,97$

I.3.b. Hauteur du dos du stator

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_1 \cdot \tau \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [mm] \quad [I-23]$$

Avec : B_{c1} — l'induction magnétique dans le dos du stator en [T], donnée par le tableau I.3.a (voir annexe).

I.3.c. Hauteur de la dent

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{z1} = 0,5.(D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-24}]$$

I.3.d. Largeur minimale de l'encoche

Elle est donnée par la formule suivante :

$$d_{enc11} = \frac{\pi.(D_1 + 0,2.h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-25}]$$

I.3.e. Largeur maximale de l'encoche

Elle est donnée par la formule suivante :

$$d_{enc12} = \frac{\pi.(D_1 + 2.h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-26}]$$

I.3.f. Hauteur de l'encoche :

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

$$h_{enc1} = h_{z1} - (h_{K1} + h_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-27}]$$

Où : h_{f1} — la hauteur de la fente d'encoche statorique, elle varie entre (1,2 ÷ 1,8) [mm].

h_{K1} — la largeur de la clavette, elle est donnée par l'expression suivante :

$$h_{K1} = 0,5.(d_{enc1} - b_{f1}) \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-28}]$$

b_{f1} — la largeur de la fente d'encoche statorique, $b_{f1} \leq 4$.

I.3.g. Section occupée par les conducteurs

C'est la section occupée par les conducteurs loger dans les encoches statoriques. Pour une encoche trapézoïdale elle est donnée par :

$$S_{enc1} = 0,5.(d_{enc11} + d_{enc12}).h_{enc1} - S_{iso} \quad [\text{mm}^2] \quad [\text{I-29}]$$

Avec : S_{iso} — est la section occupée par l'isolation de l'encoche, donnée par :

$$S_{iso} = e_1.(d_{enc11} + 2.h_{enc1}) + e_2.\frac{(d_{enc11} + d_{enc12})}{2} + e_3.d_{enc11} \quad [\text{mm}^2] \quad [\text{I-30}]$$

e_1 — épaisseur de revêtement de l'encoche, [mm]

e_2 — épaisseur de fermeture de l'encoche, [mm]

e_3 — épaisseur de la cale du milieu, [mm]

Les épaisseurs d'isolations e_1 , e_2 et e_3 sont données dans le tableau I.3.g (voir annexe)

I.3.h.Coefficient de remplissage

C'est le rapport entre la section des conducteurs occupant l'encoche et la section utile de l'encoche, il est donné par :

$$K_{rem} = \frac{U_{enc1} \cdot N_{el} \cdot (d_{iso})^2}{S_{enc1}} \quad [I-31]$$

Avec : U_{enc1} — le nombre de conducteurs dans l'encoche.

d_{iso} — diamètre du conducteur avec l'isolation en [mm], donné par le tableau

I.2.f (voir annexe).

Le coefficient de remplissage doit appartenir à l'intervalle [0,7 0,75].

I.3.i.Vérification des charges électromagnétiques :

Après avoir définitivement choisi les valeurs de U_{enc1} et la section normalisée, on passera à la vérification de la charge linéaire A_1 , l'induction B_δ et la densité du courant J_1 .

Les différences relatives entre les valeurs vérifiées et les valeurs préliminaires ne doivent pas excéder les 10%.

I.3.i.1.Charge linéaire :

La charge linéaire est le nombre d'ampère par mètre sur la périphérie d'induit.

$$A_1 = \frac{U_{enc1} \cdot I_{1n} \cdot Z_1}{\pi \cdot a_1 \cdot D_1 \cdot 10^{-3}} \quad [A/m] \quad [I-32]$$

I.3.i.2.Induction magnétique dans l'entrefer :

Induction magnétique dans l'entrefer caractérise l'utilisation électrique.

$$B_\delta = \frac{\phi}{\alpha_i \cdot \tau \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [T] \quad [I-33]$$

I.3.i.3.Flux sous un pôle

$$\phi = \frac{K_e \cdot U_n}{4 \cdot K_f \cdot W_1 \cdot K_{enr1} \cdot f_1} \quad [\text{Weber}] \quad [I-34]$$

I.4.Le choix de l'entrefer

Pour des raisons mécaniques, on choisit l'entrefer aussi grand que possible, un entrefer assez grand est également avantageux pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produites par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par les champs harmoniques supérieurs. Comme il doit aussi petit que possible afin d'avoir un

facteur de puissance qui s'approche au maximum de l'unité, et courant magnétisant minimal.

L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine. Elle est donnée en fonction de la hauteur de l'axe et les nombres pairs de pôles.

Dans notre programme informatique la valeur de l'entrefer est choisie automatiquement en fonction du diamètre extérieur.

I.5. Dimensionnement du rotor

Le rotor est à cage d'écureuil, celle-ci est constituée de barres logées dans des encoches ovales semi-ouvertes, courts-circuits à leurs extrémités.

La cage d'écureuil peut être présentée comme un enroulement polyphasé dont le nombre de paires de pôles est égal au nombre de paires de pôles du champ tournant.

I.5.1. Choix et calcul des dimensions principales

Le choix des dimensions principales du rotor est basé sur :

I.5.1.a. Choix du nombre d'encoches rotoriques

Pour éviter les couples parasites et les couple de vibration créés par les harmoniques des forces magnétomotrices, et le bruit magnétique qui est créé par l'attraction entre les dents du stator et les dents du rotor, ainsi que la pulsation périodique du flux, on doit choisir le nombre d'encoches du rotor différent de celui du stator tel que : $(Z_1 \neq Z_2), (Z_1 - Z_2 \neq \pm 2P)$ et $(Z_1 - Z_2 \neq \pm 1 + 2P)$

Z_1 et Z_2 sont choisis du tableau I.5.1.a (voir annexe) en fonction de la hauteur d'axe.

I.5.1.b. Diamètre extérieur du rotor

Il est donné par la formule suivante :

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-35}]$$

Avec : δ — est l'épaisseur de l'entrefer, [mm]

I.5.1.c. Pas dentaire

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-36}]$$

Avec : Z_2 — est le nombre d'encoches rotoriques.

I.5.1.d.Courant dans la barre

$$I_2 = 1,11 \cdot \frac{6 \cdot I_{1n} \cdot W_1 \cdot K_{enr1} \cdot \cos \varphi_n}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{enr2}} \quad [A] \quad [I-37]$$

Le rotor de notre machine est à cage d'écureuil, on considère cette cage est un enroulement polyphasé à un nombre de phase m_2 égal au nombre d'encoche Z_2 . Donc $K_{enr2} = 1$, $W_2 = 1/2$. Dans ce cas on aura :

$$I_2 = 1,11 \cdot \frac{6 \cdot I_{1n} \cdot W_1 \cdot K_{enr1} \cdot \cos \varphi_n}{Z_2} \quad [A] \quad [I-38]$$

I.5.2.Dimensionnement de la feuille rotorique

La feuille rotorique est dimensionnée comme suit :

I.5.2.a.Hauteur de la culasse rotorique

$$h_{c2} = 0,5 \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \tau \cdot \beta_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad [mm] \quad [I-39]$$

Avec : B_{c2} — l'induction dans la culasse rotorique.

I.5.2.b.Hauteur de la dent

$$h_{z2} = 0,5 \cdot (D_2 - D_{2int}) - h_{c2} \quad [mm] \quad [I-40]$$

Avec : D_{2int} — diamètre intérieur du rotor :

$$D_{2int} = (0,3 \div 0,35) \cdot D_2 \quad [mm]$$

I.5.2.c.Largeur de la dent

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2max}} \quad [mm] \quad [I-41]$$

I.5.3.Calcul de l'encoches rotoriques

Le programme informatique permet aux utilisateurs de choisir quatre types d'encoches rotoriques de formes différentes afin d'obtenir des résultats optimales. Les quatre types d'encoches sont :

- Encoche ovale semi ouverte (figure 5.3.a)
- Encoche ovale fermée (figure 5.3.b)
- Encoche ovale fermée inversée (figure 5.3.c)
- Encoche bouteille (figure 5.3.d)

I.5.3.a. Hauteur de l'encoche

Elle dépend du type d'encoche :

—Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$h_{enc2} = h_2 + 0,5.(d_{en11} + d_{en12}) \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-42}]$$

Avec : $h_2 = h_{Z2} - h_{f2} - h_{f22} - 0,5.(d_{en11} + d_{en12}) \quad [\text{mm}]$

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

$$h_{f2} = (0,5 \div 0,7) \quad [\text{mm}]$$

$$h_{f22} = 15 \quad [\text{mm}]$$

—Pour l'encoche de la figure 5.3.d :

$$h_{enc2} = h_2 + 0,5.(d_{en11} + d_{en12} + b_{f2}) \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-43}]$$

I.5.3.b. Diametre inférieur de l'encoche

Il dépend du type d'encoche choisi :

—Pour les encoches de la figure 5.3.a.b :

$$d_{enc21} = \frac{[\pi.(D_2 - 2.h_{Z2}) - Z_2.b_{Z2}]}{Z_2 - \pi} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-44}]$$

—Pour l'encoche de la figure 5.3.c :

$$d_{enc21} = (0,06 \div 0,80).d_{enc22} \quad [\text{mm}]$$

—Pour l'encoche de la figure 5.3.d :

$$d_{enc21} = \frac{[\pi.(D_2 - 2.h_{Z2}) - Z_2.b_{Z2}]}{Z_2 - \pi} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-45}]$$

I.5.3.c. Diametre supérieur de l'encoche

Il dépend du type d'encoche choisi :

—Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$d_{enc22} = \frac{[\pi.(D_2 - 2.h_{f2}) - Z_2.b_{Z2}]}{Z_2 + \pi} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-46}]$$

—Pour l'encoche 5.3.d :

$$d_{enc22} = \frac{[\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - 2 \cdot h_{f22}) - Z_2 \cdot b_{z2}]}{Z_2 + \pi} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-47}]$$

I.5.4. La cage rotorique

Elle est constituée des barres qui représentent les différentes phases logées dans les encoches choisies parmi les quatre types. Ces barres court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux.

I.5.4.a. Section de la barre

Elle est donnée en fonction de type d'encoche choisie :

—Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$S_b = 0,125 \cdot (d_{en11}^2 + d_{en12}^2) \pi + 0,5 \cdot (d_{en11} + d_{en12}) h_2 \quad [\text{mm}^2] \quad [\text{I-48}]$$

—Pour les encoches de la figure 5.3.d :

$$S_b = 0,125 \cdot (d_{en11}^2 + d_{en12}^2) \pi + 0,5 \cdot (d_{en11} + d_{en12}) h_2 + 0,5 \cdot (h_2 - 0,25 \cdot d_{enc12}) \quad [\text{mm}^2] \quad [\text{I-49}]$$

I.5.4.b. Densité du courant

C'est le rapport entre le courant et la section de la barre traversée par celui-la

$$J_b = \frac{I_2}{S_b} \quad [\text{A/mm}^2] \quad [\text{I-50}]$$

La valeur de J_b comprise entre $[2,5 \div 3,5]$

I.5.5. Dimensionnement de l'anneau

Le dimensionnement de l'anneau se fait comme suit :

I.5.5.a. Section de l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$S_{an} = (0,35 \div 0,45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot P} \quad [\text{mm}^2] \quad [\text{I-51}]$$

I.5.5.b. Hauteur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$h_{an} = (1,1 \div 1,25) \cdot h_{z2} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-52}]$$

I.5.5.c. Largeur de l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-53}]$$

I.5.5.d. Diamètre moyen de l'anneau

Il est donné par l'expression :

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I-54}]$$

I.5.5.e. Densité de courant dans l'anneau

Elle est donnée par l'expression :

$$J_{an} = \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad [\text{A/mm}^2] \quad [\text{I-55}]$$

Avec : I_{an} — courant dans l'anneau, il est donné par la relation :

$$I_{an} = \frac{I_b}{K_{red}} \quad [\text{A}]$$

K_{red} — coefficient de réduction qui donné par l'expression suivante :

$$K_{red} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot P}{Z_2}\right)$$

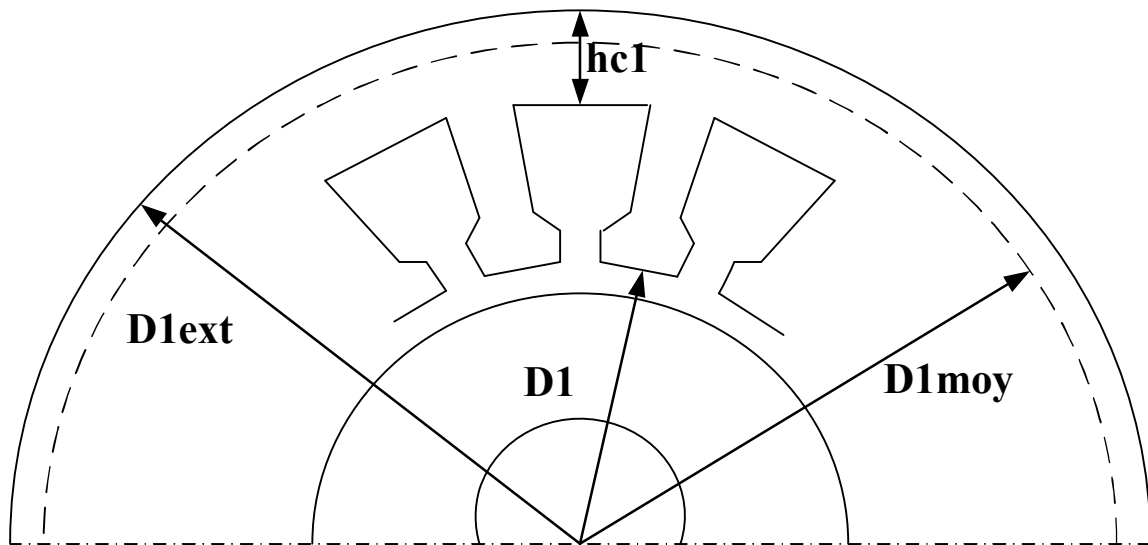


Schéma du stator

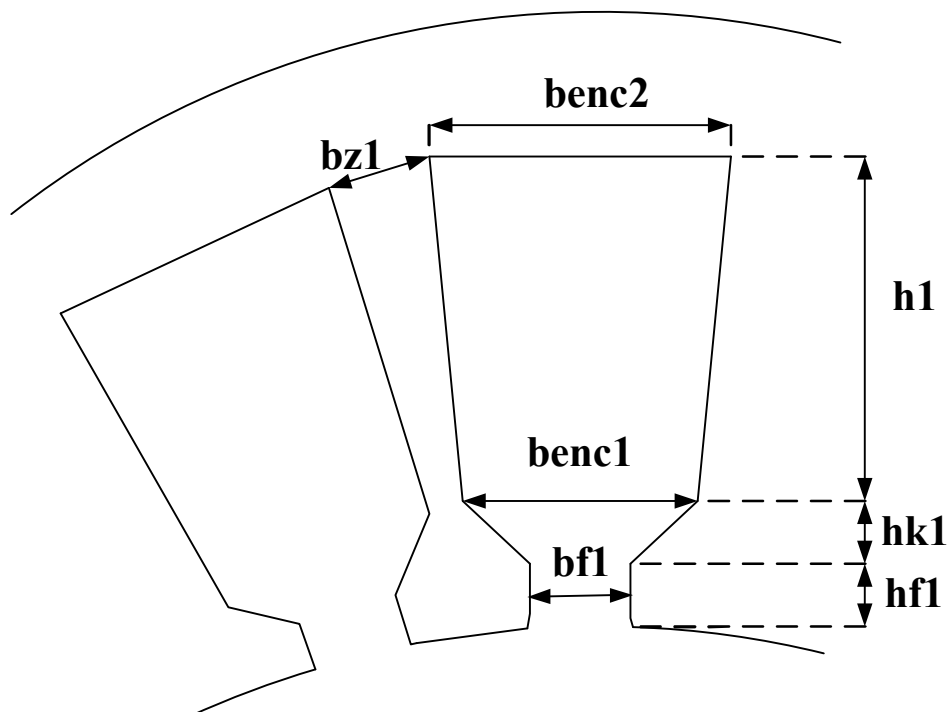


Schéma d'une encoche statorique trapézoïdale.

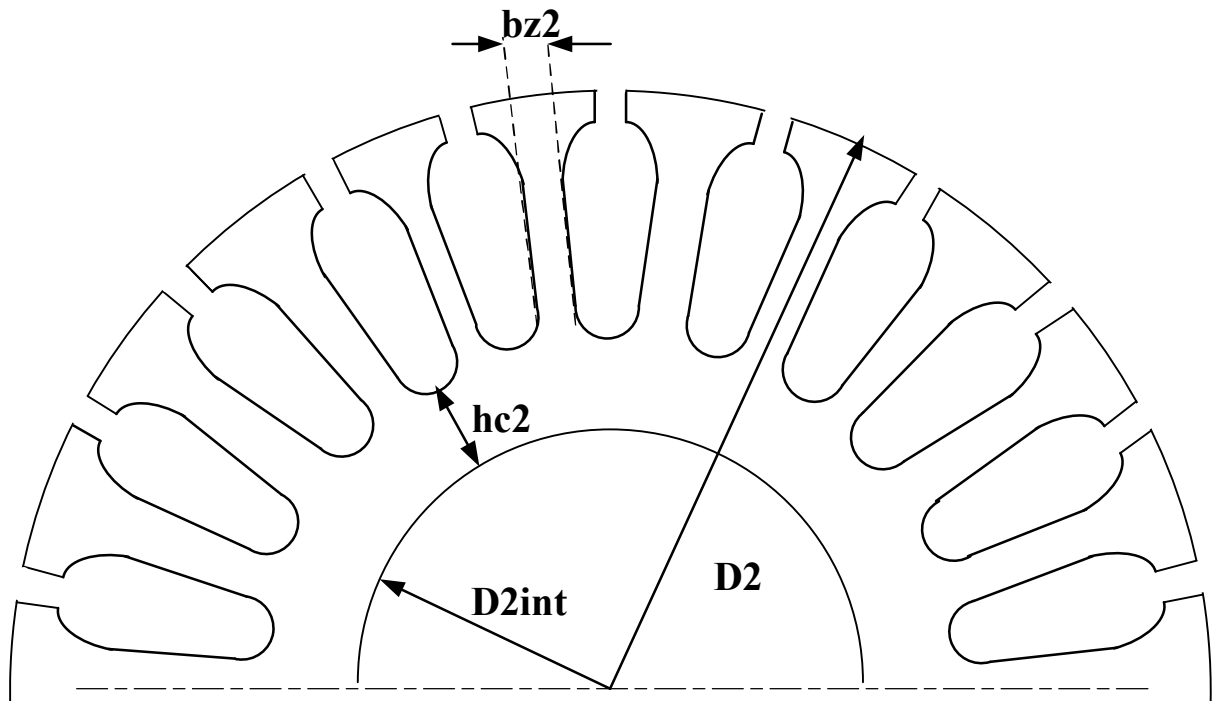


Schéma du rotor

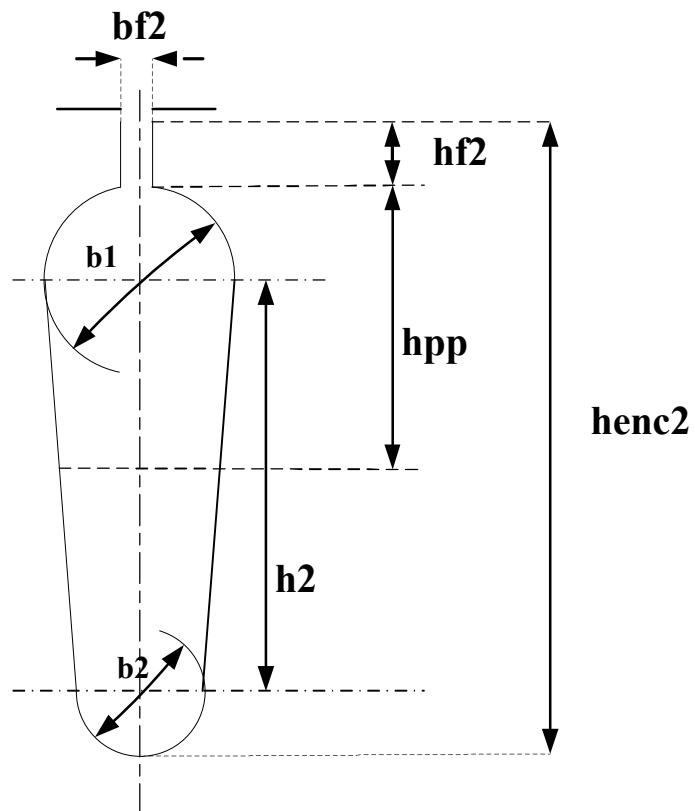


Schéma d'une encoche rotorique ovale

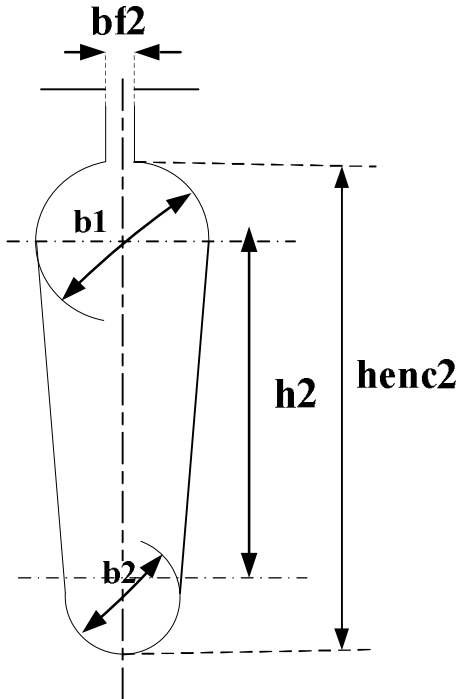


Figure 5.3.a

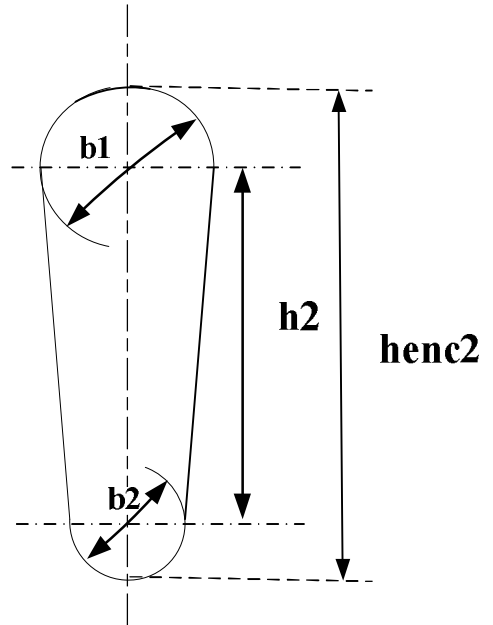


Figure 5.3.b

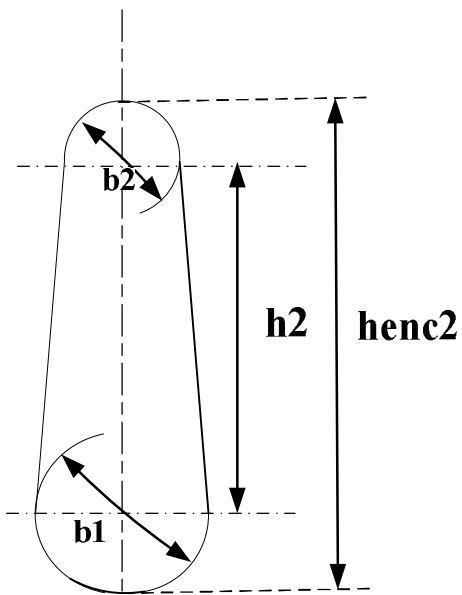


Figure 5.3.c

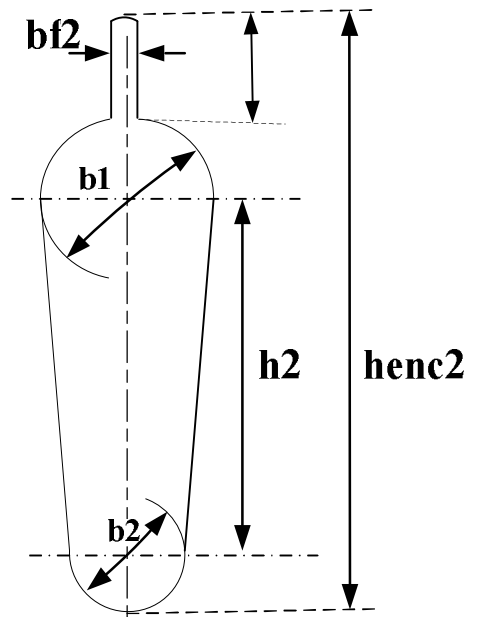


Figure 5.3.d

CHAPITRE II

CALCUL DU CIRCUIT MAGNETIQUE

Introduction

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

L'objectif de ce calcul consiste à déterminer les f.m.m qui nous permettra de trouver le courant magnétisant et réduire par la suite la réactance magnétique.

Le principe de ce calcul est basé sur la loi générale de circulation du champ magnétique (théorème d'Ampère) qui s'exprime comme suit :

$$F = \oint H \cdot dt . \quad [\text{II-1}]$$

Pour faciliter ce calcul, on subdivise le circuit magnétique en tronçons élémentaires de sorte que la valeur du champ dans chaque élément soit constante, l'intégral se ramène à la somme suivante :

$$F = \sum_1^n H_i \cdot L_i . \quad [\text{II-2}]$$

D'où : H_i — l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans le tronçon choisi.

L_i — représente la ligne moyenne du tronçon choisi.

Le circuit magnétique de la machine est constitué de cinq tronçons (voir figure II) :

- la culasse statorique
- la culasse rotorique
- les dents statoriques.
- les dents rotoriques.
- l'entrefer.

II.1.Circuit magnétique statorique

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

II.1.a-Induction dans la culasse

L induction dans la culasse du stator est déterminée par la conservation du flux à travers le pas polaire. Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B \delta}{K_{fer} \cdot h_{c1}} \quad [T] \quad [II-3]$$

II.1.b.Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse statorique

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi(D_{ext} - h_{c1})}{2 \cdot P} \quad [mm] \quad [II-4]$$

II.1.c.La force magnétomotrice dans la culasse du stator

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{c1} = L_{c1} \cdot H_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [A]. \quad [II-5]$$

Avec : H_{c1} — l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction dans la culasse.

II.1.d.Induction dans la dent du stator

L'induction dans la dent statorique est déterminée par la conservation du flux à travers le pas dentaire, elle est donnée par la relation suivante :

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{K_{fer} \cdot b_{z1}} \quad [T] \quad [II-6]$$

II.1.e.La force magnétomotrice dans la dent du stator :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad [A]. \quad [II-7]$$

Avec : H_{z1} — l'intensité du champ magnétique dans la dent qui correspond à B_{z1} .

II.2.La force magnétomotrice dans l'entrefer :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot K_{\delta} \cdot 10^{-3} \quad [A]. \quad [II-8]$$

Avec : K_{δ} — coefficient de CARTER qui tient compte de la non uniformité de l'entrefer, il est donné par la relation suivante :

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2}.$$

$K_{\delta 1}$ — coefficient qui prend en considération l'existence des encoches dans le stator :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{\left(t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f1}} \right)}$$

$K_{\delta 2}$ — coefficient qui prend en considération l'existence des encoches dans le rotor :

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

b_{f1} — est la largeur de la fente statorique, [mm]

b_{f2} — est la largeur de la fente rotorique, [mm]

II.3.Circuit magnétique rotorique

Le calcul du circuit magnétique se fait comme suit :

II.3.a.Induction dans la culasse rotorique

Elle est déterminée par la loi de conservation du flux.

$$B_{c2} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_{\delta}}{K_{fer} \cdot h_{c2}} \quad [T]. \quad [II-9]$$

II.3.b.Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse du rotor

Elle est donnée par la relation suivante :

$$L_{c2} = \frac{\pi}{2 \cdot P} (D_2 - 2h_{z2} - h_{c2}) + h_{c2} \quad [mm] \quad [II-10]$$

II.3.c.La force magnétomotrice dans la culasse du rotor

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot I_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [A]. \quad [II-11]$$

Avec : H_{c2} — l'intensité du champ magnétique dans la culasse qui correspond à B_{c2} .

II.3.d. Induction dans la dent du rotor

L'induction dans la dent du rotor est déterminée par la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire rotorique, elle est donnée selon le type d'encoches choisi.

—Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$B_{Z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{Z2}} \quad [T]. \quad [II-12]$$

Avec : b_{Z2} — est la largeur de la dent rotorique.

—Pour les encoches de la figure 5.3.d :

L'induction dans la partie inférieure du dent est :

$$B_{Z2i} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{Z2i}} \quad [T]. \quad [II-13]$$

Avec : b_{Z2i} — largeur de la partie inférieure de la dent

$$b_{Z2i} = (\pi / Z_2) (D_1 - 2h_{f2} - 2h_{f22} - d_{enc21}) - d_{enc21} \quad [mm]$$

L'induction dans la partie supérieure de la dent est :

$$B_{Z2S} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{Z2S}} \quad [T]. \quad [II-14]$$

Avec : b_{Z2S} — largeur de la partie supérieure de la dent

$$b_{Z2S} = (\pi / Z_2) (D_1 - 2h_{f2} - 2h_{f22}) - d_{enc22} \quad [mm]$$

II.3.e. La force magnétomotrice dans la dent du rotor

—Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$F_{Z2} = H_{Z2} \cdot (h_{Z2} - 0,4 \cdot d_{en2}) \cdot 10^{-3} \quad [A]. \quad [II-15]$$

—Pour les encoches de la figure 5.3.d :

$$F_{Z2} = F_{Z2S} + F_{Z2i} \quad [A]$$

Avec : F_{Z2S}, F_{Z2i} — sont respectivement les forces magnétiques dans la partie supérieure et inférieure de la dent, elles sont données comme suite :

$$F_{Z2S} = H_{Z2S} \cdot L_{Z2S} \cdot 10^{-3} \quad [A]$$

D'où : $L_{z2s} = h_{f22} + h_{f2}$

$$F_{Z2i} = H_{Z2i} \cdot L_{Z2i} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}]$$

D'où : $L_{Z2i} = h_2 + [0,5(d_{enc22} + d_{enc21})]$

II.4. La force magnétomotrice totale

La force magnétomotrice totale est la somme des forces magnétomotrices partielles du circuit, elle est donnée par la relation suivante :

$$F = \sum F_i = 2F_\delta + 2F_{Z1} + 2F_{Z2} + F_{c1} + F_{c2} \quad [\text{A}]. \quad [\text{II-16}]$$

Le facteur (2) de l'expression est dû au fait que l'entrefer et les dents statoriques et rotoriques sont parcourus deux fois par les lignes de champs magnétiques.

II.5. Coefficient de saturation

Il existe deux principaux coefficients de saturation :

a) Coefficient de saturation des dents :

$$K = \frac{F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2}}{F_\delta} \quad [\text{II-17}]$$

b) Coefficient de saturation de la machine :

$$K_\mu = \frac{\sum F_i}{2.F_\delta} = \frac{2(F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2}) + F_{c1} + F_{c2}}{2.F_\delta} \quad [\text{II-18}]$$

II.6. Courant magnétisant

Le courant magnétisant représente la partie réactive du courant à vide. Il est donné par la relation suivante :

$$I_\mu = \frac{P.F}{0,9.m_1.W_1.K_{enr1}} \quad [\text{A}]. \quad [\text{II-19}]$$

II.7. Réactance de magnétisation

Elle est donnée par la relation :

$$X_m = \frac{K_e.U_n}{I_\mu} \quad [\Omega]. \quad [\text{II-20}]$$

Avec : K_e — coefficient qui varie entre 0,9 et 0,98.

II.8. Coefficient de dispersion magnétique du stator

Il est donné par la relation :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m} \quad [\text{II-21}]$$

Avec : X_1 — réactance inductive de dispersion de l'enroulement statorique.

II.9. Force électromotrice à vide

Elle est donnée par la relation :

$$E_0 = \frac{U_n}{(1 + \sigma_{\mu})} \quad [\text{V}]. \quad [\text{II-22}]$$

Remarque

Les courbes de magnétisation de $B_z = f(H_z)$ et de $B_c = f(H_c)$ qui sont données sous forme de tableau, nous ont permis de les linéariser dans les différents intervalles.

Les résultats de la linéarisation permis au programme de calculer automatiquement les valeurs des intensités qui correspondent aux inductions dans les différentes parties de la machine.

Les expressions des formules obtenues sont les suivantes :

a) dents statoriques et rotoriques :

$$\begin{aligned} 0,4 < B_z < 0,63 & \dots\dots\dots H_z = \exp[2,0545.B_z + 4,0039] \\ 0,63 < B_z < 1,35 & \dots\dots\dots H_z = \exp[(B_z + 3,3141)/0,7435] \\ 1,35 < B_z < 1,63 & \dots\dots\dots H_z = \exp[(B_z + 2,0625)/0,5429] \\ 1,63 < B_z < 1,95 & \dots\dots\dots H_z = \exp[(B_z + 0,6018)/0,3273] \\ 1,95 < B_z < 2,30 & \dots\dots\dots H_z = \exp[(B_z - 0,3257)/0,2062] \end{aligned}$$

b) la culasse statoriques et rotoriques :

$$\begin{aligned} 0,70 < B_c < 1,00 & \dots\dots\dots H_c = \exp[(B_c + 1,49809)/0,477331] \\ 1,00 < B_c < 1,45 & \dots\dots\dots H_c = \exp[(B_c + 1,5575)/0,496] \\ 1,45 < B_c < 1,58 & \dots\dots\dots H_c = \exp[(B_c + 0,304)/0,28826] \\ 1,58 < B_c < 1,75 & \dots\dots\dots H_c = \exp[(B_c - 0,0965)/0,2275] \\ 1,75 < B_c < 1,95 & \dots\dots\dots H_c = \exp[(B_c - 0,42226)/0,18034] \\ 1,95 < B_c < 2,04 & \dots\dots\dots H_c = \exp[(4,3518B_c - 0,0343)] \\ 2,04 < B_c < 2,09 & \dots\dots\dots H_c = \exp[(6,445B_c - 4,296)] \end{aligned}$$

Les inductions en [Tesla] et les champs en [A/m].

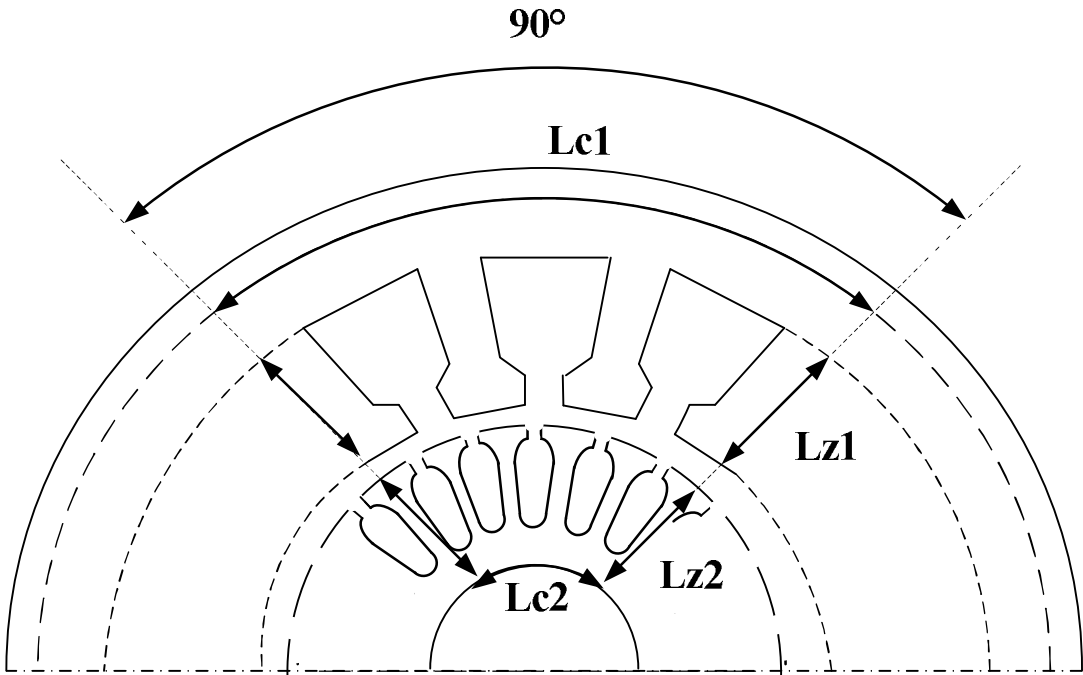


Schéma du circuit magnétique

CHAPITRE III

CALCUL DES PARAMETRES

Introduction

On se propose dans ce chapitre de calculer les résistances (R_1, R_2, R_m, R_{2dem}) et les réactances (X_1, X_2, X_{2dem}) pour pouvoir déterminer les différentes caractéristiques du moteur.

III.1. paramètres statoriques

On calcul les paramètres statoriques comme suit :

III.1.1. résistance active d'une phase du stator

La résistance par phase est calculée par la formule suivante :

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 L_{w1} \cdot 10^{+3}}{a_1 \cdot N_{el} \cdot S_{eff1}} \quad [\Omega] \quad \text{[III.1]}$$

Avec : $\rho_{cu}(T)$ — résistivité du cuivre à la température (T).

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

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

L_{w1} — longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, elle est calculée comme suit : $L_{w1} = 2 \cdot (L_{w1} + L_{f1})$ [mm]

Ou : L_i — la longueur virtuelle de l'induit.

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

$$L_{f1} = (1,16 + 0,14 \cdot P) \cdot b_{1moy} + 15 \quad [\text{mm}]$$

B_{1moy} — la longueur moyenne d'une section.

$$B_{1moy} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot Y_{1moy}}{Z_1} \quad [\text{mm}]$$

Y_{1moy} — pas moyen d'un groupe de section

III.1.2. réactance de fuite et perméances du stator

On distingue dans cette partie trois types de réactances :

a) Réactance de fuite d'encoche

Elle est due aux flux de fuite qui se referment autour des conducteurs, elle est donnée par :

$$X_{enc1} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{P \cdot q_1 \cdot 10^{+8}} \lambda_{enc1} \quad [\Omega] \quad [III-2]$$

Avec : λ_{enc1} — permeances d'encoche, elle est donnée par :

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_{enc1}} K_{B1} + \left(\frac{h_{11}}{b_{enc1}} + \frac{3 \cdot h_{K1}}{b_{enc1} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) K_{B2}$$

$$h_{11} = h_{enc1} - h_1$$

Avec : K_{B1} et K_{B2} coefficients donnée suivant la figure 1.6 (voir l'annexe).

$K_{B1} = K_{B2} = 1$, pour un enroulement concentrique.

b) Réactance de fuite différentielle

la réactance de fuite différentielle est due au flux de fuite qui se reforme d'une dent à une autre à travers l'entrefer, au flux différentielle de phrase, et au flux différentielle de l'encoche, elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{P \cdot q_1 \cdot 10^{+8}} \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad [III-3]$$

Avec : λ_{1d} — coefficient de perméance différentielle, il est donnée par :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{enr1})^2}{K_\delta \cdot \delta} \cdot K_{rr1} \cdot K_{dd1} \cdot K_{r1}$$

Avec :

$$K_{r1} = 1 - \left(\frac{0,033 \cdot b_{f1}^2}{\delta \cdot t_1} \right)$$

K_{rr1} — coefficient qui dépend de q_1 donné par le tableau T.7

K_{dd1} — coefficient de fuite différentiel donnée par le tableau T.8 en fonction de Z_2/P et q_1 .

λ_{1f} — perméance frontale proportionnelle à la réactance de fuite frontale.

Elle est donnée comme suit :

$$\lambda_{1f} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{L_i} (L_{f1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau)$$

β — rapport de raccourcissement, exprime en [rad]

c) Réactance de fuite frontal

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

$$X_{1f} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{P \cdot q_1 \cdot 10^{+8}} \lambda_{1f} \quad [\Omega] \quad \text{[III.4]}$$

La réactance totale est donnée par :

$$X_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{P \cdot q_1 \cdot 10^{+8}} \lambda_1 \quad [\Omega] \quad \text{[III.5]}$$

Avec : $\lambda_1 = \lambda_{1d} + \lambda_{encl} + \lambda_{1f}$

III.2. Paramètres rotorique

Les paramètres rotoriques sont donnés comme suit :

III.2.1. résistances actives de la barre

La résistance active de la barre est donnée selon le type d'encoche dans les expressions suivantes :

—Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$R_b = \rho_{al}(T) \frac{L_i}{S_b} \cdot 10^{+3} \quad [\Omega] \quad \text{[III.6]}$$

—Pour les encoches de la figure 5.3.d :

Avec : R_{bs} , R_{bi} — sont respectivement les résistances actives de la partie supérieure et intérieure de la barre. Elles sont calculées comme suite :

$$R_{bs} = \rho_{al}(T) L_i \cdot \frac{10^{+3}}{S_{bs}} \quad [\Omega] \quad \text{[III.7]}$$

$$\text{Si } \xi > 1 : \quad R_{hi} = \rho_{al}(T) \cdot L_i \cdot \frac{10^{+3}}{S_{bi}} \quad [\Omega] \quad \text{[III.8]}$$

Donc la résistance active de la barre doit-etre égale à :

$$R_b = \frac{R_{bs} \cdot R_{bi}}{(R_{bs} + R_{bi})} \quad [\Omega] \quad \text{[III.9]}$$

$$\text{Sinon :} \quad R_b = R_{bs} \quad [\Omega] \quad \text{[III.10]}$$

Avec : S_{bs} — la section de la partie supérieure de la barre.

S_{bi} — la section de la partie inférieure de la barre.

$\rho_{al}(T)$ — résistivité de l'aluminium à la température T, donnée comme suite :

$$\rho_{al}(T) = 46,5 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot m]$$

$$\rho_{al}(T) = 48,8 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot m]$$

Avec : $L_i = L_b$

NB : On assimile lors du calcul la longueur de l'induit avec celle de la barre.

III.2.2. Résistance de l'anneau

La résistance de l'anneau est donnée par l'expression suivante :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al}(T) \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{an} \cdot 10^{+3}}{Z_2 \cdot S_{an}} \quad [\Omega] \quad \text{[III.11]}$$

Avec : S_{an} — section de l'anneau en $[\text{mm}^2]$.

D_{an} — diamètre moyen de l'anneau en $[\text{mm}]$.

III.2.3. Résistance de l'anneau ramenée à la barre

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

$$R_{an-ram-b} = \frac{R_{an}}{(K_{red})^2} \quad [\Omega] \quad \text{[III.12]}$$

Avec : K_{red} — coefficient de réduction.

III.2.4. Résistance de l'anneau ramenée au stator

La résistance de l'anneau ramenée au stator est donnée par l'expression suivante :

$$R_{an-ram} = M.R_{an-ram-b} \quad [\Omega] \quad [III.13]$$

Avec : M— coefficient de réduction de la cage rotorique vers le stator.

III.2.5. Résistance active d'une phase rotorique

Elle est définie comme étant la somme de la résistance de la barre et la résistance de l'anneau ramenée à la barre :

—Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$R_2 = R_b + R_{an-ram-b} \quad [\Omega] \quad [III-14]$$

—Pour la figure 5.3.d :

$$\text{Si } g=1 \quad R_2 = R_{an-ram-b} + R_{bs} \quad [\Omega] \quad [III.15]$$

Sinon :

$$R_2 = \frac{1}{g} \left(R_{an-ram-b} + \frac{R_{bs} \cdot R_{bi}}{R_{bs} + R_{bi}} \right) \quad [\Omega] \quad [III-16]$$

III.2.6. Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator

La résistance d'une phase rotorique ramenée au stator est donnée par les expressions suivantes :

—Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$R_{2ram} = M.R_2 \quad [\Omega] \quad [III-17]$$

—Pour l'encoche de la figure 5.3.d :

$$\text{Si } g=1 \quad R_{2ram} = R_{an-ram} + R_{rams} \quad [\Omega] \quad [III-18]$$

$$\text{Si } g \neq 1 \quad R_{2ram} = \frac{1}{g} \left(R_{an-ram} + \frac{R_{rams} \cdot R_{rami}}{R_{rams} + R_{rami}} \right) \quad [\Omega] \quad [III-19]$$

$$\text{Avec : } R_{rams} = M.R_{bs} \quad [\Omega]$$

$$R_{rami} = M.R_{bi} \quad [\Omega]$$

R_{rams} — résistance active de la partie supérieure de la barre ramenée au stator.

R_{rami} — résistance active de la partie inférieure de la barre ramenée au stator.

$$M = \frac{4m_1}{Z_2} \cdot \frac{(W_1 \cdot K_{enr1})^2}{(K_{ob})^2}$$

Avec : K_{ob} — coefficient d'obliquité des encoches rotorique, donnée par :

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\frac{\alpha_{ob}}{2}}$$

α_{ob} — angle d'inclinaison des encoches.

$$\alpha_{ob} = \frac{2 \cdot P \cdot \pi \cdot \beta_{ob}}{Z_2}$$

III.2.7. Reactances de dispersions et perméances du rotor

Dans cette partie, on distingue trois termes différents des réactances :

-la réactance de fuite d'encoche, due au flux de fuite se refermant autour des conducteurs.

-La réactance frontale c'est-à-dire la partie de l'enroulement située dans l'air à chaque extrémité du paquet de tôles, et la réactance due au flux différentiel dont la valeur est très élevée dans les machines à faible entrefer.

-La réactance de fuite due à l'induction dans les encoches de la figure 5.3.a.b.c.

-La réactance de fuite globale est donnée par :

a) Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad \text{[III-20]}$$

Avec : λ_2 - perméance de dispersion du rotor. Elle est donnée par :

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob}$$

$\lambda_{2enc}, \lambda_{2d}, \lambda_{2f}, \lambda_{ob}$ sont respectivement les perméances : d'encoche, différentielle, frontale et oblique. Elles sont données par les relations suivantes :

—Pour l'encoches ovale de la figure 5.3.a :

$$\lambda_{2enc} = C_i + \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right)$$

—Pour les encoches ovales de la figure 5.3.b.c :

$$\lambda_{2enc} = C_i + 0,3 + \left(\frac{1,12 \cdot h_{f2} \cdot 1000}{I_2} \right)$$

Avec :

$$C_i = \psi \cdot \left[\left(\left(\frac{h_2 + 0,4b_2}{3 \cdot b_1} \right) \cdot \left(\frac{1 - \pi \cdot b_1}{8 \cdot S_b} \right)^2 + 0,66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot b_1} \right) \right) \right]$$

La courbe de la figure 1.7 donne les valeur de ψ en fonction de ξ dans le cas du régime nominal $\psi = 1$.

$$\lambda_{2d} = \frac{0,9 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot p} \right)^2}{\delta \cdot K_\delta} \cdot K_{dd2}$$

Avec : K_{dd2} — coefficient de fuite différentielle donné en fonction de Q_2 (voir la figure.2.1). L'équation qui correspond à l'allure de la courbe est donnée par :

$$K_{dd2} = \frac{9,15}{100 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot P} \right)^2}$$

$$\lambda_{2r} = \frac{2,3 \cdot D_{anmoy}}{Z_2 \cdot L_i (K_{red})^2} \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{anmoy}}{2 \cdot (h_{an} + L_{an})} \right)$$

$$\lambda_{ob} = \frac{t_2 \cdot \beta_{ob}^2}{9,5 \cdot \delta \cdot K_\delta \cdot K_\mu}$$

Avec : K_μ — coefficient de saturation de la machine.

b) pour les encoches bouteille (figure 5.3.d) :

$$X_2 = X_0 + X_i \left[\frac{S_{bi}}{(S_{bi} + S_{bs})} \right]^2 \quad [\Omega] \quad \text{[III-21]}$$

Avec : X_0 — la réactance de dispersion de l'enroulement rotorique.

X_i — la réactance de dispersion de la partie inférieure de l'encoche.

Elles sont calculées par les relations suivantes :

$$X_0 = \frac{X_1 \cdot \lambda_{20}}{\lambda_1} \quad [\Omega] \quad \text{[III-22]}$$

$$X_i = \frac{X_1 \cdot \lambda_{2i}}{\lambda_1} \quad [\Omega] \quad \text{[III-23]}$$

Avec : λ_{20} — perméance de dispersion de l'enroulement rotorique.

λ_{2i} — perméance de dispersion de la partie inférieure de l'encoche.

$$\lambda_{20} = \lambda_{2M} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f}$$

Avec λ_{2M} — perméance naturelle entre la partie inférieure et la partie supérieure de l'encoche.

λ_{2d} — perméance différentielle.

λ_{2f} — perméance frontale.

Elles sont calculées comme suit :

$$\lambda_{2M} = \frac{h_{f22} - 0,1 \cdot b_{f2}}{2 \cdot b_{f2}} + 1,09 + \frac{1,12 \cdot h_{f2}}{I_2} \cdot 10^{+3}$$

λ_{2d} et λ_{2f} sont calculées précédemment.

$$\lambda_{2i} = \psi' \cdot \left[\left((h_2 + 0,4 \cdot b_1) \left(1 - \frac{\pi \cdot b_2^2}{8 \cdot S_{bi}} \right) / 3 \cdot b_2 \right) + 0,66 - \left(\frac{b_{f2}}{2 \cdot b_2} \right) \right] + h_{f22} - \left(\frac{0,1 \cdot b_{f2}}{2 \cdot b_{f2}} \right)$$

La courbe de la figure 1.7 donne les valeurs de ψ' en fonction de ξ , dans le cas du régime nominal $\psi' = 1$.

III.2.7. Réactance du rotor ramenée au stator

La réactance du rotor ramenée au stator est donnée par les formules suivantes :

a) Pour l'encoche de la figure 5.3.a.b.c :

$$X_{2ram} = M \cdot X_2 \quad [\Omega] \quad \text{[III-24]}$$

b) Pour l'encoche de la figure 5.3.d :

$$X_{2ram} = X_{0ram} + X_{iram} \cdot \left[\frac{S_{bi}}{(S_{bs} + S_{bi})} \right] \quad [\Omega] \quad \text{[III-25]}$$

$$\text{Ou :} \quad X_{0ram} = \frac{X_1 \cdot \lambda_{20ram}}{\lambda_1} \quad [\Omega] \quad \text{[III-26]}$$

$$X_{iram} = \frac{X_1 \cdot \lambda_{2iram}}{\lambda_1} \quad [\Omega] \quad \text{[III-27]}$$

Avec : X_{0ram} — la réactance de dispersion de l'enroulement rotorique ramenée au stator.

X_{iram} — la réactance de dispersion de la partie inférieure de l'encoche ramenée au stator.

λ_{20ram} — perméance de dispersion de l'enroulement rotorique ramenée au stator.

λ_{2iram} — perméance de dispersion de la partie inférieure de l'encoche ramenée au stator.

Elles sont calculées comme suit :

$$\lambda_{20ram} = \frac{\lambda_{20} \cdot K_{enr}^2 \cdot Z_1}{Z_2}$$

$$\lambda_{2iram} = \frac{\lambda_{2i} \cdot K_{enr}^2 \cdot Z_1}{Z_2}$$

III.3. Paramètres au démarrage

Pour un moteur asynchrone à cage, rotor immobile à la mise sous tension, les barres de la cage sont soumises à un champ de fréquence égale à la fréquence des tensions primaires ; la profondeur de pénétration du courant est alors faible (par effet pelliculaire) ; 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 $f_2 = 8 \cdot f_1$, donc la profondeur de pénétration augmente et la résistance de la cage diminue.

III.3.1. Profondeur de pénétration

La profondeur de pénétration du courant dans la barre rotorique est donnée par la relation suivante :

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

Avec : h_b — la hauteur de la barre.

φ_1 — coefficient qui dépend de la valeur de ξ , il est donné par la courbe de la figure 1.7.

$$\xi = 0,166.h_b.\sqrt{g} \quad \text{Pour } T=75^\circ\text{C}$$

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

III.3.2. La largeur à la limite de pénétration

La largeur à la limite de pénétration est donnée par l'expression suivante :

$$b_{pp} = d_{enc11} - \left[\left(\frac{d_{enc11} - d_{enc12}}{h_2} \right) \left(h_{pp} - \frac{d_{enc11}}{2} \right) \right] \quad [\text{mm}]$$

III.3.3. Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage

La section de la barre pénétrée par le courant de démarrage est donnée par l'expression suivante :

$$S_{bdem} = \left(\frac{\pi.d_{enc11}^2}{8} \right) + [0,5.(d_{enc11} + b_{pp})(h_{pp} - 0,5.d_{enc11})] \quad [\text{mm}]$$

III.3.4. Résistance de la barre au démarrage :

La résistance de la barre au démarrage est donnée par les relations suivantes :

a) Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$R_{bdem} = R_b.K_{dep} \quad [\Omega] \quad \text{[III-28]}$$

b) Pour la dernière encoche de la figure 5.3.d :

$$R_{bdem} = R_{bs}.K_{dep} \quad [\Omega] \quad \text{[III-29]}$$

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

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}}$$

III.3.5. Résistance de la cage au démarrage

La résistance de la cage au démarrage est donnée par :

$$R_{2dem} = R_{an-ram-b} + R_{bdem} \quad [\Omega] \quad \text{[III-30]}$$

Avec : $R_{an-ram-b}$ — la résistance active de l'anneau ramenée à la barre.

III.3.6. Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator

La résistance de la cage au démarrage ramenée au stator est donnée par :

$$R_{2dem-ram} = M.(R_{an-ram-b} + R_{bdem}) \quad [\Omega] \quad \text{[III-31]}$$

III.3.7. Réactance de fuite au démarrage

La réactance de fuite au démarrage est donnée par la relation suivante :

a) Pour les encoches de la figure 5.3.a.b.c :

$$X_{2dem} = 7,9.f_1.L_i.\lambda_{2dem}.10^{-9} \quad [\Omega] \quad \text{[III-32]}$$

Avec : X_{2dem} — réactance de dispersion du rotor au démarrage.

λ_{2dem} — perméance de dispersion du rotor au démarrage. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_{2dem} = \lambda_{2encdem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob}$$

Seule la perméance d'encoche qui est affectée par l'effet pelliculaire.

b) Pour l'encoche de la figure 5.3.d :

$$X_{2dem} = X_0 + X_i \left[\frac{S_{bi}}{S_{bi} + S_{bs}} \right]^2 \quad [\Omega] \quad \text{[III-33]}$$

III.3.7. Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator

La réactance de fuite au démarrage ramenée au stator est donnée par la relation suivante :

a) Pour les trois premières encoches (figure 5.3.a.b.c) :

$$X_{2demram} = M.X_{2dem} \quad [\Omega] \quad \text{[III-34]}$$

b) Pour l'encoche de la figure 5.3.d :

$$X_{2demram} = X_{0ram} + X_{iram} \cdot \left[\frac{S_{bi}}{(S_{bi} + S_{bs})} \right]^2 \quad [\Omega] \quad \text{[III-35]}$$

—Pour l'encoche de la figure 5.3.a :

$$\lambda_{encdem} = C'_\lambda + \frac{h_{f2}}{b_{f2}}$$

—Pour l'encoche de la figure 5.3.b.c :

$$\lambda_{encdem} = C'_\lambda + 0,3 + \left(\frac{1,12 \cdot h_{f2} \cdot 10^{+3}}{I_2} \right)$$

Avec : $C'_\lambda = C_\lambda \cdot \psi'$

ψ' — coefficient donnée par la courbe de la figure 1.7 en fonction de ξ .

CHAPITRE IV

CALCUL DES PERTES ET DU RENDEMENT

Introduction

Tout processus de conservation électromagnétique de l'énergie est accompagné inévitablement de pertes. La machine asynchrone, comme toute autre machine électrique, est sujette à ce type de transformation. Par ailleurs, les sources principales des pertes sont le champ magnétique et le courant électrique.

L'étude quantitative des pertes nécessite la connaissance parfaite de la distribution du courant électrique et du champ magnétique dans les différents tronçons de la machine.

Une fraction de la puissance absorbée par la machine électrique se dissipe dans les différentes parties qui constituent la machine, essentiellement dans :

- le circuit magnétique.
- les enroulements statoriques et rotoriques.
- les différentes parties mécaniques.

IV.1. Pertes principales dans le fer

Ce sont les pertes par hystérésis et par courant de Foucault dues au flux principal, la grande partie de ces pertes est localisée au niveau des dents et de la culasse statorique, car les pertes fer au rotor sont négligeables à cause de la faible fréquence de variation de flux dans celui-ci (régime nominal).

IV.1.a. Pertes dans les dents

Sont donnée par la relation suivante :

$$P_{fz1} = 1,7 \cdot P_{/50} \cdot B_{z1\max}^2 \cdot G_{z1} \quad [\text{W}] \quad [\text{IV-1}]$$

$$P_{/50} = 2,5 \quad [\text{W/Kg}], \text{ pour l'acier 2013.}$$

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

Avec : G_{z1} — poids des dents statoriques

IV.1.b. Pertes dans la culasse statorique

Ces pertes sont proportionnelles au carré de l'induction dans la culasse et donnée par :

$$P_{fC1} = 1,7 \cdot R_{/50} \cdot G_{C1} \cdot B_{C1}^2 \quad [W] \quad [IV-2]$$

$$G_{C1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot h_{C1} \cdot \pi \cdot (D_{ext} + h_{C1}) \quad [Kg]$$

Avec : G_{C1} — poids de la culasse statorique

B_{C1} — l'induction dans la culasse statorique.

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

$$P_{fer} = P_{fC1} + P_{fZ1} \quad [W] \quad [IV-3]$$

IV.2. Pertes électrique dans le Cuivre et l'Aluminium

Elles constituent les pertes par effet Joule dissipées dans l'enroulement statorique et la cage rotorique.

IV.2.a. Pertes Joules statorique

Se sont les pertes électriques dans le cuivre, données par la formule :

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{1nom}^2 \quad [W] \quad [IV-4]$$

IV.2.b. Pertes Joule rotorique

La cage rotorique des moteurs asynchrone étudiées et calculées est construite en Aluminium.

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [W] \quad [IV-5]$$

Avec : $R_2 = R_{barre} + R_{anram} \quad [\Omega]$.

IV.3. Pertes mécanique

Elles dépend de la vitesse du moteur et sont provoqué par les paliers, les ventilateurs ainsi que par les frottements avec l'air.

$$P_{mec} = K_t \cdot (N_1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad [W] \quad [IV-6]$$

Avec : K_t — facteur de majoration, il est donné par :

$$2P = 2 \dots\dots\dots K_t = 1,3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3})$$

$$2P > 2 \dots\dots\dots K_t = 1$$

IV.4. Pertes supplémentaires

Elles sont estimées à 0.5% de la puissance absorbée par la machine. Elles s'expriment par :

$$P_{\text{sup}} = 0,005 \cdot \frac{P_{\text{nom}} \cdot 10^{+3}}{\eta_{\text{nom}}} \quad [\text{W}] \quad [\text{IV-7}]$$

Avec : η_{nom} — rendement préliminaire.

IV.5. Pertes totales

Elles sont données par l'expression suivante :

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{fer}} + P_{j1} + P_{j2} + P_{\text{mec}} + P_{\text{sup}} \quad [\text{W}] \quad [\text{IV-8}]$$

IV.6. Rendement de la machine

Il est donné par l'expression suivante :

$$\eta = \frac{P_{\text{nom}} \cdot 10^{+3}}{P_{\text{nom}} \cdot 10^{+3} + P_{\text{tot}}} \quad [\text{IV-9}]$$

IV.7. Calcul de la résistance de magnétisation

La puissance absorbée a vide correspond aux pertes fer et mécanique, alors le courant actif a vide qui correspond à ces pertes sera exprimé comme suit :

$$I_{\text{oa}} = \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_{\text{nom}}} = \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + R_1 \cdot m_1 \cdot (I_{\mu})^2}{m_1 \cdot U_{\text{nom}}} \quad [\text{A}] \quad [\text{IV-10}]$$

$$\text{D'où : } R_m = \frac{X_m \cdot I_{\mu}}{I_{\text{oa}}} \quad [\Omega] \quad [\text{IV-11}]$$

Avec : I_{μ} — le courant magnétisant en [A]

X_m — la réactance magnétisante en [Ω].

CHAPITRE I

CALCUL DE L'ECHAUFFEMENT

Introduction

Les pertes électriques et mécaniques se produisent lors de la transformation de ces formes d'énergie en énergie thermique, ce qui échauffe certaines parties de la machine.

L'objectif de l'étude thermique consiste à déterminer la température dans les différentes parties de la machine, ensuite cet échauffement en utilisant une source froide (ventilateur afin d'assurer la fiabilité de la machine).

Suivant leurs tenues à la chaleur, les matériaux isolants utilisés dans la construction des machines électriques se divisent en classes suivantes : A.E.B.F.H.C. on a opté pour la classe d'isolation F qui a une tenue à la chaleur 155 °C. a cette classe appartiennent les matériaux à base mica d'amiante et de fibres de verre combiné avec les liants.

La transmission de la chaleur dans les machines électriques a lieu principalement par conduction thermique, rayonnement, et convection.

1. transmission de la chaleur par conductivité thermique : ce type de transmission de la chaleur des corps solides (cuivre- fer isolant).

2. transmission de la chaleur par convection : on parle de la transmission par convection lorsqu'il s'agit des liquides et des gazes. Le phénomène de convection est crée par la circulation de l'air réfrigérant, dans ce cas, on parle de la convection forcée et de convection naturel.

3. rayonnement thermique : la transmission de la chaleur par rayonnement a eu lieu dans la carcasse, qui transmet la chaleur au milieu ambiant.

I.Calcul de l'écart des températures

Ce calcul se fait comme suit :

I.1.Calcul de l'écart de température entre la surface intérieure du noyau statorique et celle de l'air à l'intérieur du moteur

$$\Delta\theta_{surf} = K \cdot \frac{K_0 \cdot \frac{2.L_i \cdot P_{j1}}{L_{w1}} + P_{fer}}{\pi \cdot D_{int1} \cdot L_i \cdot \alpha_1} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad [\text{I-1}]$$

Avec : K — coefficient qui prend en considération le rapport des pertes dans le noyau statorique transmis à l'intérieur de la machine.

K_0 — coefficient déterminé par la relation entre la valeur de la conductibilité électrique spécifique du cuivre pour une température de fonctionnement calculée, et pour la valeur maximale admissible de la température, il est donné suivant le diamètre extérieur.

Pour les machines IP44, $K_0=1,07 \text{ w}/[\text{mm}^2 \cdot \text{C}]$.

I.2.Calcul de la chute de température dans l'isolation de la partie d'encoche de l'enroulement du stator

$$\Delta\theta_{iso} = \frac{K_0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2L_i}{L_{w1}}}{J_{fr} \cdot Z_1 \cdot L_i} \left(\frac{C_{en}}{\Gamma_{eq}} + \frac{d_{enc11} + d_{enc12}}{16 \cdot \Gamma_{eq}} \right) \quad [^\circ\text{C}]. \quad \text{[I-2]}$$

Avec : Γ_{eq} — coefficient équivalent de conductibilité thermique de l'enroulement dans l'encoche du stator. Pour la classe F on a $\Gamma_{eq} = 16 \cdot 10^{-5} \text{ W}/[\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}]$.

Γ'_{eq} — coefficient équivalent de conductibilité thermique du conducteur. Il dépend du rapport $\frac{d_{nu}}{d_{iso}}$.

C_{en} — épaisseur de l'isolation de l'encoche du stator.

I.3.Calcul de l'augmentation de température dans la surface extérieur des parties frontales sur la température de l'air à l'intérieur du moteur

$$\Delta\theta_{fri} = \frac{K \cdot K_0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2L_{f1}}{L_{w1}}}{2 \cdot \pi \cdot L_{fr1} \cdot \alpha_1} \quad [^\circ\text{C}]. \quad \text{[I-3]}$$

Avec : L_{f1} — longueur d'un volet des parties frontales. Elle est donnée par :

$$L_{f1} = (1,16 + 0,14 \cdot P) b_{1moy} + 15$$

$$h_{axe} \geq 160 \cdot L_{f1} = (0,12 + 0,15 \cdot P) b_{1moy} + 10 \quad [\text{mm}]$$

$$h_{axe} \leq 132.L_{f1} = (0,19 + 0,1.P)b_{1moy} + 10 \quad [\text{mm}]$$

I.4. Calcul de la chute de température dans l'isolation des parties frontales de l'enroulement statorique

$$\Delta\theta_{isofr1} = \left[\frac{K_0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2L_{f1}}{L_{w1}}}{2 \cdot \Pi_{fri} \cdot L_{f1} \cdot Z_1} \right] \cdot \left(\frac{C_{en1}}{\Gamma_{eq}} + \frac{h_1}{12 \cdot \Gamma'_{eq}} \right) \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad [\text{I-4}]$$

Avec : $\Pi_{fri} = 2.h_1 + d_{enc11} + d_{enc12}$ périmètre de l'encoche.

I.5. La valeur moyenne de l'augmentation de la température de l'enroulement statorique sur la température de l'air à l'intérieur du moteur

$$\Delta\theta_1' = (\Delta\theta_{surf} + \Delta\theta_{iso}) \cdot \frac{2L_i}{L_{w1}} + (\Delta\theta_{fr1} + \Delta\theta_{isofr1}) \cdot \frac{2L_{f1}}{L_{w1}} \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad [\text{I-5}]$$

I.6. Surface conventionnelle de refroidissement du moteur

$$S_{mot} = (\pi \cdot D_{ext} + 8 \cdot n_p \cdot h_p) (L_i + 2 \cdot L_{f1}) \quad [\text{mm}^2]. \quad [\text{I-6}]$$

Avec : n_p — nombre d'ailettes extérieures pour refroidissement.

h_p — hauteur d'ailette de la carcasse.

I.7. Pertes transmises dans l'air à l'intérieur du moteur

$$\sum P_{air} = \sum P - (1 - K) (P_{elsurf} + P_{fer}) - 0,9 \cdot P_{mec} \quad [\text{Watts}]. \quad [\text{I-7}]$$

Avec : $\sum P_{air}$ Pertes totales

$$P_{elsurf} = K_{\theta} \cdot P_{j1} \cdot \frac{2L_i}{L_{w1}} \quad \text{Pertes électriques dans la partie frontale, [Watts].}$$

$\sum P$ Somme des pertes magnétiques ramenées dans l'air à l'intérieur du moteur.

I.8.Ecart moyen de température entre l'air à l'intérieur du moteur et la température du milieu réfrigérant :

$$\Delta\theta_{air} = \frac{\sum P_{air}}{S_{mot} \cdot \alpha_{air}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad [\text{I-8}]$$

Avec : α_{air} — coefficient d'échange.

I.9.Ecart moyen de température de l'enroulement statorique et la température du milieu réfrigérant :

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_1' + \Delta\theta_{air} \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad [\text{I-9}]$$

La température moyenne de l'enroulement statorique :

$$\theta_{enr1} = \Delta\theta_1 + 40 \quad [^{\circ}\text{C}]. \quad [\text{I-10}]$$

CHAPITRE II
CALCUL DE LA VENTILATION

Introduction

La ventilation est un procédé de refroidissement forcé faisant circuler un courant d'air dans l'enceinte de la machine. Cet air est constamment renouvelé ce qui permet d'évacuer la chaleur à l'extérieur. Elle est caractérisée d'abord par le ventilateur utilisé et ensuite par le circuit de refroidissement.

Les répercussions de l'échauffement et de la ventilation dans les machines électrique se manifestent sous trois aspects :

II.1.a. Du point de vue électrique

Le vieillissement des diélectriques est relatif à la température de service des machines et la durée de vie de ces dernières dépend de l'état de l'isolation, l'augmentation de la température est proportionnelle à l'accroissement des pertes, ce qui diminue le rendement.

De ce fait pour pouvoir assurer la bonne tenue de l'isolation de l'enroulement ainsi que pour augmenter la durée de vie des machines, une source froide est nécessaire pour limiter l'augmentation de la température.

II.1.b. Du point de vue mécanique

Etant donné que les machines électriques soient conçues avec des matériaux variés, alors sous l'effet de l'échauffement, on aura des dilatations des conducteurs et des tôles magnétiques, et étant donné que les coefficients de dilatation ne soient pas les mêmes pour tous les matériaux, ainsi que les parties de la machines ne sont pas à un instant donné à la même température. Cela provoquera par exemple lors de la marche à vide, la dilatation du paquet de tôles beaucoup plus que les conducteurs qui sont logés dans les encoches ; alors qu'à la mise en charge le cuivre s'échauffera beaucoup plus que les tôles. Finalement, tous les phénomènes de dilatation différentielle provoquent des mouvements relatifs cuivre-fer et entraînant en plus des contraintes mécaniques sur les isolants et possibilité de claquage.

II.1.c. Du point de vue économique

Economiquement, toute machine surdimensionnée aura moins de pertes, s'échauffera et vieillira moins vite, mais elle sera plus coûteuse à l'achat. Il est nécessaire de faire un compromis par étude technico- économique tenant compte des différents facteurs. Par contre une machine sous dimensionnée nécessitera une ventilation plus abondante, ce qui accroîtra d'autant les pertes mécaniques.

II.2. Calcul

L'absorption de la chaleur dégagée sous l'effet des pertes totales dans la machine est assurée par une source froide qui est dans notre cas un ventilateur.

I.2.1. Dimensionnement du ventilateur

Les dimensions principales du ventilateur sont données comme suit :

II.2.1.a. Le débit d'air du ventilateur

$$Q_b = 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot M_t \cdot \sum P_{air} \cdot \frac{\sqrt{N_{nom} \cdot 10^{-3} \cdot D_{v2} \cdot 10^{-2}}}{\Delta\theta_{air}} \quad [m^3/s] \quad [II.1]$$

Avec : M_t — coefficient donné suivant la hauteur d'axe.

D_{v2} — diamètre du ventilateur en [mm], il es donné par :

$$D_{v2} = (1,6 \div 1,8) h_{axe} \quad [mm]$$

II.2.1.b. La vitesse linéaire périphérique des ailettes

$$V_e = \pi \cdot D_{v2} \cdot \frac{N_{nom}}{60 \cdot 10^{+3}} \quad [m/s]. \quad [II.2]$$

II.2.1.c. La surface transversale du canal entre les palettes à la sortie d'air

$$S_p = 2 \cdot 10^6 \cdot \frac{Q_b}{0,45 \cdot V_e} \quad [mm^2]. \quad [II.3]$$

II.2.2. Résistance aérodynamique de la chaîne de ventilation

Vu la complexité de son calcul, elle est donnée par la forme empirique suivante :

$$Z = 12,3 \cdot (N_{nom} \cdot 10^{-3}) (D_{ext} \cdot 10^{-2}) / Q_b^2 \quad [s^2 / m^6]. \quad [II.4]$$

II.2.2.a. La vitesse à l'intérieur de l'ailette

$$V_1 = \sqrt{V_e^2 - 1,85 \cdot Z \cdot Q_b^2} \quad [\text{m/s}] \quad [\text{II.5}]$$

II.2.2.b. Calcul du nombre d'ailettes

$$N_p = (6 \div 10) \cdot \frac{D_{v2}}{D_{v2} - D_{v1}} \quad [\text{II.6}]$$

Pour des raisons mécaniques (éviter ou diminuer le bruit du ventilateur), N_p prend des valeurs impaires.

II.2.2.c. La surface d'une ailette :

$$S_{bp} = S_{bp} \cdot \frac{D_{v2} - D_{v1}}{2\pi \cdot D_{v2}} \quad [\text{mm}^2]. \quad [\text{II.7}]$$

CHAPITRE I

CALCUL MECANIQUE

Introduction

Une machine électrique doit être conçue et construite de sorte que toutes ses pièces possèdent une résistance suffisante et une rigidité correctement choisie qui leur permettent de supporter sans dommage et avec des déformations admissibles, les forces auxquelles elle est soumise.

IL faut tenir compte de la vitesse critique de flexion pour assurer un équilibre dynamique de L'ensemble des masses constituant le rotor, et en dehors du fonctionnement normal, à la vitesse critique l'équilibrage du rotor est nécessaire pour atténuer le plus possible les vibration De la machine qui sont nuisible.

La solidité et la rigidité des pièces d'une machine sont vérifiées lors du calcul mécanique qui se ramène à la détermination des contraintes mécaniques et des déformations des pièces sous l'action des forces et des couples (mécanique, centrifuge, électromagnétique).

I.Calcul de l'arbre

L'arbre est soumis à un moment fléchissant qui croit progressivement de ces cotés au milieu, d'où une construction à plusieurs diamètres de ce dernier.

Les forces extérieures exercées sur l'arbre sont :

- Poids du rotor.
- Force d'attraction magnétique.
- Réaction de la charge au bout d'arbre.

L'arbre est assimilé à une poutre reposant sur deux appuis.

I.1.Fléchissement de l'arbre

Les moments fléchissant auxquels est soumis un arbre des machines tournantes croient des extrémités de cet arbre vers la partie centrale , c'est pour cela qu'on a utilisé un arbre à diamètre variable augmentant des extrémités vers la partie centrale. Il existe trois fléchissements de l'arbre :

I.1.1. Fléchissement du au rotor

Le fléchissement qui est du au rotor est exprimé par l'expression :

$$f_{aP} = \frac{P_r}{3.E.L_{aP}^2} (a^2.S_b + b^2.S_a) 10^6 \quad [\text{mm}] \quad [\text{I.1}]$$

Avec : L_{aP} — est la distance entre l'axe des deux paliers.

a, b — est la distance entre le contour du rotor et l'axe des paliers.

p_r — poids du rotor, il est donné par :

$$P_r = 56.L_2.D_2^2.10^{-6}$$

$$S_b = \frac{b^3 - y_1^3}{J} \quad [\text{mm}^{-1}]$$

$$S_a = \frac{a^3 - x_1^3}{J} \quad [\text{mm}^{-1}]$$

Avec : J — moment quadratique, il est donné par :

$$J = \frac{\pi.D_{2\text{int}}^4}{64} \quad [\text{mm}^4]$$

E — module d'élasticité longitudinale de l'arbre :

$$E = 2,06.10^{11} \quad [\text{N/m}]$$

I.1.2. Fléchissement du à la réaction R

Il est donné par la relation suivante :

$$f_R = \frac{R.C}{3.E.L_{aP}} [(1,5.L_{aP}.S_0 - S_b)a + b.S_a] 10^6 \quad [\text{mm}] \quad [\text{I.2}]$$

Avec : R — réactance de la charge au bout d'arbre donnée par :

$$R = K_p.C_n.10^3 / r \quad [\text{N}]$$

K_p — coefficient tenant compte du type de transmission utilisée.

R — rayon extérieur à l'accouplement.

C_{nom} — couple nominal de la machine donné par :

$$C_{nom} = 9,55.P_n.10^3 / N \quad [\text{N/m}]$$

$$S_0 = \frac{a^2 - x_1^2}{J} \quad [\text{mm}^{-2}].$$

I.1.3. Fléchissement du à la force d'attraction magnétique

Il est donné par la relation suivante :

$$f_{F_m} = \frac{f_{ap} \cdot F_M / P_r}{1 - (f_{ap} \cdot F_M / p_r \cdot e_0)} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I.3}]$$

Avec : e_0 — est l'excentricité de l'arbre. C'est la somme des fléchissements dus à la réaction de la charge au point du rotor et la tolérance de fabrication.

$$e_0 = f_R + f_{ap} + k_e \cdot \delta \quad [\text{mm}]$$

$$k_e = 0,1 \quad \text{pour } \delta \geq 0,5$$

$$k_e = 0,15 \quad \text{pour } \delta < 0,5$$

F_M — force d'attraction magnétique unilatérale causée par la non uniformité de l'entrefer. Elle est donnée par :

$$F_M = K_F \cdot D_2 \cdot L_i \cdot e_0 / \delta \quad [\text{N}]$$

$$\text{Avec : } K_F = 0,1 \quad \text{pour } 2P = 2$$

$$K_F = 0,15 \quad \text{pour } 2P > 2$$

I.1.4. Fléchissement résultant

Il représente la somme de tous les fléchissements qui sont dues aux différentes forces :

$$f = f_{ap} + f_R + f_{FM} \quad [\text{mm}] \quad [\text{I.4}]$$

N.B : La flèche résultante doit être comme suit : $f \leq 0,12 \cdot \delta$.

I.2. Contraintes dans l'arbre

Les contraintes dans l'arbre sont dues au moment de torsion et tournant.

I.2.1. Moment tournant

Il est donné par l'expression suivante :

$$M_t = C_S \cdot R \cdot Z_{b1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{N.m}] \quad [\text{I.5}]$$

Avec : Z_{b1} — est la réactance de la charge au bout d'arbre :

$$Z_{b1} = L_{b1} / 2$$

L_{b1} — longueur au bout d'arbre.

I.2.2. Moment de torsion

Il est donné par la relation suivante :

$$M_{t0} = C_s \cdot C_{nom} \quad [\text{N.m}] \quad [\text{I.6}]$$

I.2.3. Contrainte maximale

Elle est donnée par :

$$\sigma_{\max} = \frac{\sqrt{M_t^2 + M_{t0}^2}}{d_1 \cdot 10^{-10}} \quad [\text{N.m}] \quad [\text{I.7}]$$

I.2.4. Vérification des contraintes

La valeur de σ_{\max} doit être à 70 % de σ_t qui est la contrainte maximale admissible propre au matériau choisi (contrainte d'utilisation) :

$$\sigma_t = 360 \cdot 10^6 \quad [\text{N.m}] \text{ pour l'acier 45 (ordinaire)}$$

I.3. Vitesse critique

Au voisinage de la fréquence de résonance, l'arbre est soumis à l'action des efforts de la charge qui peuvent être élevés. Généralement se sont des forces centrifuges qui engendrent la rupture de l'arbre. La vitesse critique est donnée par la formule suivante :

$$N_{Cr} = 950 \cdot \sqrt{\frac{1 - f_{Pr} \cdot F_m / P_r \cdot e_0}{f_{Pr}}} \quad [\text{I.8}]$$

La vitesse critique ne doit pas être dépasser les 130 % de la vitesse nominale

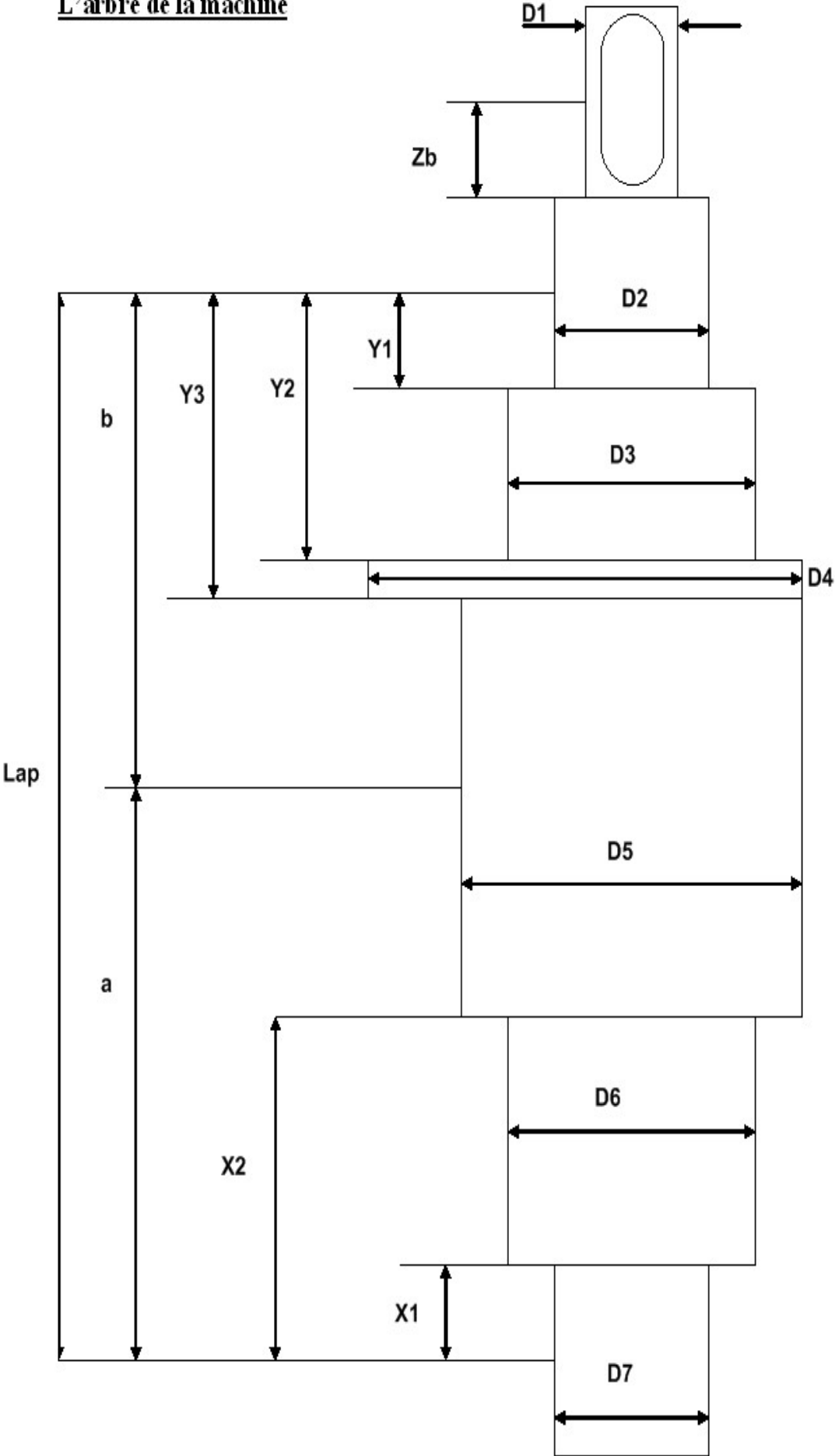
Partie b								
di	*Ji	Yi	Yi ³	Yi ³ - Yi _{i-1} ³	$\frac{Yi^3 - Yi_{i-1}^3}{Ji}$	Yi ²	Yi ² - Yi _{i-1} ²	$\frac{Yi^2 - Yi_{i-1}^2}{Ji}$
mm	mm ⁴	mm	mm ³	mm ₃	mm ⁻¹	mm ²	mm ²	mm ⁻²
Σ					Sb			So

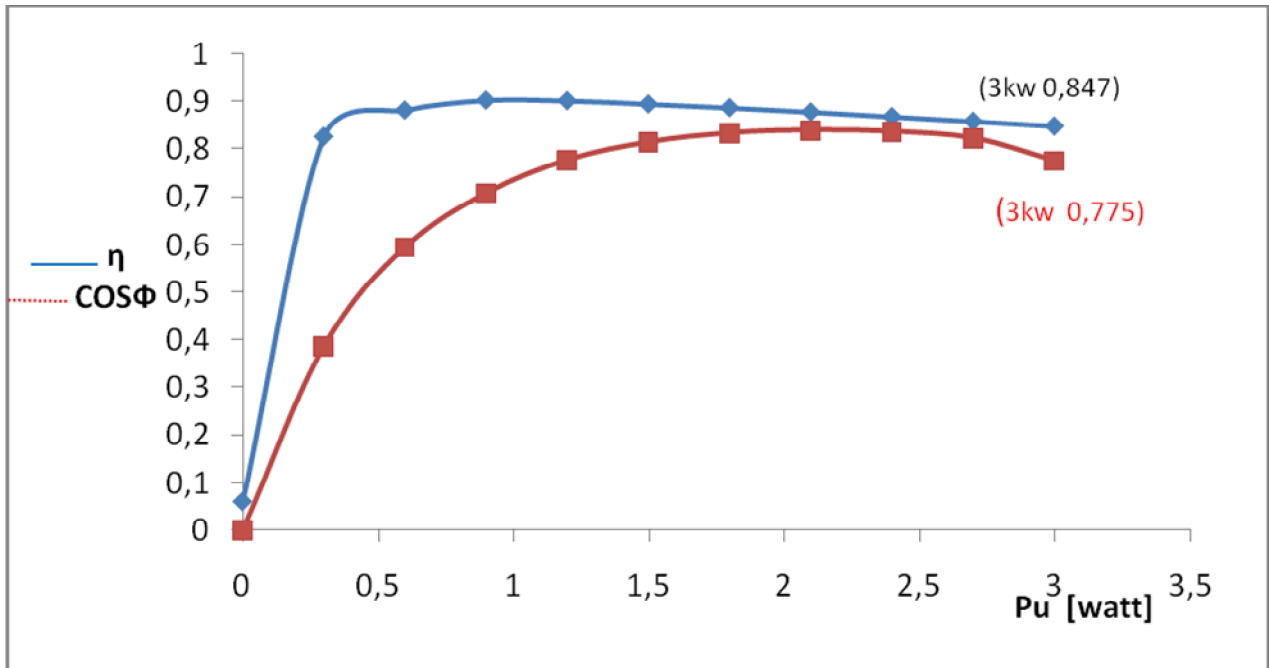
Tableau 1

Partie A						
	di	*Ji	Xi	Xi ³	Xi ³ -X _{i-1} ³	$\frac{Xi^3 - X_{i-1}^3}{Ji}$
	mm	mm ⁴	mm	mm ³	mm ³	mm ⁻¹
Σ						Sb

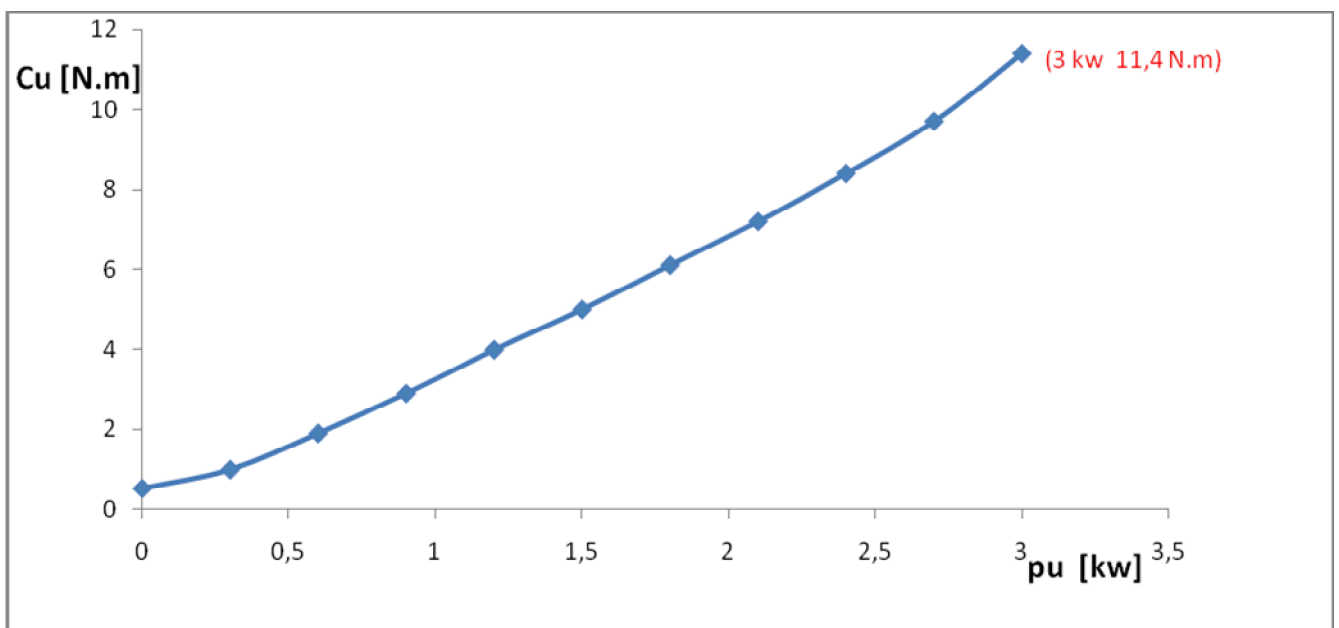
Tableau 2

L'arbre de la machine



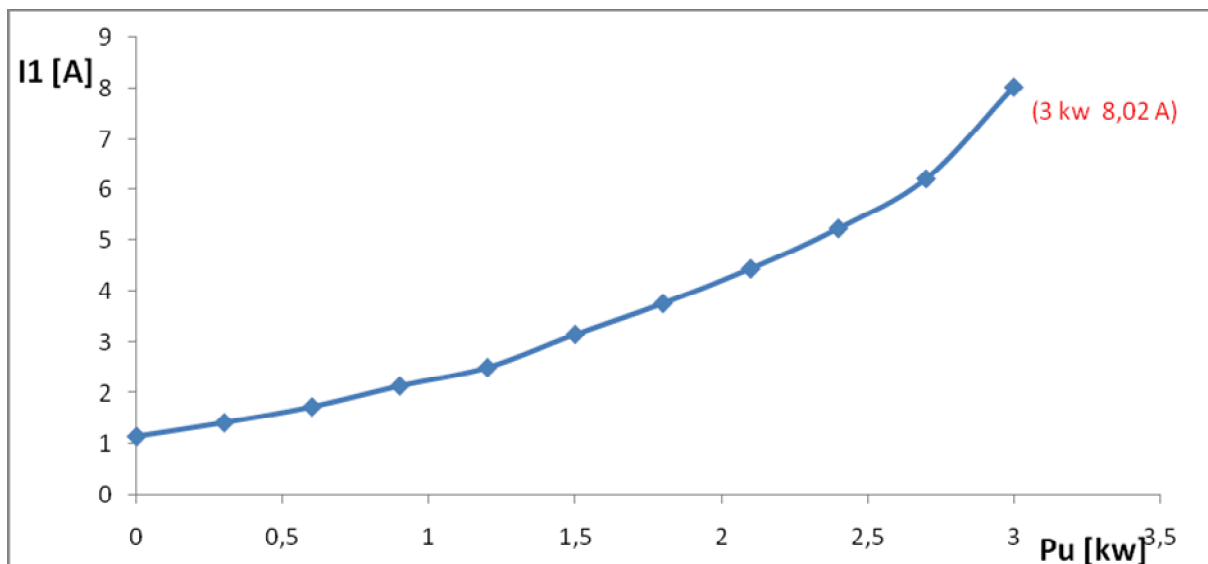


Courbe 1 : le rendement et le facteur de puissance en fonction de la puissance utile

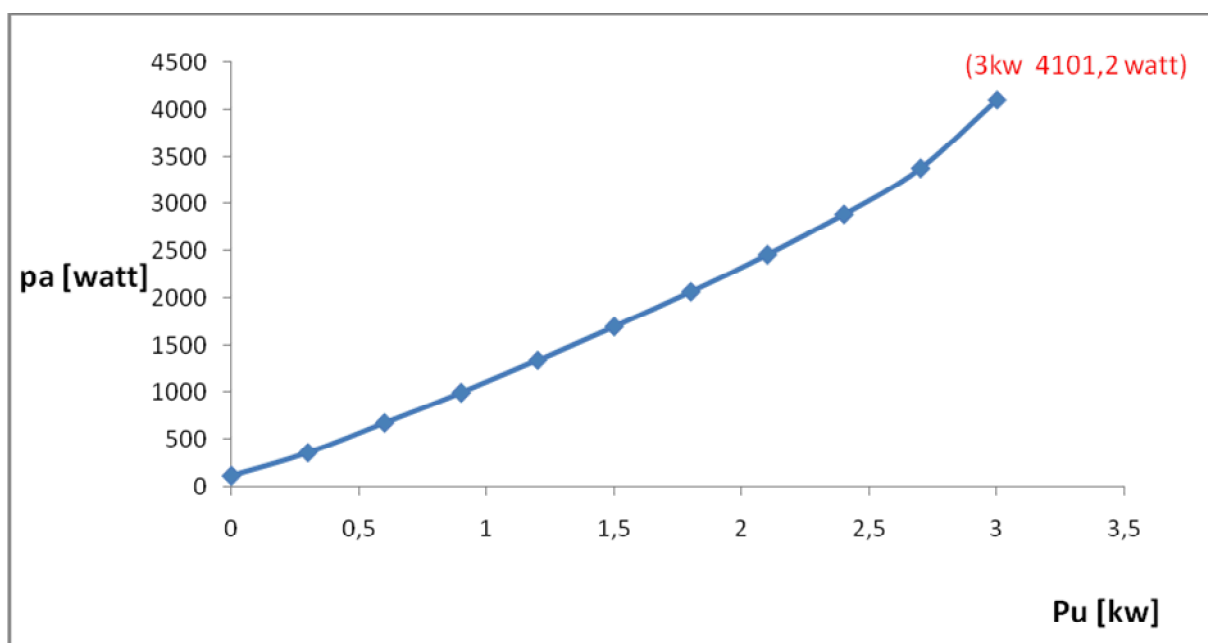


Courbe 2 : le couple utile en fonction du la puissance utile

Machine de 3 kw

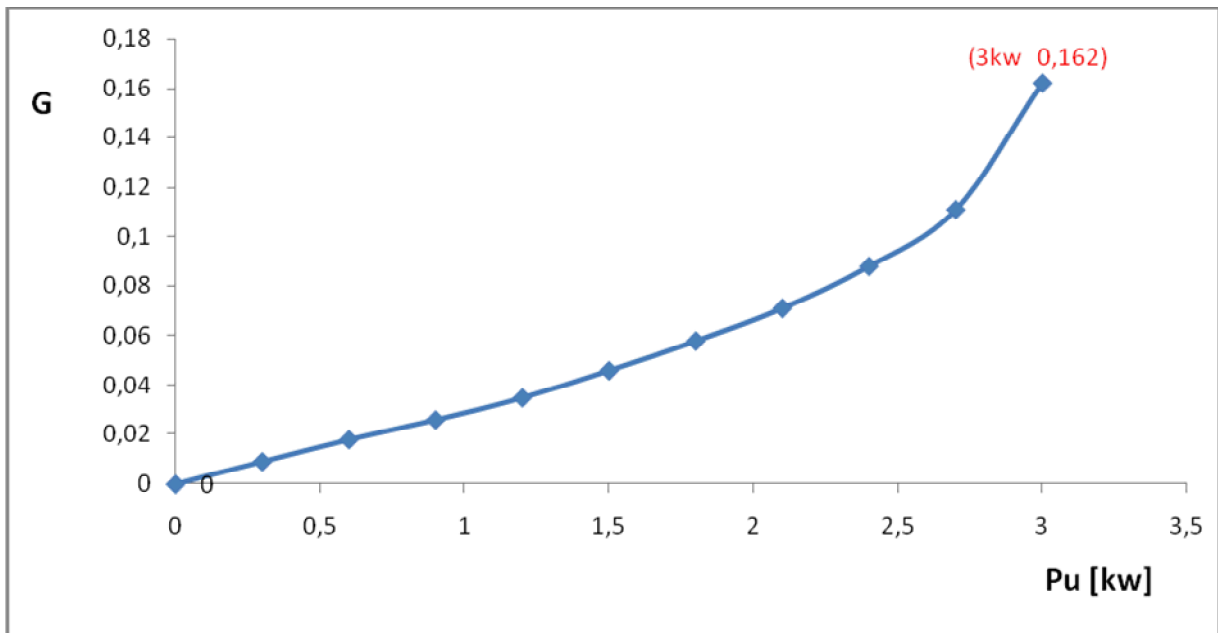


Courbe 3 : le courant absorbé en fonction de la puissance utile

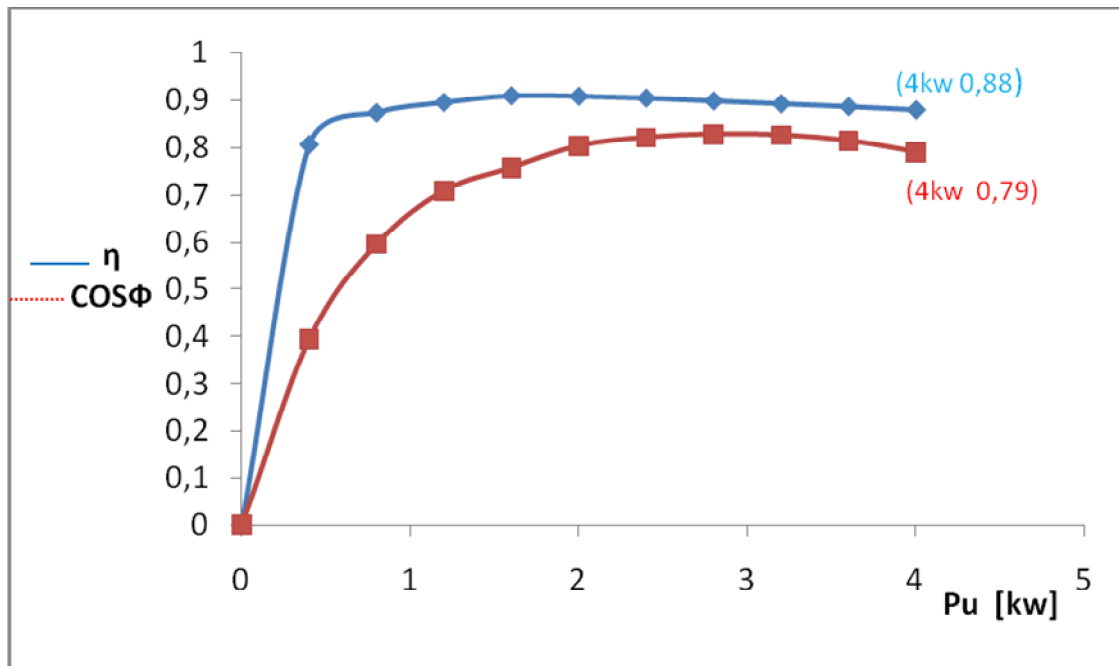


Courbe 4 : la puissance absorbée en fonction de la puissance utile

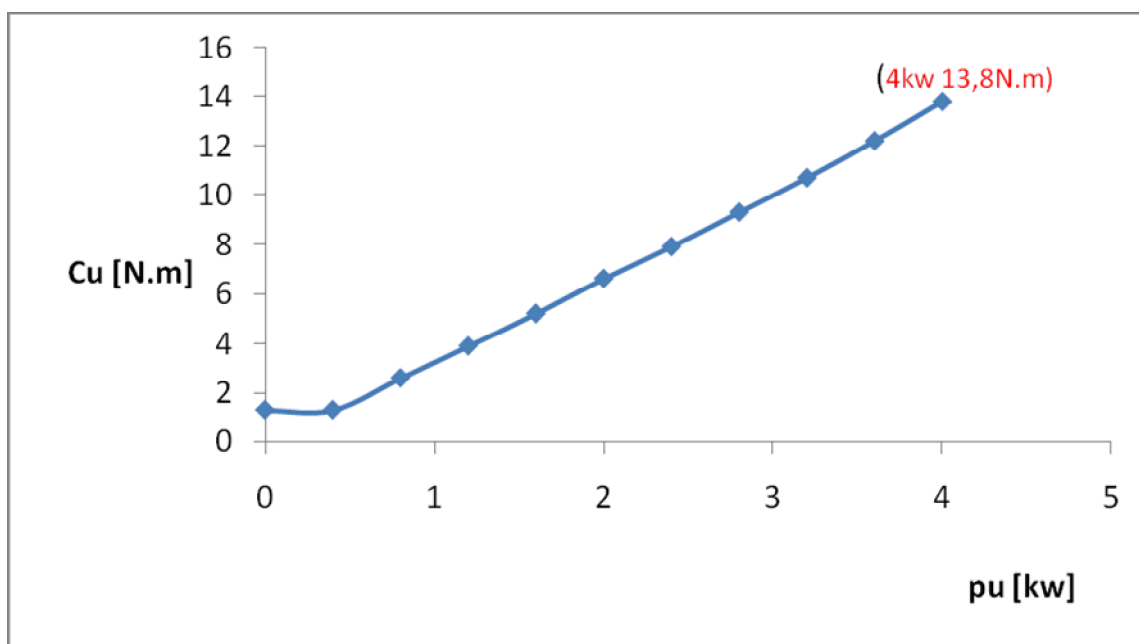
Machine de 3 kw



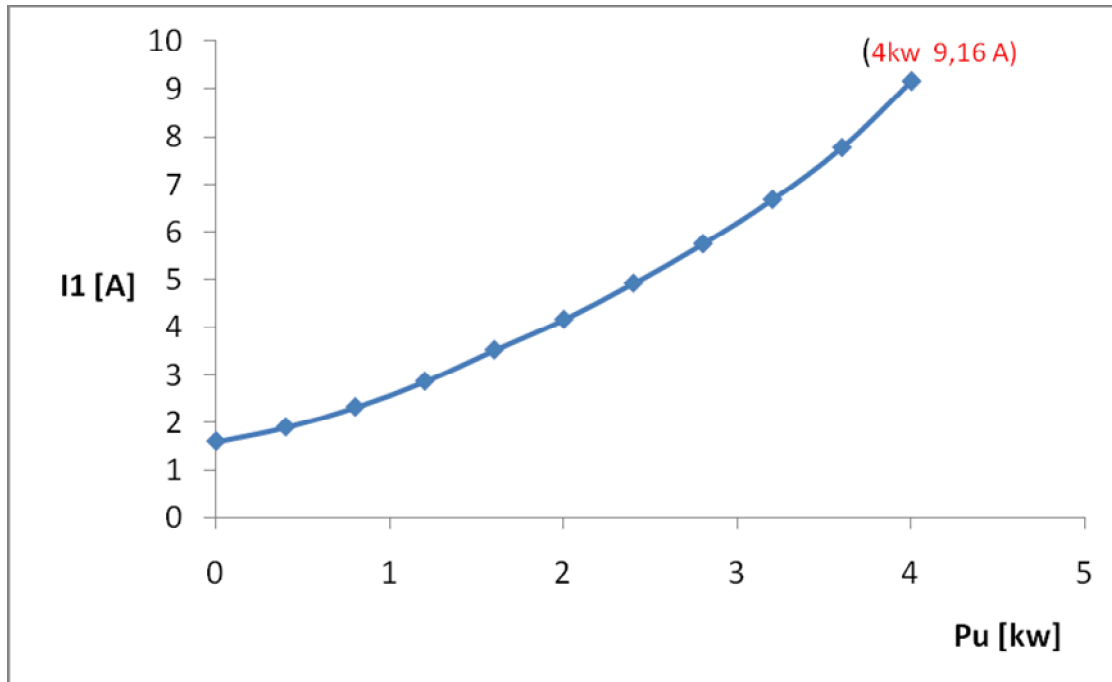
Courbe 5 : glissement en fonction de la puissance utile



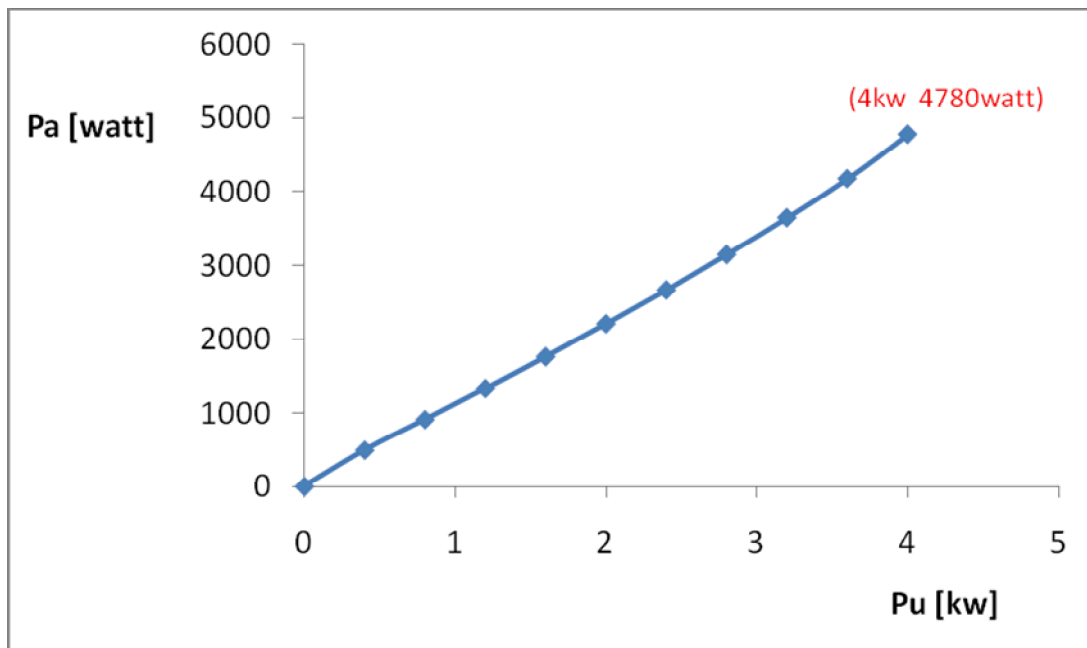
Courbe 1 : le rendement et le facteur de puissance en fonction de la puissance utile



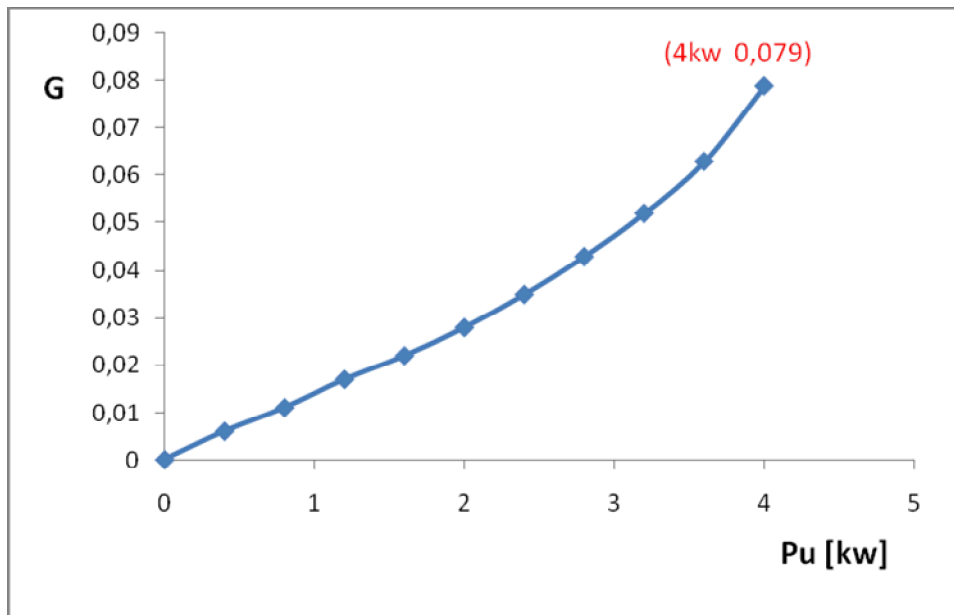
Courbe 2 : le couple utile en fonction du la puissance utile.



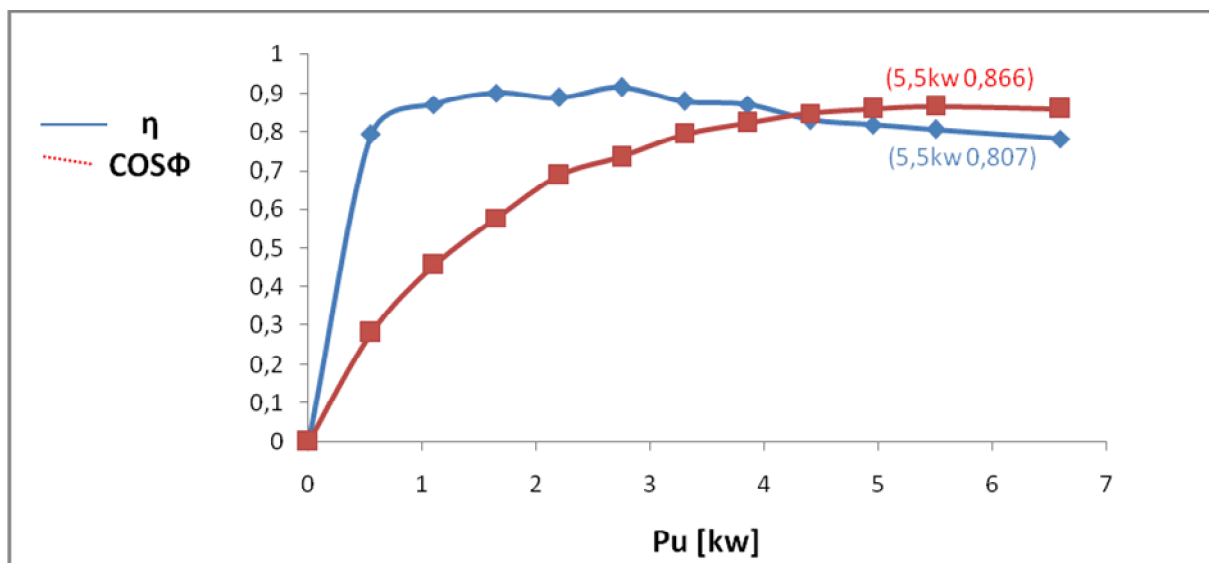
courbe3 : le courant absorbé en fonction de la puissance utile



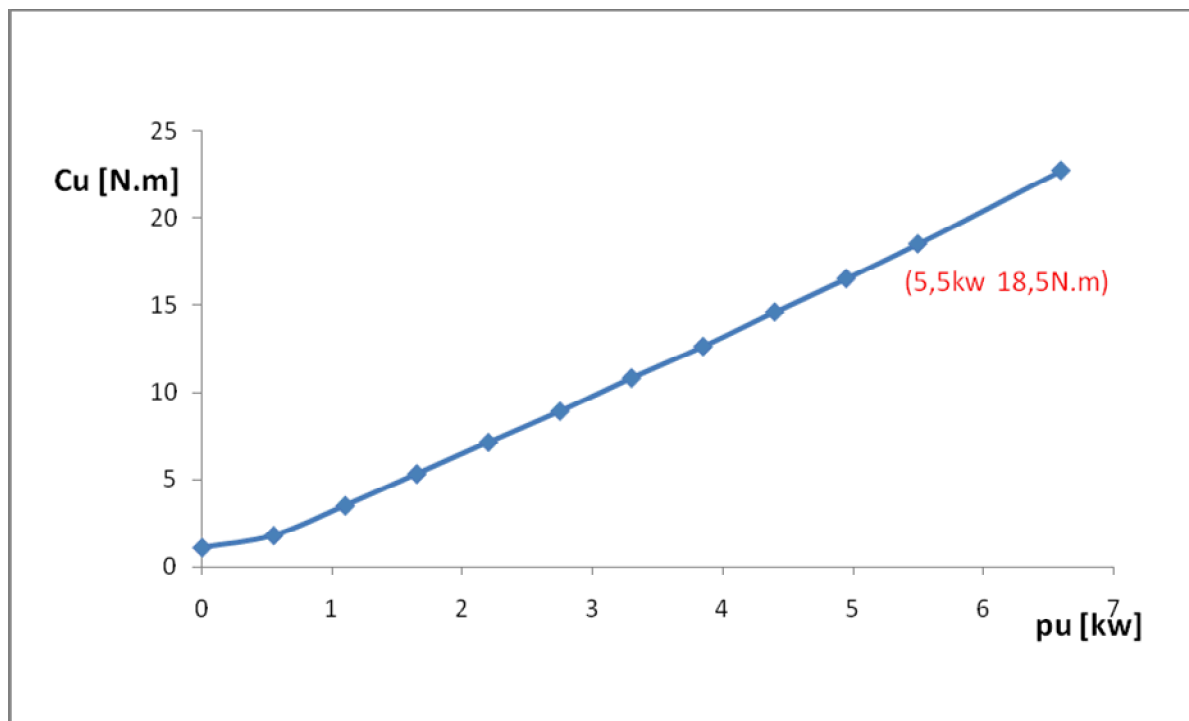
Courbe 4 : la puissance absorbée en fonction de la puissance utile.



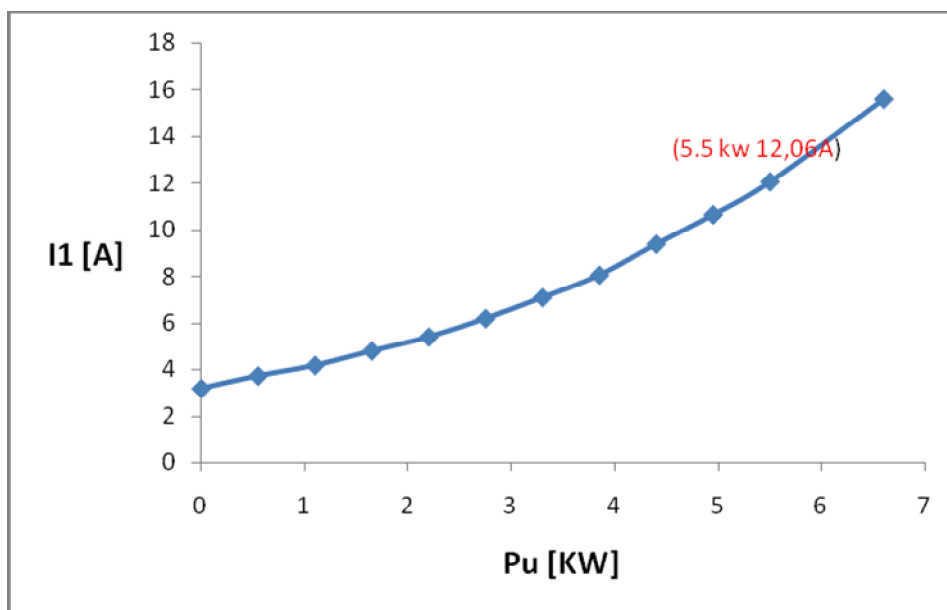
Courbe 5 : le glissement en fonction de la puissance utile



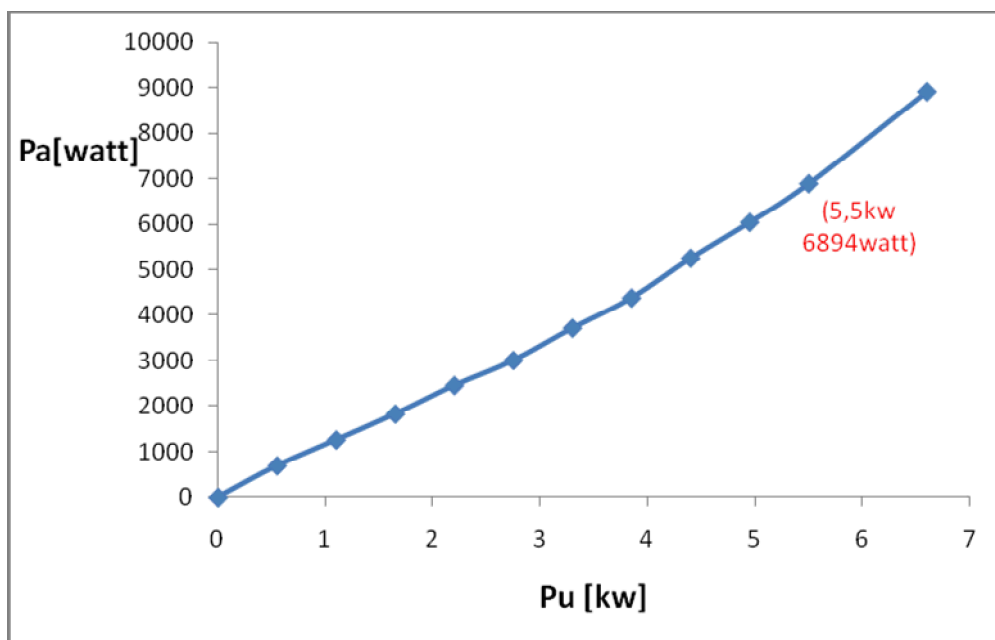
Courbe 1 : le rendement et le facteur de puissance en fonction de la puissance utile



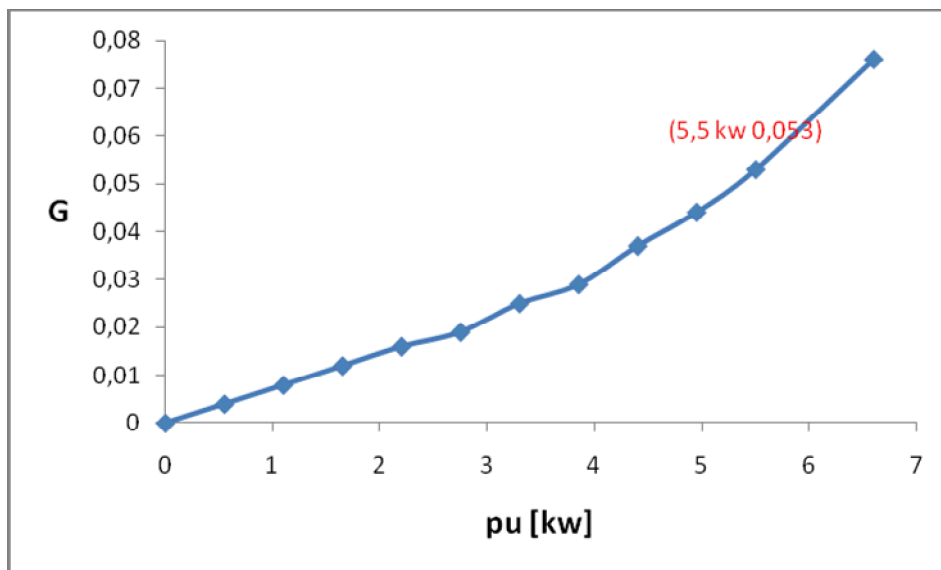
Courbe 2 : le couple utile en fonction de la puissance utile



courbe3 : le courant absorbé en fonction de la puissance utile



Courbe 4 : la puissance absorbée en fonction de la puissance utile.



Courbe 5 : le glissement en fonction de la puissance utile.

Remarque : les courbes des machines de 7,5 KW et 9 KW ont de même forme que la machine de 5,5 KW car elles sont de même série.

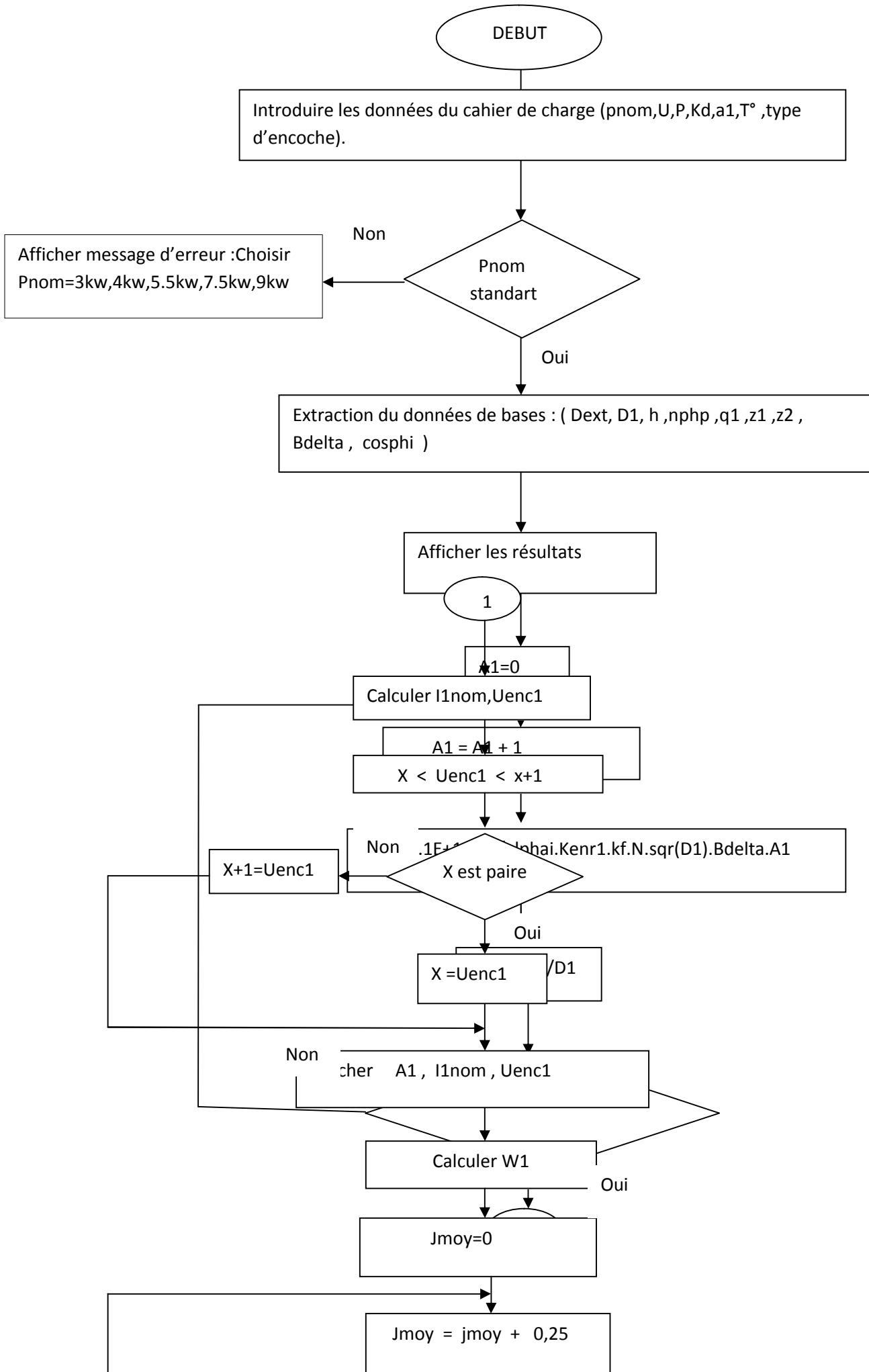
CAHIER DE CHARGE

La puissance nominale de la machine. P _{nom} [KW]	3	4	5.5	7.5	9
Le nombre de paire de pôles de la machine. P	1	1	1	1	1
La tension simple de la machine. V [V] Δ/Y	220/380	220/380	220/380	220/380	220/380
La fréquence de la tension d'alimentation. f [Hz]	50	50	50	50	50
La température. T [°c]	75	75	75	75	75
la classe d'isolation.	F	F	F	F	F
Degré de protection.	IP44	IP44	IP44	IP44	IP44

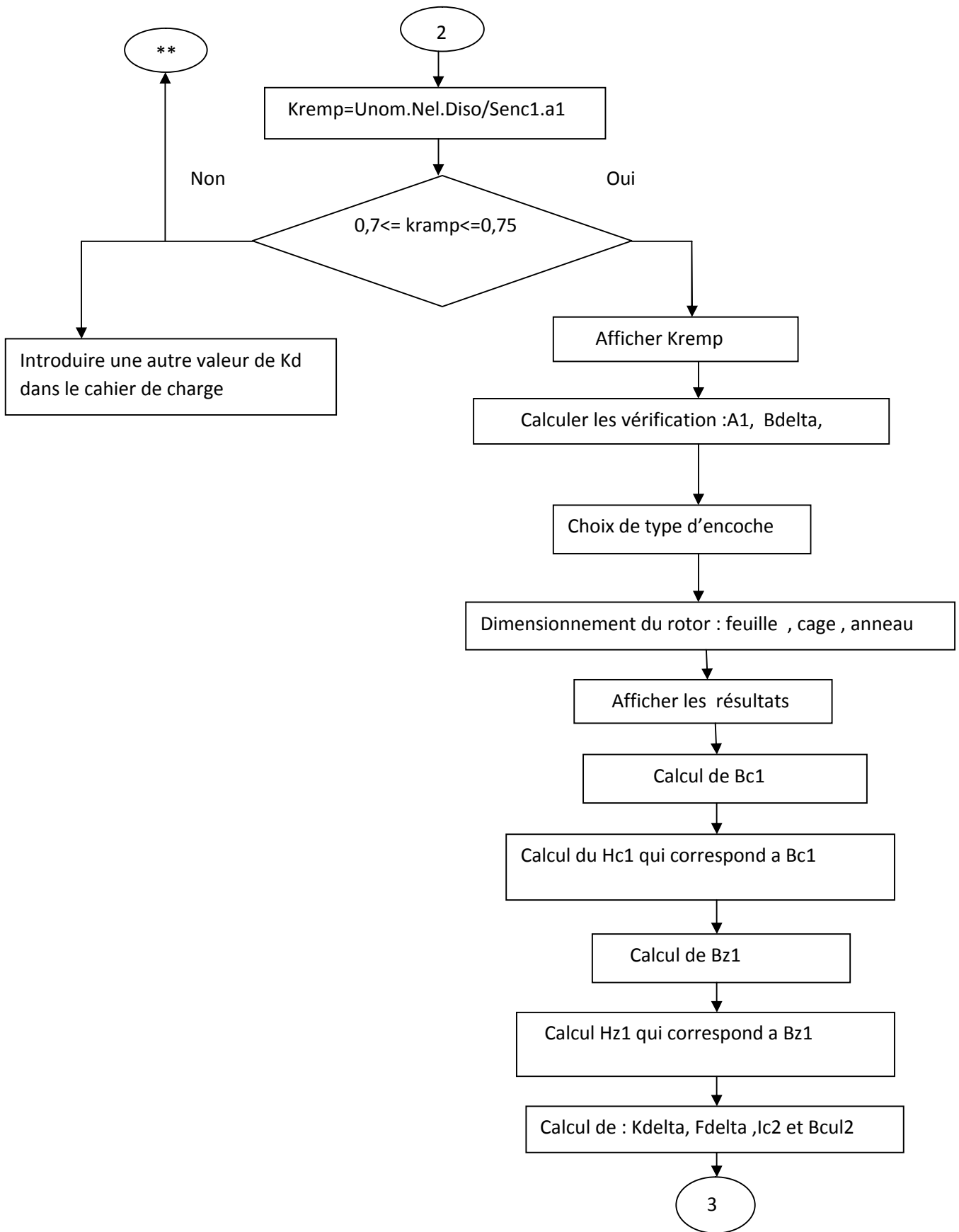
DONNES DE BASE

La puissance nominale de la machine. P _{nom} [KW]	3	4	5.5	7.5	9
La hauteur d'axe. h [mm]	90	100	100	100	112
Le diamètre extérieur du stator. D _{ext} [mm]	149	168	168	168	191
La valeur de l'entrefer. δ [mm]	0.38	0.441	0.441	0.441	0.509
Le rendement préliminaire de la machine. η _n	0.825	0.83	0.835	0.835	0.841
Le facteur de puissance préliminaire de la machine. Cos(φ)	0.861	0.86	0.871	0.871	0.875

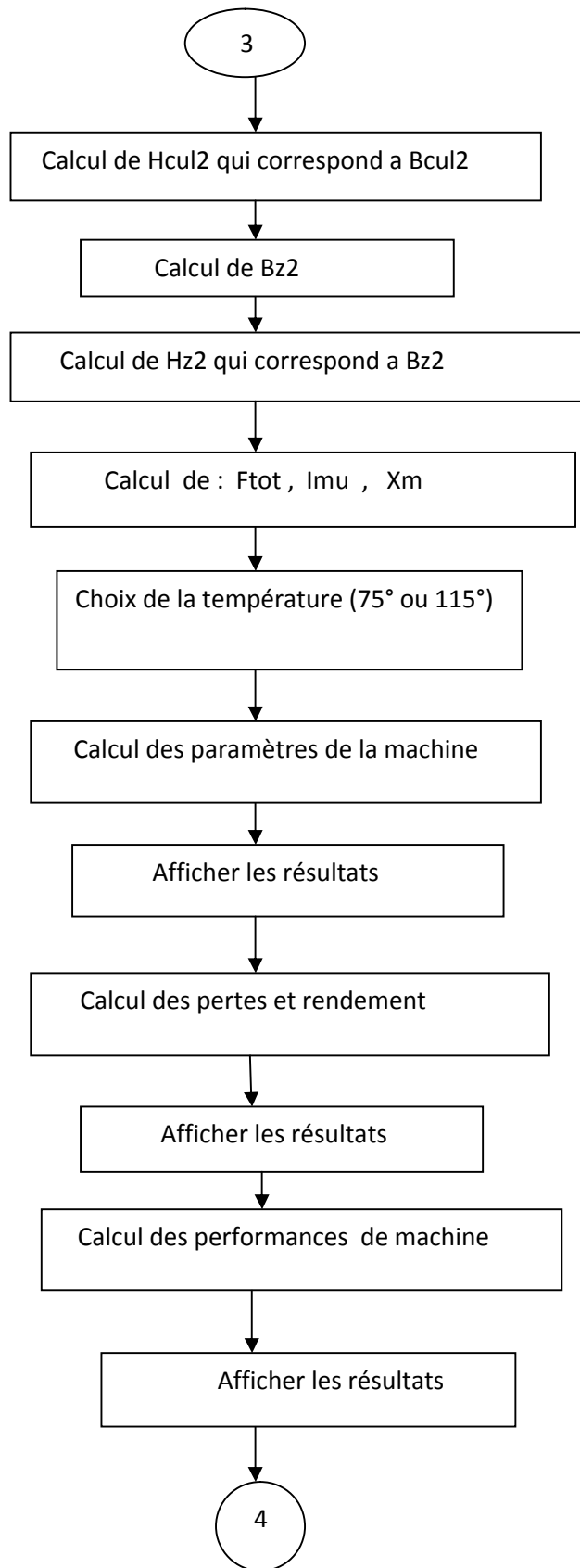
ORGANGRAMME DU PROGRAMME



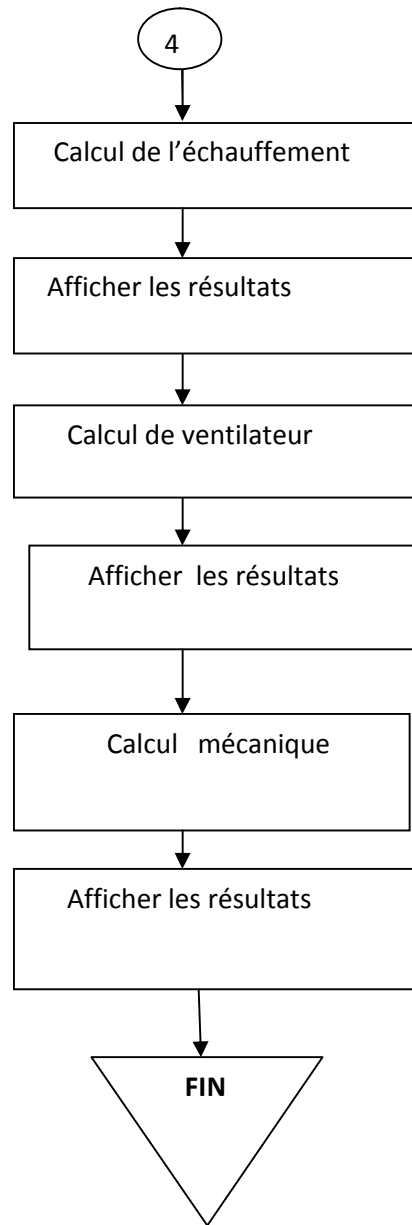
ORGANGRAMME DU PROGRAMME



ORGANGRAMME DU PROGRAMME



ORGANGRAMME DU PROGRAMME



Conclusion générale

Compte tenu des résultats obtenus avec différentes valeurs du rapport entre le diamètre intérieur et le diamètre extérieur, le nombre de voie parallèle, la densité du courant et la charge linéaire, nous sommes parvenus à des résultats satisfaisants du fait que toutes les contraintes électriques, magnétiques, thermiques et mécaniques sont dans les limites admissibles.

On conclue d'après les résultats de calcul pour ces machines de différentes puissances que le meilleur rendement est obtenu comme suit :

- Pour la machine de puissance (3KW) avec ($a_1 = 2$) et ($K_d = 0.52$), nous avons un rendement qui égale à 0.84 (voir la page 68).
- Pour la machine de puissance (4KW) avec ($a_1 = 2$) et ($K_d = 0.56$), nous avons un rendement qui égale à 0.88 (voir la page 68).
- Pour la machine de puissance (5,5KW) avec ($a_1 = 2$) et $K_d = [0.54, 0.56]$, nous avons un rendement qui égale à 0.85 (voir la page 68).
- Pour la machine de puissance (7,5KW) avec ($a_1 = 2$) et $K_d = [0.52, 0.54]$, nous avons un rendement qui égale à 0.88 (voir la page 68).
- Pour la machine de puissance (9KW) avec ($a_1 = 2$) et ($K_d = 0.52$), nous avons un rendement qui égale à 0.87 (voir la page 68).

L'élaboration d'un programme informatique nous a été d'un apport important en matière de temps pour le calcul optimal du rendement et les résultats de cette série de machine.

On dira enfin que le domaine de la construction optimale d'une machine électrique s'avère très vaste et que l'amélioration du rendement des machines est un sujet d'actualité. Nous estimons apporter un appui pour les étudiants des promotions futures afin d'optimiser les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil en prenant en considération d'autre facteurs.

LISTES DES SYMBOLES

- A_1 — Charge linéaire ; [A/m]
 a_1 — Nombre de voies parallèles
 B_δ — Induction magnétique dans l'entrefer ; [Tesla]
 B_{C1} — Induction magnétique dans le dos du stator ; [Tesla]
 B_{C2} — Induction magnétique dans la culasse rotorique ; [Tesla]
 B_{Z1} — Induction magnétique dans les dents du stator ; [Tesla]
 B_{Z2} — Induction magnétique dans les dents du rotor ; [Tesla]
 b_{an} — Largeur de l'anneau ; [mm]
 b_{f1} — Ouverture de l'encoche statorique ; [mm]
 b_{f2} — Ouverture de l'encoche rotorique ; [mm]
 b_{Z1} — Largeur de la dent statorique ; [mm]
 b_{Z2} — Largeur de la dent rotorique ; [mm]
 b_{moy} — Largeur moyenne d'une section ; [mm]
 b_{pp} — Largeur à la limite de pénétration magnétique au démarrage ; [mm]
 C_d — Couple de démarrage du moteur ; [N.m]
 C_{nom} — Couple nominal du moteur ; [N.m]
 C_2 — Couple utile sur l'arbre ; [N.m]
 C_5 — Capacité de surcharge du moteur ; [N.m]
 C_{em} — Couple électromagnétique ; [N.m]
 D_{an} — Diamètre moyen de l'anneau de court-circuit ; [mm]
 D_{ext} — Diamètre extérieur du stator ; [mm]
 D_1 — Diamètre intérieur du stator ; [mm]
 D_2 — Diamètre extérieur du rotor ; [mm]
 D_{2int} — Diamètre intérieur du rotor ; [mm]
 d_{enc21} — Diamètre inférieur de l'encoche du rotor ; [mm]
 d_{enc22} — Diamètre supérieur de l'encoche du rotor ; [mm]
 d_{enc11} — Largeur minimale de l'encoche statorique ; [mm]
 d_{enc12} — Largeur maximale de l'encoche statorique ; [mm]
 E_0 — E.E.M à vide ; [V]
 F_1 — Fréquence des courant d'alimentation ; [A]
 F_δ — F.M.M dans l'entrefer ; [A]
 F_{C1} — F.M.M dans la culasse du stator ; [A]
 F_{C2} — F.M.M dans la culasse du rotor ; [A]
 F_{Z1} — F.M.M dans les dents du stator ; [A]
 F_{Z2} — F.M.M dans les dents du rotor ; [A]
 $\sum F$ — F.M.M totale ; [A]
 G_{C1} — Poids du dos du stator ; [Kg]

G_{Z1} — poids des dents du stator ; [Kg]
G — Glissement
 g_{Cr} — Glissement critique
 g_{nom} — Glissement nominal
 H_C — intensité du champ magnétique dans les culasses ; [A/m]
 H_Z — Intensité du champ magnétique dans les dents ; [A/m]
 h_{ax} — Hauteur de l'axe ; [mm]
 h_{enc1} — Hauteur de l'encoche statorique ; [mm]
 h_{enc2} — Hauteur de l'encoche rotorique ; [mm]
 h_b — Hauteur de la barre ; [mm]
 h_{f1} — Hauteur de la fente statorique ; [mm]
 h_{f2} — hauteur de la fente rotorique ; [mm]
 h_{Z1} — Hauteur de la dent du stator ; [mm]
 h_{Z2} — Hauteur de la dent du rotor ; [mm]
 h_{an} — Hauteur de l'anneau ; [mm]
 h_{K1} — Hauteur de la clavette de l'encoche statorique ; [mm]
 I_{1nom} — Courant nominal statorique ; [A]
 I_2 — Courant nominal rotorique ; [A]
 I_μ — Courant magnétisant ; [A]
 J_1 — Densité du courant dans le stator ; [A/mm²]
 J_b — Densité du courant dans la barre ; [A/mm²]
 J_i — Moment quadratique ; [mm⁴]
 K_D — Coefficient du rapport du diamètre intérieur et du diamètre extérieur
 K_e — Coefficient de la chute de tension statorique
 K_{fer} — Coefficient de remplissage du paquet des tôles
 K_{d1} — Coefficient de distribution du stator
 K_{enr} — Coefficient d'enroulement
 K_{r1} — Coefficient de raccourcissement de l'enroulement
 K_f — Facteur de forme
 K_μ — Coefficient de saturation de la machine
 K_S — coefficient de CARTER
 K_{ra} — Coefficient de remplissage de l'encoche statorique
 K_{ob} — Coefficient d'inclinaison des encoches rotoriques
 K_{red} — Coefficient de réduction des paramètres de l'anneau
 K_{dep} — Coefficient de déplacement du courant
 L_i — Longueur virtuelle de l'induit ; [mm]
 L_C — Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse ; [mm]
 L_{f1} — Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi spire ; [mm]
 L_{w1} — Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique ; [mm]

L_{fr1} — Longueur d'un volet des parties frontales ; [mm]
 N — Vitesse de synchronisme ; [Tour/min]
 N_2 — Vitesse de l'arbre ; [Tour/min]
 N_{nom} — Vitesse de l'arbre au régime nominal ; [Tour/min]
 N_p — Nombre des ailettes
 m_1 — Nombre de phases statoriques
 M — Coefficient de réduction des paramètres rotoriques
 P — Nombre de paires de pôles de la machine
 P_{nom} — Puissance nominale de la machine ; [KW]
 P_u — Puissance utile de l'arbre du rotor ; [KW]
 P_{em} — Puissance électromagnétique ; [KVA]
 P_{mec} — Pertes mécaniques ; [W]
 p_{fer} — Pertes fer ; [W]
 P_{sup} — Pertes supplémentaires ; [W]
 P_J — Pertes Joule ; [W]
 q_1 — Nombre d'encoches par pole et par phase du stator
 q_2 — Nombre d'encoches par pole et par phase du rotor
 Q_b — Débit d'air d'un ventilateur ; [m³/s]
 R_1 — Résistance active d'une phase statorique ; [Ω]
 R_2 — Résistance active d'une phase rotorique ; [Ω]
 R_{an} — Résistance de l'anneau de court circuit ; [Ω]
 R_{2ram} — Résistance ramenée ; [Ω]
 R_m — Résistance magnétisante ; [Ω]
 R_{2dem} — Résistance de la cage au démarrage ; [Ω]
 S_{enc1} — Section de l'encoche statorique ; [mm²]
 S_{enc2} — Section de l'encoche rotorique ; [mm²]
 S_{eff} — Section effective d'un conducteur ; [mm²]
 S_{bs} — Section d la partie supérieur de la barre ; [mm²]
 S_{bi} — Section de la partie inférieure de la barre ; [mm²]
 S_{an} — Section de l'anneau ; [mm²]
 S_p — Surface transversale du canal ; [mm²]
 S_{bp} — Surface d'une ailette ; [mm²]
 t_1 — Pas dentaire statorique ; [mm]
 t_2 — Pas dentaire rotorique ; [mm]
 U_{enc1} — Nombre de conducteur par encoche du stator
 U_{nom} — Tension nominale d'alimentation ; [V]
 W_1 — Nombre de spire d'une phase du stator
 X_1 — Réactance de l'enroulement statorique ; [Ω]
 X_2 — Réactance de la cage au rotor ; [Ω]

X_0 — Réactance de dispersion de l'enroulement rotorique ; [Ω]
 X_i — Réactance de dispersion de la partie inférieure de l'encoche ; [Ω]
 X_{2ram} — Réactance de la cage ramenée au stator ; [Ω]
 X_{2dem} — Réactance de la cage au démarrage ; [Ω]
 X_{0ram} — Réactance de dispersion de l'enroulement rotorique ramenée au stator ; [Ω]
 X_{iram} — Réactance de dispersion de la partie inférieure de l'encoche ramenée ; [Ω]
 Z_1 — Nombre d'encoches statoriques
 Z_2 — Nombre d'encoches rotoriques
 α_1 — Coefficient de recouvrement polaire
 α_{ob} — Angle d'inclinaison ; [rad/s]
 β — Rapport de raccourcissement
 δ — Epaisseur de l'entrefer ; [mm]
 η — Rendement de la machine
 λ_1 — Coefficient de géométrie de la machine
 $\lambda_{d1}, \lambda_{d2}$ — Perméances différentielles statorique et rotorique respectivement
 $\lambda_{1f}, \lambda_{2f}$ — Perméances frontales statorique et rotorique respectivement
 $\lambda_{enc1}, \lambda_{enc2}$ — Perméances de dispersion d'encoche du stator et du rotor respectivement
 λ_{20} — Perméance de dispersion de l'enroulement rotorique
 λ_{2i} — Perméance de dispersion de la partie inférieure de l'encoche
 ξ — Perméance mutuelle
 λ_{20ram} — Hauteur ramenée du conducteur
 λ_{2iram} — perméance de dispersion de l'enroulement rotorique ramenée au stator
 P_{AL} — Résistivité de l'Aluminium ; [$\Omega.m$]
 P_C — Résistivité du Cuivre ; [$\Omega.m$]
 τ — Pas polaire ; [mm]
 σ — Coefficient de dispersion magnétique du stator
 φ_1 — Retard du courant I_{nom} sur la tension U_{nom} ; [rad]

Tableau I.1.a

Dext [mm]	h [mm]	Puissance nominale en [KW] en fonction de 2p		
		2p=2	2p=4	2p=6
81	50	0.09 0.12	0.06 0.09	—
89	65	0.18 0.25	0.12 0.18	—
100	63	0.37 0.55	0.25 0.37	0.18 0.25
116	71	0.75 1.1	0.55 0.75	0.37 0.55
131	80	1.5 2.2	1.1 1.5	0.75 1.1
149	90	3.0	2.2	1.5
168	100	4.0 5.5	3.0 4.0	— 2.2
191	112	7.5	5.5	3.0 4.0
225	132	1.1	7.5 11	5.5 7.5
272	160	15 18.5	15 18.5	11 15
313	180	22 30	22 30	— 18.5
349	200	37 45	37 45	22 30
392	225	55	55	37
437	250	75 90	75 90	45 55
520	280	110 132	110 132	75 90
520	315	160 200	160 200	110 132
590	355	250 315	250 315	160 200

Tableau I.1.b

2P	2	4	6
kd	[0.52 0.6]	[0.62 0.68]	[0.7 0.72]

Tableau I.2.f

Seff [mm]	Dnu [mm]	Diso[mm]
0.442	0.750	0.815
0.503	0.800	0.865
0.567	0.850	0.915
0.636	0.900	0.965
0.709	0.950	1.015
0.883	1.000	1.140
0.885	1.060	
0.895	1.120	1.200
1.094	1.180	1.260
1.227	1.250	1.330
1.539	1.400	1.485
1.368	1.320	1.405
1.767	1.500	1.585

Tableau I.3.g

Indices	Désignation	L'épaisseur de l'isolation en [mm]
e1	Revêtement de l'encoche	[0.35 : 0.4]
e2	Fermeture d'encoche	0.5
e3	Cal du milieu	0.5

Tableau I.3.a

Stator				Rotor				
h[mm]	2 p	Bz1max [tesle]	Bc1 [tesla]	h[mm]	2 p	Type d'encoche	Bz2max [tesla]	Bc2 [tesla]
50-132	1	1.75-1.95	1.50-1.65	50-132	2	a	1.75-1.95	1.35-1.45
	4	1.75-1.95	1.50-1.65		4	a	1.75-1.95	1.15-1.25
	6	1.75-1.95	1.45-1.60		6	a	1.75-1.95	1.05-1.15
160	2	1.75-2.00	1.45-1.70	160-225	2	a	1.75-1.95	1.35-1.45
	4	1.75-2.00	1.45-1.70		4	b	1.55-1.80	1.20-1.35
	6	1.75-1.85	1.35-1.50		6	b	1.65-1.90	1.05-1.15
180-250	2	1.70-1.90	1.45-1.65	250	2	d	1.70-1.95	1.35-1.45
	4	1.70-1.90	1.45-1.65		4	a	1.65-1.90	1.15-1.25
	6	1.70-1.90	1.45-1.65		6	a	1.65-1.90	1.05-1.15
280-355	2	1.70-1.90	1.40-1.60	280-355	2	d	1.60-1.85	1.35-1.45
	4	1.60-1.80	1.30-1.45		4	b	1.80-2.00	1.15-1.25
	6	1.60-1.80	1.15-1.30		6	b	1.65-1.90	1.05-1.15

Tableau 7

Q1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8
Krr1	—	0.0285	—	0.0141	0.0089	0.0052	—	—

Tableau 8

Q1	Kdd1 en fonction de Z2/P						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0.99	0.94	—	—	—	—	—
3	0.98	0.93	0.88	0.85	—	—	—
4	—	0.90	0.84	0.80	0.77	—	—
5	—	—	—	0.75	0.72	0.70	—
6	—	—	—	0.70	0.60	0.62	—
8	—	—	—	—	—	0.53	0.51

Tableau 9

	K en fonction de (2P)		
	2P=2	2P=4	2P=6
IP44	0.22	0.20	0.19
IP23	0.84	0.80	0.78

BIBLIOGRAPHIE

1) A. IVANOV SMOLINSKY

Machines électriques, Edition MIR. MOUSCOU 1983

2) S. HABBAS, C. ABBASSEN

Optimisation du rendement d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil.
Mémoire d'ingénieur. Université TIZI – OUZOU 2004

3) Y. BOUKHAROUBA, R. BENKENIN

Calcul d'une série de machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil assister par ordinateur.
Mémoire d'ingénieur. Université de BOUMERDES 1997

4) EPE – ELECTRO- INDUSTRIE

Moteurs triphasés et monophasés à basses tensions
Catalogue. AZAZGA Edition décembre 2005