

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie électrique et informatique
Département d'électrotechnique



MEMOIRE

De Fin D'étude
En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
électrotechnique
Option : Machines Electriques

Theme :

**CALCUL D'UN MOTEUR
ASYNCHRONE A RENDEMENT
ELEVÉ**

Proposé par :
M^r: BELASSEL. M-T

Réalisé par :
M^r: DJEBBAR AMAR
M^r: AKLI SAMIR

Promotion : 2008-2009

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Aperçu théorique.	
I.1. Conception des parties actives de la machine asynchrone.	02
I.1.1. Noyau statorique.	02
I.1.2. Noyau rotorique.	03
I.1.2.a. Rotor à cœur creux.	03
I.1.2.b. Rotor bobiné.	03
I.1.3. Bobinage.	04
I.1.4. Les organes mécaniques.	04
I.2. Symboles.	05
I.3. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone.	05
I.4. Démarrage des moteurs asynchrones.	06
I.4.1. Démarrage sous tension réduite.	06
I.4.1.a. Démarrage étoile-triangle.	06
I.4.1.b. Démarrage par autotransformateur.	07
I.4.1.c. Démarrage résistif.	07
I.4.2. Démarrage à tension nominale.	07
I.4.2.a. Démarrage rotorique.	07
I.5. Freinage des moteurs asynchrones.	07
I.5.1. Freinage hypersynchrone.	07
I.5.2. Freinage par injection de courant continu.	07
I.5.3. Le freinage à contre-courant.	08
I.5.4. Freinage mécanique par électro-frein.	08
I.6. Bilan des puissances.	08
I.6.1. Puissance électrique absorbée.	09
I.6.2. Pertes par effet joule au stator.	09
I.6.3. Pertes fer au stator.	09
I.6.4. Puissance transmise.	09
I.6.5. Puissance mécanique totale.	09
I.6.6. Pertes par effet joule et pertes dans le fer au rotor.	09
I.6.7. Pertes mécaniques.	09
I.6.8. La puissance utile.	09
I.7. Caractéristique mécanique.	10
I.8. Point de fonctionnement du moteur en charge.	10

uction Générale

La majeure partie de l'énergie électrique consommée par le système électrique, est transformée en énergie mécanique mettant en jeu des moteurs asynchrones. Les moteurs asynchrones sont les plus utilisés dans les différents domaines vus à leurs prix de revient abordable, leurs simplicités de construction.

La diversité des applications des moteurs asynchrones et leurs qualités font qu'ils sont construits dans une gamme variée tant du point de vue caractéristique de fonctionnement que du point de vue puissance allant de petits moteurs de quelques watts pour les systèmes de commande et de régulation, aux plus grands moteurs de quelques milliers de kilowatts destinés aux grands entraînements.

Actuellement, le problème posé sur les moteurs c'est le rendement et les pertes de puissances, c'est pour cela nous avons optés à ce type de problème.

Notre travail consiste à calculer un moteur asynchrone, amélioration de son rendement en passant de 79% à 87% rendement élevé, et automatisation du circuit magnétique.

Nous avons utilisés une méthode de calcul précise, elle repose essentiellement sur des formules développées en associant les connaissances théoriques et les expériences pratiques des constructeurs, toutes en utilisant le logiciel de calcul et de programmation MATHCAD 13.

Après avoir dimensionné les différentes parties du moteur on va déterminer les caractéristiques de fonctionnement de ce dernier.

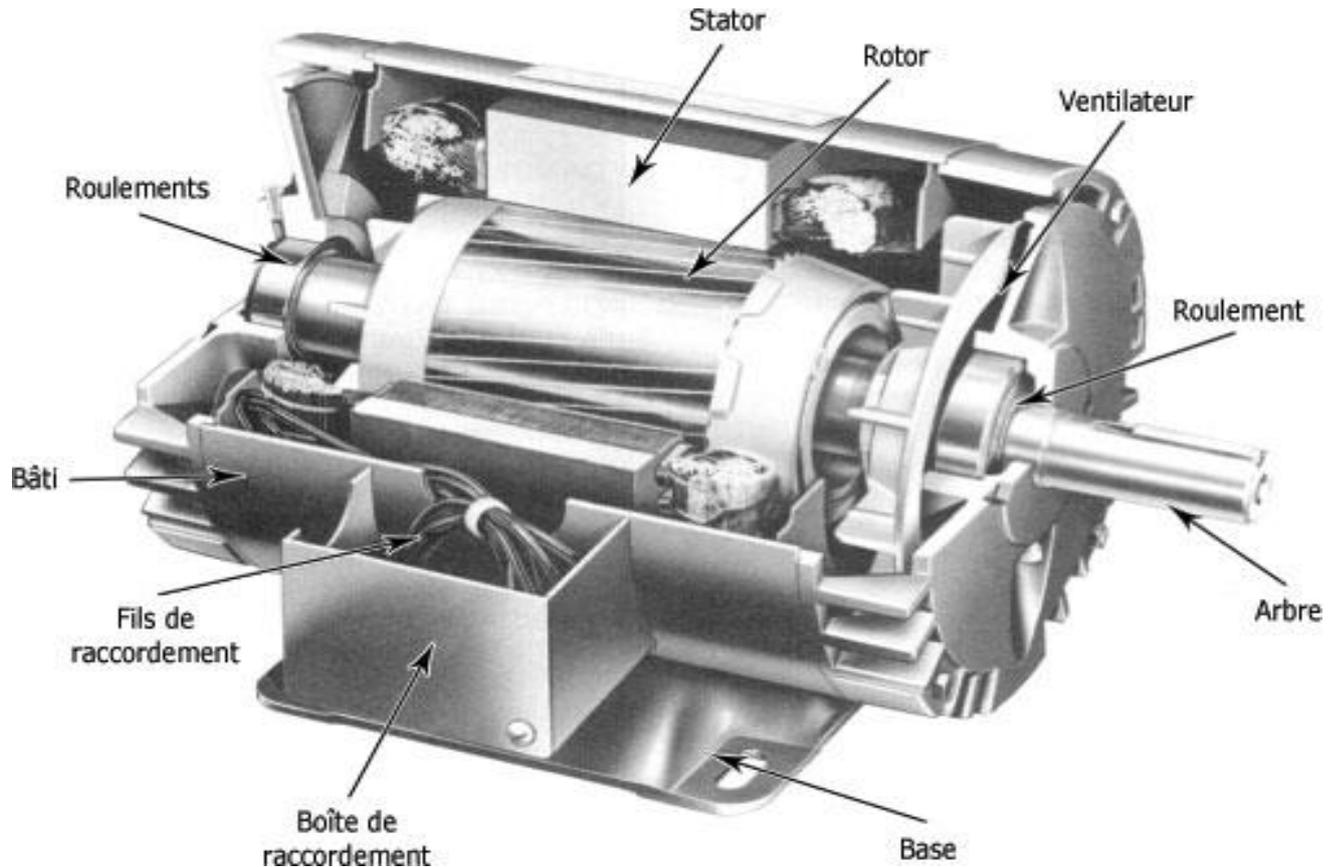
Le contenu de notre travail est devisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est un aperçu théorique sur la machine asynchrone, tant dit que le deuxième correspond au calcul du moteur asynchrone, le troisième est réservé à l'élaboration d'un programme de calcul, au quatrième chapitre on a procédé à la comparaison des résultats. Et enfin on a terminé notre travail par une conclusion générale.

[Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features](#)

Les plus utilisés sont les moteurs les plus employés le plus fréquemment dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages ; simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile. Le moteur asynchrone triphasé (parfois appelé moteur à induction) comprend deux parties : le stator (*fixe*) et le rotor (*tournant*).

I.1. Conception des parties actives de la machine asynchrone :



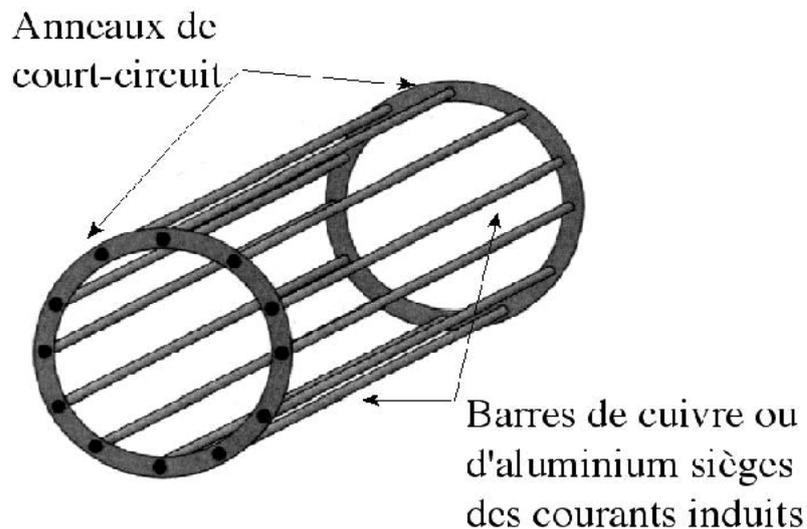
I.1.1. Noyau statorique :

Il comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre vide, ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme les encoches dans les quels en loge un bobinage triphasé.

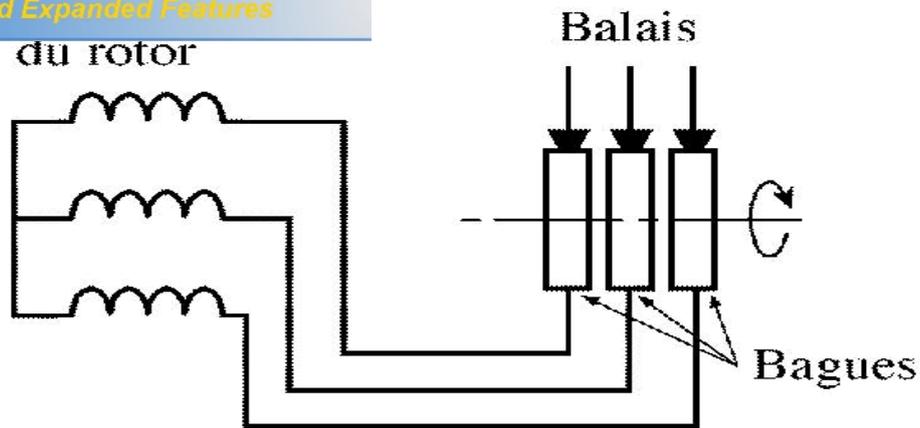
Il se compose d'un cylindre de tôles poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre 0.4 à 2 mm seulement.

Il existe deux types de rotor :

a) **Rotor à cage d'écurieil** : est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches ; ces barres sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écurieil d'où le nom, ou simplement rotor à cage. Dans les moteurs de petites et moyennes puissances, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé.



b) **Rotor bobiné** : comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches. Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile ; l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournante avec l'arbre. Ces bagues permettent par l'intermédiaire de trois balais, d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur. En fonctionnement nominal, les trois balais sont court-circuités.



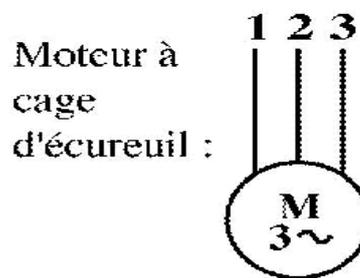
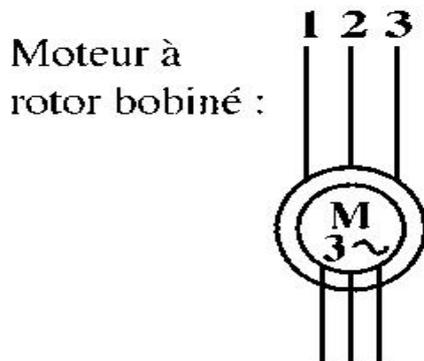
I.1.3. Bobinage :

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournante de plusieurs façons, mais on utilise habituellement un enroulement à une seule ou à deux couches au stator, mais vu la forme des sections on distingue trois types d'enroulement les plus utilisés ; l'enroulement concentrique, imbriqué et ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications. L'enroulement imbriqué s'emploie généralement pour le bobinage des stators des moteurs de quelques dizaines de kilowatts et plus. L'enroulement ondulé est idéal pour les rotors des moteurs asynchrone a bague. Dans le cas de petits moteurs asynchrones, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé, on utilise généralement l'enroulement concentrique.

Leur disposition dans les encoches différencie ces différents types d'enroulements. L'enroulement concentrique est un bobinage obligatoirement à couche unique, de telle sorte que chaque encoche contient un seul coté de bobine.

I.1.4. Les organes mécaniques :

Ils permettent la rotation du rotor (roulements), le maintien des différents sous-ensembles (Bâti) et le refroidissement du moteur (ventilateur).



I.3. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone :

Le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé des principes I (théorème de FERARI), II (loi de Faraday) est basé sur l'application et III (loi de Lenz) de l'électromagnétisme. Au moment où l'on ferme l'interrupteur pour brancher les enroulements du stator sur une ligne triphasée, les tensions appliquées produisent des courants triphasés, ces derniers créent un champ tournant (principe I) qui induit une tension dans les barres du rotor (principe III) cette tension est alternative car les conducteurs sont tantôt devant un pôle nord tantôt devant un pôle sud du champ tournant. Les conducteurs étant court-circuités à leurs extrémités par les deux anneaux, la tension induite donne naissance à des courants intenses dans les barres, ces dernières sont situées dans un champ magnétique ce qui produit des forces électromagnétique (principe II). Les forces tendent à entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ.

Quand le moteur asynchrone est alimenté par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable, permet maintenant de démarrer le moteur convenablement et de le faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage.

Asynchrones :

En cas de démarrage asynchrone, le courant peut atteindre 8 fois le courant nominal de la machine. Si l'application utilise un variateur, c'est ce dernier qui se chargera d'adapter les tensions appliquées au moteur afin de limiter ce courant. En l'absence de variateur de vitesse, il existe plusieurs méthodes permettant de limiter le courant de démarrage. Elles ont été développées avant l'apparition de l'électronique de puissance mais sont encore utilisées de nos jours dans les installations anciennes ou par mesure d'économie pour des applications ne nécessitant pas de variateur en dehors du démarrage.

I.4.1. Démarrage sous tension réduite :

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité des courants de démarrage. L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle le moteur atteint le régime permanent.

I.4.1.a. Démarrage étoile ó triangle :

Lors d'un démarrage étoile ó triangle, le moteur est d'abord connecté au réseau avec un couplage étoile, puis une fois démarré on passe sur le couplage triangle.

Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par la racine carrée de trois la tension appliquée. Ainsi, le courant maximal absorbé est trois fois plus faible que lors d'un démarrage directement avec un couplage triangle. Le couple de démarrage est lui aussi trois fois plus faible que lors d'un démarrage en triangle. La surintensité lors du passage étoile triangle est inférieure au courant d'appel d'un démarrage effectué directement en triangle.

Réalisée simplement à l'aide des contacteurs, cette méthode de démarrage est très économique.

nsformateur :

du moteur est relié à un autotransformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. La tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépassant pas la valeur maximale désirée.

I.4.1.c. Démarrage résistif :

Lors d'un démarrage résistif on insère des résistances en série avec les enroulements statoriques ce qui a pour effet de limiter la tension à leurs bornes. Une fois le démarrage effectué on court-circuite ces résistances. Cette opération peut être effectuée progressivement Par un opérateur à l'aide de rhéostats de démarrage.

I.4.2. Démarrage à tension nominale :

I.4.2.a. Démarrage rotorique :

Lors d'un démarrage rotorique, des résistances de puissance sont insérées en série avec les enroulements du rotor. Ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacts glissants (bagues et balais) permettant les connections électriques des enroulements rotoriques. Ces machines sont d'un prix de revient plus important.

I.5. Freinage des moteurs asynchrones :

On distingue plusieurs types de freinage :

I.5.1. Freinage hypersynchrone :

Lorsque la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse du champ tournant, le moteur freine. Couplé à un variateur de fréquence qui diminue progressivement la vitesse du moteur on peut arrêter le moteur. Le couple de freinage est faible, cette méthode n'est donc pas très efficace pour freiner rapidement une machine asynchrone.

I.5.2. Freinage par injection de courant continu :

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement. C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine mais les contraintes en courant sont également très sévères. Le contrôle de l'intensité du courant continu permet de contrôler le freinage.

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

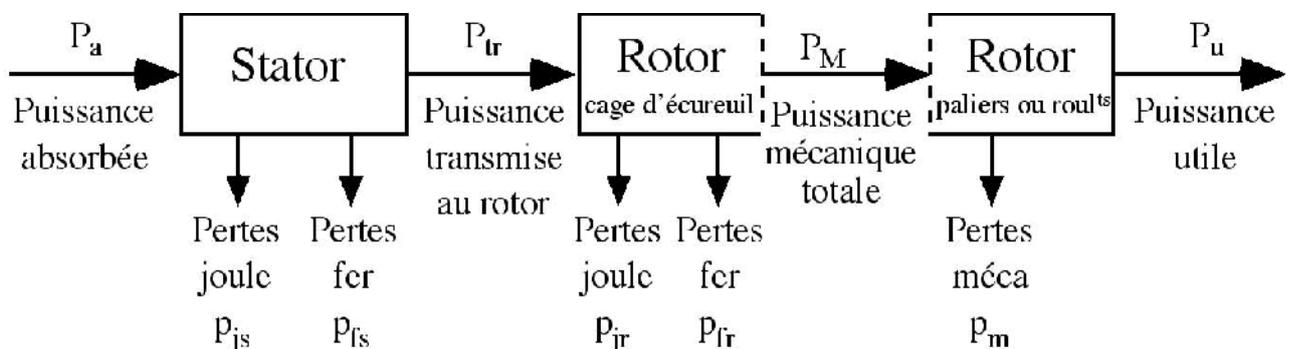
ant :

deux phases pendant un court instant. Ceci est donc équivalent à un freinage hypersynchrone, mais à fréquence fixe. Le couple résistant est donc faible et le courant appelé est également très important (de l'ordre de 10 à 12 fois l'intensité nominale). La conséquence en est que les enroulements du moteur risquent un sur-échauffement : On peut prévoir des résistances supplémentaires afin de diminuer l'intensité. En fin avec cette méthode, le couple décélérateur reste négative même lorsque la vitesse est égale à 0 tr/min, il faut donc prévoir de couper l'alimentation quand la vitesse est nulle (temporisation, contact centrifuge), sinon la rotation s'inverse.

I.5.4. Freinage mécanique par électro-frein :

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

I.6. Bilan des puissances :



[Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features](#)

absorbée : P_a

U : tension entre deux bornes du moteur

I : courant en ligne

I.6.2. Pertes par effet joule au stator : P_{js}

$$P_{js} = \frac{3}{2} \cdot R \cdot I^2$$

R : résistance entre deux bornes du stator

I.6.3. Pertes fer au stator : P_{fs}

Elles ne dépendent que de la tension U et de la fréquence f et sont donc constantes si le moteur est couplé au réseau.

I.6.4. Puissance transmise : P_{tr}

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs}$$

I.6.5. Puissance mécanique totale : P_M

$$P_M = P_{tr} \cdot (1 - g)$$

g: Le glissement

I.6.6. Pertes par effet joule et pertes dans le fer au rotor : P_{jr} et P_{fr}

$$P_{jr} + P_{fr} = P_{tr} - P_M = P_{tr} + P_{tr}(1 - g) = g \cdot P_{tr}$$

$$P_{jr} \approx g \cdot P_{tr}$$

Les pertes fer du rotor sont négligeables

I.6.7. Pertes mécaniques : P_m

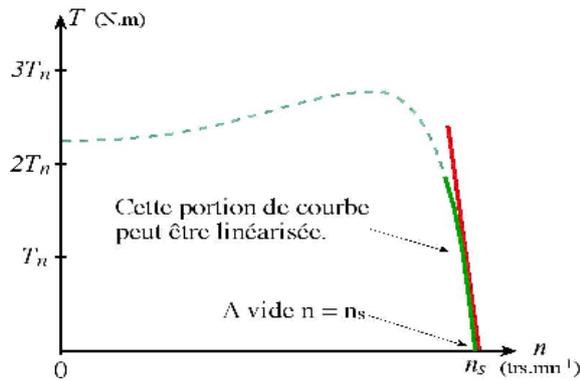
$$P_m = P_M - P_{\omega}$$

I.6.8. La puissance utile : P_u

$$P_u = P_M - P_m$$

Rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_a}$

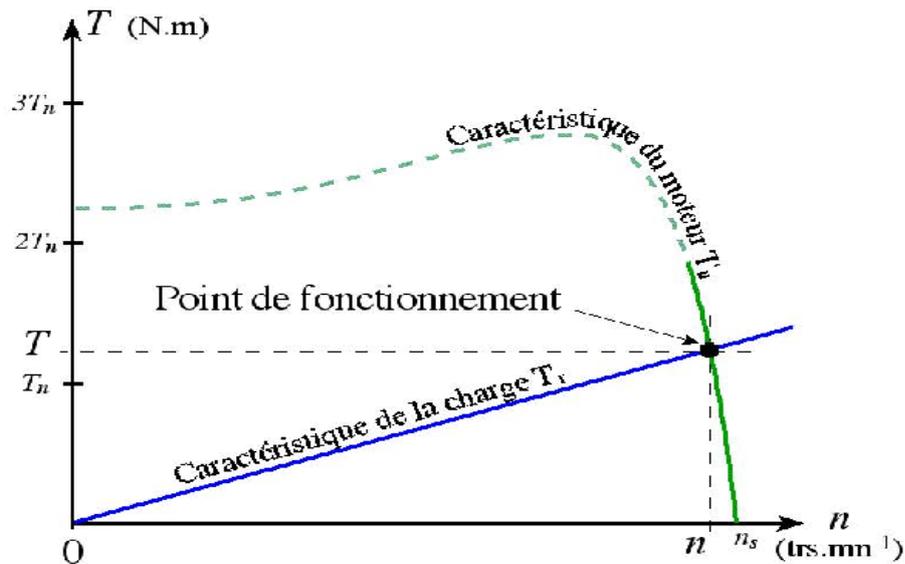
Caractéristique $T = f(n)$



Légende

- T_n Couple nominal
- Couple de démarrage du moteur. On constate que ce couple est fort : la machine peut démarrer en charge.
- Zone de fonctionnement du moteur. On constate qu'elle est presque linéaire. Cette partie de la courbe est très verticale : la vitesse varie peu avec la charge.
- La zone de fonctionnement peut être modélisée par une droite

I.8. Point de fonctionnement du moteur en charge :



I.9. Utilisation du moteur asynchrone :

Le moteur asynchrone triphasé, dont la puissance varie de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût/puissance est le plus faible (Traction électrique, Propulsion des navires, Ascenseurs, Pompes, Electroménager).

Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance

e dans un large domaine (les derniers TGV, le Tram

I.10. Pannes des moteurs asynchrones :

Constatation	Raisons possibles	Vérification et remèdes
Le moteur ne décolle pas, aucun renflement.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Manque de tension du réseau. 2. Des fusibles fondus. 3. Une coupure dans la ligne 	<p>Vérifier la tension avant l'interrupteur avec une lampe témoin ou un voltmètre, vérifier si l'arrivée à la plaque à bornes.</p> <p>Vérifier leurs états.</p> <p>Vérifier les bornes, les contacts de l'appareillage et la ligne.</p>
Le moteur ne décolle pas et le renflement est normal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mauvais couplage à la plaque à bornes. 2. Coupure dans le rotor. 3. Coupure dans le rhéostat. 	<p>Le stator est couplé en étoile pour une tension d'alimentation en triangle.</p> <p>Soudure rompue dans un rotor à cage.</p> <p>Vérifier la tension aux bagues, dans un rotor bobiné. Si il ya une coupure, le voltmètre restera au zéro dans une position.</p> <p>Vérifier le rhéostat à la lampe témoin.</p>

[Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features](#)

	<ol style="list-style-type: none"> 4. Usure ou mauvais contacte des balais. 5. Coupure dans le circuit rotorique. 6. Couple résistant trop grand au démarrage. 	<p>Vérifier l'état de la pression des balais.</p> <p>Vérifier la ligne et le serrage des diverses bornes. Vérifier le rhéostat et les balais.</p> <p>Décharger le moteur et vérifier son comportement.</p>
<p>Le moteur ne décolle pas et produit un fort renflement.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Une phase ne reçoit pas de courant. 2. Une phase est coupée dans le stator. 3. Un court circuit dans le stator. 	<p>Vérifier la tension aux bornes du moteur avec un voltmètre ou une lampe témoin, puis remonter vers la source si la tension n'est pas normale sur une phase. Un fusible peut être fondu. Vérifier le serrage des contacts, des bornes et de l'interrupteur. La ligne peut être coupée.</p> <p>Vérifier chaque phase avec la lampe témoin après les avoir découplées à la plaque à bornes.</p> <p>Le bobinage va fumer à l'endroit du court circuit,</p>

[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

		<p>le stator risque de griller. Ne pas insister ; couper le courant et réparer localement, si possible, le bobinage.</p>
<p>Le moteur démarre à vide et cale dès qu'on le charge.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mauvais couplage à la plaque à borne. 2. Coupure dans le circuit rotorique bobiné. 3. Une coupure dans le rhéostat. 4. Un mauvais contacte des balais. 5. coupure dans le rotor à cage. 6. Mauvais contacte à une borne de la ligne ou de l'appareillage. 	<p>Vérifier le couplage d'après la tension du réseau et l'indication de la plaque.</p> <p>Prendre la tension aux bagues. s'elle est nulle, il ya coupure soit aux connections, soit dans le bobinage.</p> <p>Vérifier se dernier à la lampe témoin.</p> <p>Vérifier leur pression et leur usure.</p> <p>Vérifier les soudures ou les brasures des couronnes.</p> <p>Vérifier le serrage de toutes les bornes. Un mauvais blocage offre une résistance au du courant.</p>

	<ol style="list-style-type: none">1. Le moteur est surchargé.	<p>Sa puissance est trop faible en regard de la machine à entrainer. Vérifier avec un wattmètre.</p>
	<ol style="list-style-type: none">2. Le coulage est incorrect.	<p>Vérifier le couplage à la plaque à bornes.</p>
	<ol style="list-style-type: none">3. Court-circuit dans le bobinage statorique ou rotorique.	<p>Mesurer la résistance avec l'ohmmètre de chacune des phases. Si le court-circuit est franc, la trace de bruleur est pratiquement invisible.</p>
	<ol style="list-style-type: none">4. Coupure d'une phase.	<p>L'échauffement de l'enroulement des deux phases seulement indique que la troisième est coupée.</p>

II.1.1. Dimensionnement du moteur asynchrone :

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

II.1.1.1. Dimensionnement du stator :

a) Puissance électromagnétique :

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

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n}{\cos(\phi_n) \eta_n} \quad [\text{KW}] \quad (1.1)$$

Avec :

$\cos(\phi_n)$ ó Facteur de puissance.

η_n ó Rendement nominal de la machine.

K_e ó Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans le stator.

$$K_e = 0,98 - 5.p.10^{-3}$$

b) Longueur virtuelle de l'induit :

Elle est donnée par :

$$L_i = \frac{6,1.P_e.10^{12}}{\alpha_i.K_f.N.D_1^2.A_1.B_\delta.K_{en1}} \quad [\text{mm}]. \quad (1.2)$$

Où:

α_i ó Coefficient de recouvrement polaire.

K_f ó Facteur de forme de la courbe d'induction.

N ó Vitesse de rotation de synchronisme.

D_1 ó Diamètre intérieur du stator.

B_{δ} ó induction dans l'entrefer.

K_{en1} ó Facteur de bobinage de l'enroulement statorique, il est donné par :

$$K_{en1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \quad (1.3)$$

K_{d1} ó Coefficient de distribution, donné par :

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m_1 q_1}\right)} \quad (1.4)$$

K_{r1} ó Coefficient de raccourcissement polaire, donné comme suit :

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \quad (1.5)$$

ó rapport de raccourcissement.

- **Coefficient de longueur :**

Est le rapport entre la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la tôle du stator.

$$i = \frac{li}{D_1} \quad (1.6)$$

- **Pas polaire en mm :**

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

$$p_l = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}]. \quad (1.7)$$

Avec :

P ó Nombre de paires de pôles

- **Pas polaire en nombre de encoche :**

$$p = \frac{Z_1}{2 \cdot p} \quad (1.8)$$

les statorique.

- **Pas dentaire :**

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (1.9)$$

- c) **Courant nominale :**

Il est donné comme suit :

$$I_{n1} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \cos(\phi_n) \eta_n} \quad [\text{A}] \quad (1.10)$$

m_1 ó Nombre de phases statoriques.

U_{n1} ó Tension nominale.

- d) **Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche :**

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

$$U_{encl} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{n1}} \quad (1.11)$$

a_1 ó Nombre de voies parallèles.

- e) **Nombre de spires d'une voie parallèle :**

Il est donné par la formule suivante :

$$W_l = \frac{p \cdot q_1 \cdot U_{encl}}{a_1} \quad (1.12)$$

- **Angle électrique :**

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad (1.13)$$

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

$$q_l = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (1.14)$$

C'est la distance entre les cotés actifs de deux sections qui se suivent.

$$y_I = \frac{Z_1}{2.p} - \varepsilon \quad (1.15)$$

ε ó Raccourcissement $\varepsilon = 0$

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

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$S_{eff} = \frac{I_{n1}}{a_1 \cdot J_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.16)$$

J_1 ó Densité du courant dans l'enroulement statorique, elle varie entre $(2 \div 14)$ [A/mm²].

NB : Si la section effective calculée est supérieure à 1,8mm² on doit diviser celle-ci en sections élémentaires, et comme la section des conducteurs est normalisée, on choisira la section standard la plus proche de celle calculée.

$$S_{el} = S_{eff} / N_{el} \quad [\text{mm}^2] \quad (1.17)$$

N_{el} ó nombre de conducteurs élémentaires.

Les sections normalisées sont données par le tableau T.1 (voir l'annexe)

II.1.1.2. Dimensionnement de la feuille statorique :

a) Largeur de la dent :

La largeur de la dent est calculée à partir de la loi de conservation du flux à travers le pas dentaire, elle est représenté dans la figure 4.b, elle est donnée comme suit :

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1\max}} \quad [\text{mm}] \quad (1.18)$$

Où :

K_{fer} ó Coefficient de remplissage du paquet de tôle statorique et rotorique.

pour l'isolation avec oxydation.

pour l'isolation en vernie.

$$K_{fer} = 0.97$$

B_{z1max} Induction maximale dans la dent statorique en [T].

b) Hauteur du dos du stator :

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

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot B_{\delta}}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [\text{mm}] \quad (1.19)$$

B_{c1} Induction magnétique dans le dos du stator.

c) Hauteur de la dent :

La hauteur de la dent est donnée par l'expression suivante :

$$h_{z1} = 0.5(D_{ext} - D_1) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (1.20)$$

D_{ext} Diamètre extérieur du stator.

d) Largeur minimale de l'encoche :

La largeur minimale de l'encoche est donnée par l'expression suivante :

$$b_{enc11} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 0.2 \cdot h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (1.21)$$

e) Largeur maximale de l'encoche :

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

$$b_{enc12} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (1.22)$$

f) Hauteur de l'encoche :

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

$$h_{enc1} = h_{z1} - h_{f1} - h_{k1} - \frac{b_{enc12}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (1.23)$$

La hauteur de la fente d'encoche statorique, elle varie entre
1.2 ÷ 1.8 [mm]

h_{k1} : Hauteur de la clavette.

g) Section de l'encoche statorique :

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

$$S_{enl} = 0.5 \cdot (b_{enc11} + b_{enc12}) \cdot h_{enc1} + \frac{\pi \cdot b_{enc12}^2}{8} - S_{iso} \quad [\text{mm}] \quad (1.24)$$

S_{iso} : Section occupée par l'isolation

$$S_{iso} = 0.5 \left(\pi \cdot \frac{b_{enc12}^2}{2} + 2 \cdot h_{enc1} + b_{enc11} \right) \cdot e_1 \quad [\text{mm}] \quad (1.25)$$

e_1 : Epaisseur de l'isolant.

h) Coefficient de remplissage :

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

$$K_{rl} = N_{elt} \cdot \frac{d_{iso}^2}{S_{encl}} \quad (1.26)$$

Avec :

$$N_{elt} = N_{el} \cdot U_{encl}$$

d_{iso} : Diamètre de conducteurs avec isolation.

S_{encl} : Section de l'encoche en [mm²].

Induction magnétique :

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_l , l'induction B_δ et le flux ϕ .

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

- **Charge linéaire :**

La charge linéaire est le nombre d'ampères par mètre sur la périphérie d'un pôle.

$$A_l = \frac{I_{n1} \cdot U_{encl} \cdot Z_1}{D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad [\text{A/m}]. \quad (1.27)$$

- **Induction magnétique dans le entrefer :**

L'induction magnétique dans le entrefer caractérise l'utilisation magnétique.

$$B_\delta = \frac{\phi}{\alpha_i \cdot \tau_{p1} \cdot L_i \cdot 10^{-6}} \quad [\text{T}]. \quad (1.28)$$

- **Flux sous un pôle :**

$$\phi = \frac{U_{n1} \cdot K_e}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [\text{Weber}]. \quad (1.29)$$

j) Choix de l'entrefer :

Pour des raisons magnétique, on choisit l'entrefer aussi grand que possible pour réduire les pertes supplémentaires dans le fer produites par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par les champs d'harmonique supérieur. Comme il doit être aussi petit que possible afin d'avoir un facteur de puissance qui s'approche au maximum de l'unité, et un courant magnétisant minimal. L'épaisseur de l'entrefer est liée à la puissance de la machine. Il est donné en fonction de la hauteur d'axe et le nombre de paires de pôles.

rotor :

Le rotor est a cage d'écureuil, celle-ci est constituée de barres logées dans les encoches ovales semi-ouvertes, court circuitées a leurs extrémités.

a) Choix du nombre d'encoches rotorique :

Pour éviter les couples parasites et les couples de vibration créés par les harmoniques des forces magnétomotrices, et le bruit magnétique qui est crée 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 ; ($Z_1 \neq Z_2$).

b) Diamètre extérieur du rotor :

Le diamètre extérieur du rotor est donné par l'expression suivante :

$$D_2 = D_1 - 2\delta \quad [\text{mm}]. \quad (1.30)$$

Où :

δ Le épaisseur de l'entrefer.

- **Pas dentaire rotorique :**

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

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (1.31)$$

Avec :

Z_2 Le nombre d'encoches rotorique.

D_2 Le diamètre extérieur du rotor en [mm].

c) Courant dans la barre :

En général, le courant dans une phase de l'enroulement rotorique est donné par :

$$I_2 = I_{11} \cdot \frac{I_{n1} \cdot m_1 \cdot K_{en1} \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n)}{m_2 \cdot W_2 \cdot K_{en2}} \quad [\text{A}]. \quad (1.32)$$

à cage d'écureuil, on considère que cette cage est un phase m_2 égal au nombre de pôle Z_2 . Donc $K_{en2}=1$

et $W_2=0.5$, dans ce cas on aura :

$$I_2 = 1,11 \cdot I_{n1} \cdot 2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot \frac{K_{en1}}{Z_2} \quad [A]. \quad (1.33)$$

Avec :

I_{n1} ó Courant nominal statorique.

W_1 ó Nombre de spires statoriques.

K_{en1} ó Facteur de bobinage statorique.

II.1.1.4. Dimensionnement de la feuille rotorique :

La feuille rotorique est représentée par la figure 5.a.

a) Hauteur de la culasse rotorique :

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

$$h_{c2} = 0.5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad [mm]. \quad (1.34)$$

B_{c2} ó Induction dans la culasse rotorique

- Pas polaire rotorique en mm :

$$\tau_{p2} = \pi \cdot \frac{D_2}{2 \cdot p} \quad [mm] \quad (1.35)$$

b) Hauteur de la dent :

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

$$h_{z2} = 0.5 \cdot (D_2 - D_{int2}) - h_{c2} \quad [mm] \quad (1.36)$$

h_{c2} ó hauteur de la culasse rotorique en [mm].

D_{int2} ó diamètre intérieur du rotor en [mm].

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

$$b_{z2} = \frac{t_2 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z2\max}} \quad [\text{mm}]. \quad (1.37)$$

$B_{z2\max}$ ó induction admissible dans la dent rotorique en [T].

d) Diamètre supérieur de l'encoche :

Le diamètre supérieur de l'encoche est exprimé par l'expression suivante :

$$d_{21} = \left[\frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{f2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{(Z_2 - \pi)} \right] \quad [\text{mm}]. \quad (1.38)$$

Avec :

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

b_{z2} ó Largeur de la dent.

e) Diamètre inférieur de l'encoche :

Le diamètre inférieur de l'encoche est exprimé par l'expression suivante :

$$d_{22} = \left[\frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{z2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{(Z_2 + \pi)} \right] \quad [\text{mm}]. \quad (1.39)$$

f) Hauteur de l'encoche :

La hauteur de l'encoche est donnée comme suit :

$$h_{enc2} = h_2 + 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad [\text{mm}]. \quad (1.40)$$

Avec :

h_2 ó La hauteur entre les axes de l'encoche.

$$h_2 = h_{z2} - h_{f2} - 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \quad [\text{mm}]. \quad (1.41)$$

g) Cage rotorique :

La cage rotorique est à barres d'aluminium logées dans des encoches ovales semi-ouvertes court-circuitées à leurs extrémités par deux anneaux.

Elle est donnée en fonction des dimensions de la encoche par l'expression suivante :

$$S_b = 0.125 \cdot (d_{21}^2 + d_{22}^2) + 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \cdot h_2 \quad [\text{mm}^2] \quad (1.42)$$

- **Densité du courant :**

Elle est donnée par la formule suivante

$$J_b = \frac{I_2}{S_b} \quad [\text{A/mm}^2]. \quad (1.43)$$

II.1.1.5. Dimensionnement de la anneau :

- **Section de la anneau :**

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

$$S_{an} = (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z_2 \cdot S_b}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2]. \quad (1.44)$$

- **Hauteur de la anneau :**

La hauteur de la anneau s'exprime comme suit :

$$h_{an} = (1.1 \div 1.25) \cdot h_{z2} \quad [\text{mm}]. \quad (1.45)$$

- **Largeur de la anneau :**

La largeur de la anneau s'exprime comme suit :

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} \quad [\text{mm}] \quad (1.46)$$

- **Diamètre moyen de la anneau :**

Le diamètre moyen de la anneau s'exprime comme suit :

$$D_{an} = D_2 - h_{an} \quad [\text{mm}]. \quad (1.47)$$

dans l'anneau :

Elle s'exprime comme suit :

$$J_{an} = \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad [\text{A/mm}^2]. \quad (1.48)$$

Avec :

I_{an} ó Courant dans l'anneau, il est donné par la relation suivante :

$$I_{an} = \frac{I_b}{K_{red}} \quad [\text{A}] \quad (1.49)$$

K_{red} ó Coefficient de réduction Qui est donné par l'expression suivante :

$$K_{red} = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right) \quad (1.50)$$

que :

Le circuit magnétique des machines à courant alternatif, 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 magnétique. Le principe de calcul est basé sur la loi générale de la circulation du champ magnétique.

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

Où :

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

l_x représente la ligne moyenne du tronçon choisi.

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 :

- Entrefer.
- La culasse statorique.
- La culasse rotorique.
- Les dents statorique.
- Les dents rotorique.

II.1.2.1. Circuit magnétique statorique :

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

de 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 de la culasse statorique :

Elle est donnée par :

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

Avec :

H_{c1} : Intensité du champ magnétique dans la culasse statorique qui correspond à l'induction B_{c1} .

H_{c1} est déterminé de la courbe $H_{c1} = f(B_{c1})$. Représenté dans le tableau T.3. (voir l'annexe).

c) Force magnétomotrice dans la dent du stator :

Elle est exprimée par la relation suivante :

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

Où :

h_{z1} : Hauteur de la dent statorique en [mm].

H_{z1} : Intensité du champ magnétique qui correspond à l'induction B_{z1} .
déterminer du tableau T.2 (voir l'annexe).

II.1.2.2. Circuit magnétique rotorique :

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

Elle est donnée par la formule suivante :

$$L_{c2} = (D_2 - 2 \cdot h_{z2} - h_{c2}) \cdot \pi \cdot p + h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (2.4)$$

Avec :

l_{c2} Hauteur de la culasse rotorique en [mm].

h_{c2} Hauteur de la culasse rotorique en [mm].

b) Force magnétomotrice dans la culasse du rotor :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [A]. \quad (2.5)$$

H_{c2} Intensité du champ magnétique dans la culasse rotorique qui correspond à l'induction B_{c2} . (voir le tableau T.3 en annexe).

c) Force magnétomotrice dans les dents du rotor :

Pour le type d'encoche représenté dans la figure 5.b on a :

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot (h_{z2} - 0,4 \cdot d_{21}) \quad [A] \quad (2.6)$$

H_{z2} Intensité du champ magnétique dans la dent rotorique qui correspond à l'induction B_{z2} (voir le tableau T.2 en annexe).

II.1.2.3. Force magnétomotrice dans l'entrefer :

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

$$F = 0,8 \cdot B \cdot K \cdot \dots \cdot 10^{-3} \quad [A]. \quad (2.7)$$

Avec :

K Coefficient de CARTER qui tient compte du non- uniformité de l'entrefer, due aux ouvertures des encoches statoriques et rotoriques. Il est donné par la relation suivante :

$$K = K_1 \cdot K_2 \quad (2.8)$$

Avec :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + (5 \cdot \delta \cdot t_2 / b_{f2})} \quad (2.9)$$

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + (5 \cdot \delta \cdot t_1 / b_{f1})} \quad (2.10)$$

ativement les largeurs des fentes des dents statorique

II.1.2.4. Force magnétomotrice totale par paire de pôle :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F = \sum F_i = 2.(F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad [A] \quad (2.11)$$

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

II.1.2.5. Coefficient de saturation :

a) Coefficient de saturation des dents :

Il est donnée par :

$$K_{\mu z} = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad (2.12)$$

b) Coefficient de saturation de la machine :

Il est donnée par :

$$K_{\mu} = \frac{\sum F_i}{2.F_{\delta}} \quad (2.13)$$

II.1.2.6. Courant magnétisant :

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

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot \sum F_i}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [A]. \quad (2.14)$$

II.1.2.7. Réactance de magnétisation :

Elle est exprimée par :

$$X_m = \frac{K_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad [\Omega] \quad (2.15)$$

K_e ó Facteur de majoration, il varie entre 0.9 et 0,98

Inductance magnétique du stator :

Elle est donnée par :

$$\sigma_{\mu} = \frac{X_1}{X_m} \quad (2.16)$$

X_1 Réactance inductive de dispersion de l'enroulement statorique.

II.1.2.9. Force électromotrice à vide E_o :

Elle est donnée par :

$$E_o = \frac{U_{n1}}{(1 + \sigma_{\mu})} \quad [\text{V}]. \quad (2.17)$$

Caractéristiques des enroulements :

Pour pouvoir déterminer les caractéristiques de la machine on procédera au calcul de tous les paramètres suivants ($R_1, R_2, X_1, X_2, R_{2dem}, X_{2dem}$).

II.1.3.1. Paramètres statoriques :

a) Résistance active d'une phase du stator :

$$R_1 = \rho_{cu}(T) \frac{W_1 \cdot L_{w1} \cdot 10^{+3}}{a_1 \cdot N_{el} \cdot q_{eff}} \quad [\Omega] \quad (3.1)$$

Avec :

q_{eff} Section standard d'un conducteur.

$\rho_{cu}(T)$ Résistivité du cuivre à la température (T).

Elle est donnée pour :

T=20°C $\rho_{cu} = 17,2 \cdot 10^{-9}$ [Ω .m]

T=115°C $\rho_{cu} = 24,4 \cdot 10^{-9}$ [Ω .m]

L_{w1} Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique, calculé

comme suit :

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

Où :

L_i Longueur virtuelle de l'induit.

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

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

b_{1moy} Largeur moyenne d'une section.

$$b_{1moy} = \frac{\pi \cdot (D1 + h_{z1}) \cdot Y_{1moy}}{Z_1} \quad [mm] \quad (3.4)$$

Y_{1moy} Pas moyen d'un groupe de section.

Reactances de fuites du stator :

La reactance de fuite globale du stator comprend :

- **Reactance de fuite d'encoche :**

Elle est due aux flux de fuite qui se referme autour des conducteurs.

$$X_{enc1} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2}{q_1 \cdot P \cdot 10^8} \cdot \lambda_{enc1} \quad [\Omega] \quad (3.5)$$

- **Reactance de fuite différentielle :**

C'est le résultat des flux suivants :

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

Elle est donnée par :

$$X_{1d} = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot W_1^2}{P \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_{1d} \quad [\Omega] \quad (3.6)$$

- **Reactance de fuite frontale :**

C'est la reactance 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 reactance totale est donnée par :

$$X_1 = 1,58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^3} \quad [\Omega]. \quad (3.8)$$

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

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

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

$$\lambda_{enc1} = \frac{h_1}{3b_{enc12}} \cdot K_{b1} + \left(\frac{h_{11}}{b_{enc12}} + \frac{3h_{k1}}{b_{enc12} + 2b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{b2} \quad (3.10)$$

K_{b1} , K_{b2} ó Coefficients donnée suivant la figure 6.6 (voir annexe).

$K_{b1} = K_{b2} = 1$ pour l'enroulement concentrique.

λ_{1d} ó Perméance différentielle proportionnelle à la réactance de fuite différentielle.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\lambda_{1d} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{en1})^2}{K_\delta \cdot \delta} \cdot K_{r1} \cdot K_{dd1} \cdot K_{r1} \quad (3.11)$$

$$K_{r1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{f1}^2}{\delta \cdot t_1} \quad (3.12)$$

Où :

K_{r1} ó Coefficient qui dépend de Q_1 donnée par le tableau T.5 (voir l'annexe).

K_{dd1} ó Coefficient de fuite différentielle donnée par le tableau T.6 en fonction de $\frac{Z_2}{p}$ et q_1 (voir l'annexe).

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

$$\lambda_{1f} = 0,34 \cdot \frac{q_1 \cdot (L_{f1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau_{p1})}{L_i} \quad (3.13)$$

II.1.3.2.1. Résistance rotorique :

a) Résistance active de la barre :

Pour le type d'encoche présenté dans la figure 5.b on a :

$$R_b = \rho_{al}(T) \cdot \frac{L_i}{S_b} \cdot 10^3 \quad [\Omega]. \quad (3.14)$$

Pour : $T=20^\circ\text{C}$ $\rho_{al}(T)=28 \cdot 10^{-9}$ $[\Omega \cdot m]$.

$T=115^\circ\text{C}$ $\rho_{al}(T) = 48,8 \cdot 10^{-9}$ $[\Omega \cdot m]$.

Dans le calcul, on assimile la longueur de la barre à celle de l'induit $L_b=L_i$

b) Résistance de l'anneau :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{an} = \frac{\rho_{al}(T) \cdot 2\pi \cdot D_{an} \cdot 10^{+3}}{Z_2 \cdot S_{an}} \quad [\Omega]. \quad (3.15)$$

Avec :

S_{an} ó Section de l'anneau en $[\text{mm}^2]$.

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

c) Résistance de l'anneau ramenée a la barre :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-b} = \frac{R_{an}}{(K_{red})^2} \quad [\Omega]. \quad (3.16)$$

d) Résistance de l'anneau ramenée au stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$R_{anram-s} = M \cdot R_{an-ram-b} \quad [\Omega]. \quad (3.17)$$

$$Z_2 \left(\frac{W_1 \cdot K_{en1}}{K_{ob}} \right)^2 \quad (3.18)$$

K_{ob} ó Coefficient d'obliquité des encoches rotorique, donné comme suit :

$$K_{ob} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)} \quad (3.19)$$

α_{ob} ó Angle d'inclinaison des encoches.

$$\alpha_{ob} = \frac{2\pi \cdot p \cdot \beta_{ob}}{Z_2} \quad [\text{rad}] \quad (3.20)$$

M ó Coefficient de réduction de la cage rotorique vers le stator.

$$\beta_{ob} = \frac{t_1}{t_2} \quad (3.21)$$

β_{ob} ó Rapport des pas dentaires statorique et rotorique.

e) Résistance active d'une phase rotorique :

Elle représente la somme des résistances de la barre et celle de l'anneau ramenée à la barre. Pour notre type d'encoche Elle est donnée comme suit :

$$R_2 = R_b + R_{anram-b} \quad [\Omega]. \quad (3.22)$$

f) Résistance d'une Phase rotorique ramenée au stator :

Pour notre type d'encoche elle est donnée comme suit :

$$R_{2ram} = M \cdot R_2 \quad [\Omega]. \quad (3.23)$$

II.1.3.2.2. Réactance de dispersion et perméance du rotor :

Dans cette partie, on a à calculer :

-La réactance de fuite d'encoche, due au flux de fuite qui se renferme autour des conducteurs.

Le rotor est une cage d'induction à double alimentation, la partie de l'enroulement située dans l'air à chaque

-La réactance due au flux différentiel dont la valeur est très élevée dans un entrefer faible.

Et dans le type d'encoche représenté dans la figure 5.b on distingue aussi :

-La réactance de fuite due à l'induction dans les encoches.

-La réactance de dispersion globale est donnée par la formule suivante :

$$X_2 = 7,9.f_1.L_2.\lambda_2.10^{-9} \quad [\Omega] \quad (3.24)$$

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

$$\lambda_2 = \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad (3.25)$$

$\lambda_{2enc}, \lambda_{2d}, \lambda_{2f}, \lambda_{ob}$ ó Sont respectivement les perméances : d'encoche, différentielle, frontale et oblique.

On procède au calcul des différentes perméances :

- **Perméance d'encoche :**

$$\lambda_{2enc} = C_\lambda + \left(\frac{h_{f2}}{b_{f2}} \right) \quad (3.26)$$

Avec :

$$C_\lambda = \psi \left[\left(\frac{(h_2 + 0,4d_{22})}{3.d_{21}} \right) \left(\frac{(1 - \pi.d_{21})}{8.S_b} \right)^2 + 0,66 - \left(\frac{b_{f2}}{2.d_{21}} \right) \right] \quad (3.27)$$

ψ ó Représenté dans la figure 6.8

Pour le régime nominal on a $\psi = 1$.

- **Perméance différentielle :**

$$\lambda_{2d} = \frac{0,9.t_2.(Z_2 / 6.p)^2}{\delta.K_\delta} . K_{dd2} \quad (3.28)$$

érentielle donné en fonction de q_2 voir figure 7.1

L'équation qui correspond à l'allure de la courbe est donnée par :

$$K_{dd2} = \frac{9,15}{100.(Z_2/6.p)^2} \quad (3.29)$$

- **Perméance frontale :**

$$\lambda_{2f} = \frac{2,3.D_{an moy}}{Z_2.L_i.(K_{dd2})^2} \log\left(\frac{4,7.D_{an moy}}{2.(h_{an} + L_{an})}\right) \quad (3.30)$$

- **Perméance d'inclinaison des encoches rotorique :**

$$\lambda_{ob} = \frac{t_2.\beta_{ob}}{9,5.\delta.K_\delta.K_\mu} \quad (3.31)$$

Avec :

K_μ Coefficient de saturation de la machine.

II.1.3.2.3. Réactance du rotor ramenée au stator :

Pour le type d'encoche présenté dans la figure 4.b on a :

$$X_{2ram} = M.X_2 \quad [\Omega] \quad (3.32)$$

II.1.3.3. 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 ($f_1=50$ 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 ($f_2=g.f_1$), donc la profondeur de pénétration augmente et la résistance de la cage diminue.

Elle est donnée par :

$$h_{pp} = \frac{h_b}{1 + \varphi} \quad [\text{mm}]. \quad (3.33)$$

Où :

h_b : Hauteur de la barre.

φ : Coefficient qui dépend de la valeur de ξ , il est donné par la courbe de la figure 6.7

$$\xi = 0,064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g} \quad \text{Pour } T=115^\circ \quad (3.34)$$

b) Largeur à la limite de pénétration :

Elle est donnée par :

$$b_{pp} = d_{21} - [(d_{21} - d_{22}) / h_2] (h_{pp} - d_{12} / 2) \quad [\text{mm}] \quad (3.35)$$

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

Elle est donnée par :

$$S_{bdem} = (\pi d_{21}^2 / 8) + [0,5 (d_{21} + b_{pp}) (h_{pp} - 0,5 d_{21})] \quad [\text{mm}^2] \quad (3.36)$$

d) Résistance de la barre au démarrage :

Pour le type de encoche donnée en figure 5.b on a :

$$R_{bdem} = R_b \cdot K_{dep} \quad [\Omega] \quad (3.37)$$

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.

$$K_{dep} = \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad (3.38)$$

e) Résistance de la Cage au démarrage :

Elle est donnée comme suit :

$$R_{2dem} = R_{anram-b} + R_{bdem} \quad [\Omega] \quad (3.39)$$

rrage ramenée au stator :

Elle est donnée par :

$$R_{2dem-ram} = M \cdot (R_{anram-b} + R_{bdem}) \quad [\Omega] \quad (3.40)$$

g) Réactance de fuite au démarrage :

Pour le type d'encoche donnée en figure 5.b on a :

$$X_{2dem} = 7,9 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot \lambda_{2dem} \cdot 10^{-9} \quad [\text{á}] \quad (3.41)$$

X_{2dem} Réactance de dispersion du rotor au démarrage

$$\lambda_{2dem} = \lambda_{encdem} + \lambda_d + \lambda_f + \lambda_{ob} \quad (3.42)$$

λ_{2dem} Perméance de dispersion du rotor au démarrage

Seule la perméance d'encoche qui est affectée par l'effet de refoulement du courant.

h) Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator :

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

Pour notre type d'encoches :

$$X_{2demram-s} = M \cdot X_{2dem} \quad [\text{á}] \quad (3.43)$$

ndement :

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 statorique et rotorique, ainsi que les différentes parties mécaniques.

Cette partie est consacré à l'évaluation des pertes dans le moteur asynchrone, et cela pour permettre d'estimer le rendement en sachant à l'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 l'aluminium.
- Pertes mécaniques.
- Pertes supplémentaires.

II.1.4.1. Pertes principales dans le fer :

Les pertes principales dans le fer sont les pertes par hystérésis, dues au déphasage entre le courant magnétisant et le flux fondamental, et les pertes par courant de Foucault dues à la circulation des courants induits par le flux fondamental dans les tôles magnétiques. Les dents et la culasse statorique sont les parties les plus touchées par ces pertes. Les pertes magnétiques dans le rotor sont négligeables à cause de la faible fréquence du flux.

a) Pertes dans les dents :

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

$$P_{fz1} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot B_{z1max}^2 \cdot G_{z1} \quad [W] \quad (4.1)$$

$$P_{1/50} := 2,5 \quad [W.Kg^{-1}] \quad \text{pour l'acier 2013}$$

$$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot [h_{z1} \cdot (D_1 + h_{z1}) \cdot \delta S_{enc1} \cdot Z_1] \quad [Kg] \quad (4.2)$$

G_{z1} ó Poids des dents statorique.

rique :

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

$$P_{cl} = 1,7 \cdot P_{1/50} \cdot G_{cl} \cdot B_{cl}^2 \quad [W] \quad (4.3)$$

$$G_{cl} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot h_{cl} \cdot (D_{ext} \text{ ó } h_{cl}) \quad [Kg] \quad (4.4)$$

G_{cl} ó Poids de la culasse statorique.

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

$$P_{fer} = P_{cl} + P_{fz1} \quad [W] \quad (4.5)$$

II .1.4.2. Pertes électriques dans le cuivre et dans l'aluminium :

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 statorique :

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

$$P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{n1}^2 \quad [W] \quad (4.6)$$

Avec :

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

I_{n1} ó Courant dans une phase statorique.

b) Pertes joules rotorique :

Ce sont les pertes dans l'aluminium, elles sont données par la formule suivante :

$$P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [W] \quad (4.7)$$

Avec :

m_2 ó Nombre de phase rotorique. ($m_2 = Z_2$)

I_2 ó Courant dans la barre.

phase rotorique.

II.1.4.3. Pertes mecanique :

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

$$P_{mec} = K_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad [W] \quad (4.8)$$

Avec :

K_t : Facteur de majoration.

- $K_t = 1,3 \cdot (1 \pm D_{ext} \cdot 10^{-3})$ pour $2p = 2$.
- $K_t = 1$ pour $2p > 2$.

II.1.4.4. Pertes supplémentaires :

Ces pertes ont pour origine le champ de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines, on les estime à 0,5 % de la puissance absorbée par le moteur. Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{sup} = 0,005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad [W] \quad (4.9)$$

II.1.4.5. Pertes totales :

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{tot} = P_{fer} + P_{j1} + P_{j2} + P_{mec} + P_{sup} \quad [W] \quad (4.10)$$

II.1.4.6. Rendement de la machine :

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_{tot}} \quad (4.11)$$

II.1.4.7. 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 :

$$P_{a10} = \frac{P_{fer} + P_{mec} + R_1 \cdot m_1 \cdot (I_\mu)^2}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [A] \quad (4.12)$$

D'où:

$$R_m = \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{oa}} \quad [\] \quad (4.13)$$

Avec :

I_μ ó Courant magnétisant.

X_m ó Réactance magnétisante exprimée.

du moteur :

Dans cette partie de calcul, nous étudions les performances des moteurs, en utilisant une méthode analytique se basant sur les schémas équivalents de la machine asynchrone .Il existe plusieurs schémas équivalents de machines asynchrones qui sont analogues à celui d'un transformateur :

- Schéma réel de substitution du circuit primaire et du circuit secondaire.
- Schéma physique équivalent ramené au rotor immobile.
- Schéma équivalent d'une machine asynchrone considéré comme un transformateur (schéma équivalent en T).
- Schéma équivalent d'une machine asynchrone avec circuit magnétisant rapporté aux bornes du réseau (schéma équivalent en L).

Dans notre étude on utilise le schéma équivalent en L car elle est le plus commode .Ceci pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement du moteur.

II.1.5.1. Schéma équivalent en L du moteur :

C'est un schéma conventionnel monophasé ramené au stator :

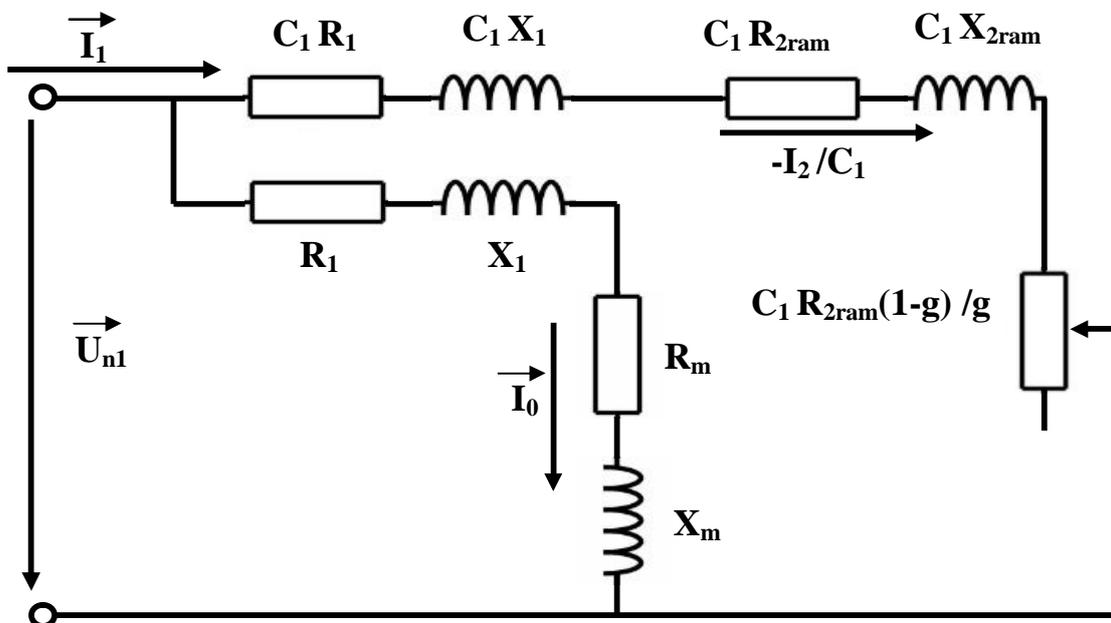


Fig. 3 : schéma équivalent en L du moteur

- R_1 Résistance statorique en $[\Omega]$
- X_1 Réactance de fuite du stator en $[\Omega]$
- X_{2ram} Réactance de fuite du rotor ramené au stator en $[\Omega]$
- R_{2ram} Résistance rotorique ramené au stator en $[\Omega]$
- 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 donné par :

$$C_1 \approx 1 + \frac{X_1}{X_m} \quad (5.1)$$

II.1.5.2. Caractéristique de fonctionnement du moteur :

En se référant à la figure 3, on détermine :

a) Glissement :

$$g = \frac{A - \sqrt{A^2 - C_1^2 \cdot R_{2ram} \cdot B}}{B} \quad (5.2)$$

Avec :

$$B = 2A + R' \quad (5.3)$$

$$A = \frac{m_1 U_{n1}^2}{2p_2} - R_1 \quad (5.4)$$

$$R' = R_{2ram} \left[\left(\frac{R_1}{R_{2ram}} \left(1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) \right)^2 + \left(\frac{X_1}{R_{2ram}} \left(1 + \frac{X_{2ram}}{X_m} \right) + \frac{X_{2ram}}{R_{2ram}} \right)^2 \right] \quad [\Omega] \quad (5.5)$$

b) Puissance rapporté du circuit primaire au circuit secondaire :

La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire est égale :

$$P'_2 = P_2 + P_{sup} + P_{mec} \quad [W] \quad (5.6)$$

Elle est exprimé par :

$$Z_{2eq} = \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2} \quad [\text{á}] \quad (5.7)$$

Avec :

$$R_{2eq} = C_1 R_1 + C_1^2 R_{2ram} / g \quad [\text{á}] \quad (5.8)$$

$$X_{2eq} = C_1 X_1 + C_1^2 X_{2ram} \quad [\text{á}] \quad (5.9)$$

d) Calcul du courant secondaire :

Le courant dans le circuit secondaire est donné par :

$$I''_2 = \frac{U_{nl}}{Z_{2eq}} \quad [\text{A}] \quad (5.10)$$

$$I'_2 = C_1 \cdot I''_2 \quad [\text{A}] \quad (5.11)$$

Avec :

I''_2 ó Le courant dans le circuit secondaire transformé en L.

I'_2 ó Le courant dans le circuit secondaire ramené au primaire.

e) Facteur de Puissance rotorique :

Le facteur de puissance rotorique est donnée par :

$$\cos\phi_2 = \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}} \quad (5.12)$$

Døu :

-Courant actif :

$$I''_{2a} = I''_2 \cdot \cos\phi_2 \quad [\text{A}] \quad (5.13)$$

-Courant réactif :

$$I''_{2r} = I''_2 \cdot \sin\phi_2 \quad [\text{A}] \quad (5.14)$$

pond aux pertes fer et aux pertes joules

$$I_{0a} = \frac{P_{a10} + P_{f1}}{m_1 \cdot U_{n1}} \quad [\text{A}] \quad (5.15)$$

-Courant magnétisant :

$$I_{0r} = \frac{P \cdot \sum Fi}{0,9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{en1}} \quad [\text{A}] \quad (5.16)$$

-Courant total à vide :

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad [\text{A}] \quad (5.17)$$

-Courant absorbé :

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad [\text{A}] \quad (5.18)$$

Avec :

$$I_{1a} = I_{0a} + I''_{2a} \quad [\text{A}] \quad (5.19)$$

$$I_{1r} = I_{0r} + I''_{2r} \quad [\text{A}] \quad (5.20)$$

Le facteur de puissance de la machine est donné par :

$$\cos\phi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1} \quad (5.21)$$

f) Puissance absorbée par le moteur :

Elle est exprimée par la relation suivante :

$$P_1 = m_1 \cdot U_{n1} \cdot I_{1a} \quad [\text{W}] \quad (5.22)$$

g) Vitesse de rotation du moteur :

Elle est donnée par la relation :

$$N_2 = N \cdot (1 - g) \quad [\text{tr/min}] \quad (5.23)$$

NO vitesse du synchronisme.

g ó Glissement.

$N_2/N=1-g$ ó C'est la vitesse relative du rotor par rapport au stator.

h) Couple utile sur l'arbre du moteur :

Il est donné par :

$$C_u = 9,55 \frac{P_2 \cdot 10^3}{P_n} \quad [\text{N.m}] \quad (5.24)$$

Remarque :

Afin de pouvoir tracer les caractéristiques de la machine; on a procédé dans le programme informatique comme suit :

On calcul la puissance en unité relative :

$$P^*_2 = \frac{P_2}{P_n} \quad (5.25)$$

Ensuite, on fait varier la puissance P^*_2 et on aura toutes les valeurs de tous les paramètres nécessaires pour tracer les caractéristiques de la machine, à savoir :

(g, N_2 , I_1 , $\cos\phi_n$, C_u)

II.1.5.3 Caractéristiques de démarrage et capacité de surcharge :

a) Résistance équivalente au démarrage :

Elle est exprimée comme suit :

$$R_{eqdem} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2dem-ram} \quad [\] \quad (5.26)$$

$R_{2dem-ram}$ ó Résistance de démarrage rotorique ramenée

arrage :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$X_{eqdem} = X_{const} + K_x \cdot X_{var} \quad [\] \quad (5.27)$$

Avec :

K_x ó Coefficient qui est donné suivant la forme de l'encoche.

*les encoches semi ouvertes $K_x=0,0825$

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

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

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

$$X_{const} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_{1dem}}{\lambda_1} + C_1^2 \cdot X_{2dem-ram} \cdot \frac{\lambda_{2d} - \lambda_{2var}}{\lambda_{2var}} \quad [\] \quad (5.28)$$

$$X_{var} = C_1 \cdot X_1 \cdot \frac{\lambda_{1dem}}{\lambda_1} + \frac{C_1^2 \cdot X_{2ram} \cdot \lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad [\] \quad (5.29)$$

Avec :

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

$$\lambda_{2var} = \lambda_{enc2var} + \lambda_{2d} \quad (5.30)$$

Ou :

$\lambda_{enc2var}$ ó Composante variable de perméance d'encoche rotorique

Pour le type d'encoche représenté dans la figure 5.b, on a :

$$\lambda_{enc2var} = \frac{h_{f2}^2}{b_{f2}} \quad (5.31)$$

Avec :

λ_1 ó Perméance statorique.

λ_{1dem} ó Perméance statorique au démarrage.

encoche statorique qui dépend de la saturation.

Elle est donnée par :

$$\lambda_{ene1d} = \left(\frac{3h_{k1}}{b_{ene1} + 2b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{\beta 2} \quad (5.32)$$

h_{f1} ó Hauteur de la fente d'encoche statorique.

c) Capacité de surcharge :

La capacité de surcharge du moteur, c'est le rapport entre le couple maximal et le couple nominal .Elle est donnée comme suit :

$$K = \frac{C_{max}}{C_{nom}} = \frac{\frac{g_{nom}}{g_{cr}} + \frac{g_{cr}}{g_{nom}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}} \quad (5.33)$$

Avec :

R_{cr} ó Résistance critique.

$$R_{cr} = 2 \cdot R_1 \frac{g_{cr}}{(R_{2ram} \cdot C_1)} \quad (5.34)$$

g_{nom} ó Glissement nominal

g_{cr} ó Glissement critique qui est donné par :

$$g_{cr} = \frac{C_1 \cdot R_{2ram}}{(X_1 + C_1 \cdot X_{2ram})} \quad (5.35)$$

Avec :

R_{2ram} ó Résistance rotorique ramenée.

X_{2ram} ó Réactance rotorique ramenée.

Au démarrage le moteur asynchrone est assimilable à un transformateur dont le secondaire alimente une résistance faible dans ces conditions le courant de démarrage est considérable ; il peut atteindre 6 à 7 fois le courant nominale .sa valeur est donnée par l'expression suivante :

$$I_{1dem} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2}} \quad [A] \quad (5.36)$$

U_{n1} Tension d'alimentation.

e) Le couple de démarrage :

Il est donné par l'expression suivante :

$$C_d = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_{n1}^2 \cdot R_{2dem}}{2 \cdot f_1 (R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)} = p \cdot m_1 \cdot I_{1dem}^2 \frac{R_{2dem}}{2 \cdot f_1} \quad [N.m] \quad (5.37)$$

N.B :

Le rapport entre le couple de démarrage et le couple nominal est estimé a :

- Pour $h = 50 \div 132$ [mm] on a :

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 2 \div 2,2 \quad (5.38)$$

- Pour $h = 160 \div 355$ [mm] on a :

$$\frac{C_d}{C_{nom}} = 1,2 \div 1,4 \quad (5.39)$$

Introduction :

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

L'objectif de l'étude thermique consiste à déterminer la température dans les différentes parties de la machine. Pour assurer sa fiabilité on utilise une source froide (dans notre cas un ventilateur).

Suivant leurs tenus 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 à une tenue à la chaleur de 155°C. Les matériaux appartenant à cette classe sont à base de mica, d'amiante et de fibres de verre. La transmission de la chaleur dans les machines électriques a lieu par conductivité thermique, rayonnement et convection.

1-transmission de la chaleur à l'intérieur des corps solides (cuivre- fer- isolant).

2-transmission de chaleur par convection : On entend par la transmission par convection lorsqu'il s'agit des liquides et des gaz. Le phénomène de convection est créé par la circulation de l'air réfrigérant, dans ce cas on parle de la convection forcée.

3-rayonnement thermique : c'est la transmission de la chaleur par rayonnement à travers la carcasse qui transmet la chaleur au milieu ambiant.

II.2.1. Calcul de l'échauffement de la machine :

a) Calcul de l'écart de température entre la surface intérieure de noyau statorique et celle de l'air à l'intérieur du moteur :

Il est donné par la formule suivante :

$$T_{\text{surf}} = K_0 \cdot \frac{2L_i \cdot P_{j1}}{L_{w1}} + P_{\text{fer}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.1)$$

K_0 Coefficient qui prend en considération le rapport des pertes dans le noyau statorique transmise à l'air à l'intérieur de la machine. Sa valeur est donnée suivant le tableau (T.7) Pour différentes paires de pôles.

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 IP54 : $K_0 = 1,07$ [W/mm² .C]

b) Calcul de la chute de température dans l'isolation de la partie d'encoche de l'enroulement statorique :

Elle est donnée avec la formule suivante :

$$t_{iso} = K \frac{K_0 P_{j1} \frac{2L_i}{L_{w1}}}{J_{fr} \cdot Z_1 L_i} \cdot \left(\frac{e_1}{e_{eq}} + \frac{b_{enc11} + b_{enc12}}{16 \cdot e_{eq}} \right) \quad [C^\circ] \quad (6.2)$$

Avec :

$$J_{fr} = 2 \cdot h_1 + b_{enc11} + \pi \cdot \frac{b_{enc12}}{2} \quad [mm] \quad (6.3)$$

J_{fr} ó Périmètre de l'encoche.

e_{eq} ó Coefficient équivalent de conductibilité thermique d'enroulement dans l'encoche du stator, pour la classe d'isolation F on a :

$$e_{eq} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ W/mm.C}^\circ.$$

e_{eq} ó Coefficient équivalent de conductibilité thermique du conducteur .il dépend du rapport $\frac{d_{nu}}{d_{iso}}$ qui est donné suivant la courbe de la fig7.2 (voir l'annexe).

e_1 ó Epaisseur de l'isolant de l'encoche du stator.

e) Valeur moyenne de l'augmentation de la température dans la surface extérieure des parties frontales sur la température de l'air à l'intérieur du moteur :

$$\Delta\theta_{fri} = \frac{K.K_0.P_{j1} \frac{2L_{f1}}{L_{w1}}}{2\pi.D_1.L_{fr1}\alpha_i} \quad [C^\circ] \quad (6.4)$$

Avec :

L_{f1} : Longueur moyenne de la partie frontale d'une demi spire. Elle est donnée par :

$$L_{f1} = (1,16 + 0,14.p) . b_{1moy} + 15 \quad [mm] \quad (6.5)$$

L_{fr1} : Longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique. elle est donnée par :

$$h_{axe} \geq 160 \quad L_{fr1} = (0,12 + 0,1.p) . b_{1moy} + 10 \quad [mm] \quad (6.6)$$

$$h_{axe} \leq 132 \quad L_{fr1} = (0,19 + 0,1.p) . b_{1moy} + 10 \quad [mm] \quad (6.7)$$

d) Calcul de la chute de température dans l'isolation des parties frontales de l'enroulement statorique :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$\theta_{isofr1} = \frac{K_0 P_{j1} \frac{2L_{f1}}{L_{w1}}}{2.J_{fr1}.Z_1 L_{f1}} . \left(\frac{h_1}{12} \right)_{eq} \quad [C^\circ] \quad (6.8)$$

e) Valeur moyenne de l'augmentation de la température de l'enroulement statorique sur la température de l'air à l'intérieur du moteur :

Il est donné par :

$$\theta'_1 = (\Delta\theta_{surf} + \theta_{iso}) . \frac{2.L_i}{L_{w1}} + (\Delta\theta_{fr1} + \theta_{isofr1}) . \frac{2.L_{f1}}{L_{w1}} \quad [C^\circ] \quad (6.9)$$

f) Surface conventionnelle de refroidissement du moteur :

Il est donné par :

$$S_{mot} = (\pi . D_{ext} + 8.n_p . h_p) . (L_i + 2L_{fr1}) \quad [mm^2] \quad (6.10)$$

n_p : Nombre d'ailettes extérieures pour refroidissement.

h_p : Hauteur d'ailette de la carcasse.

Le produit $n_p \cdot h_p$ est donné suivant la figure 7.7 et h_p suivant la figure 7.8 en fonction du diamètre extérieur, (voir annexe).

g) Pertes transmises dans l'air à l'intérieur du moteur :

Il est donné par :

$$\sum P_{air} = \sum P' - (1 - K)(P_{el\text{surf}} + P_{fer}) - 0,9 P_{mec} \quad [\text{Watts}] \quad (6.11)$$

$$P_{el\text{surf}} = K_0 \cdot P_{jl} \frac{2 \cdot L_i}{L_{w1}} \quad [\text{Watts}] \quad (6.12)$$

Avec :

$P_{el\text{surf}}$: Pertes électriques dans la partie frontale.

P_0 : Somme des pertes magnétiques ramenées dans l'air de l'intérieur du moteur.

h) Ecart moyen de température entre l'air à l'intérieur du moteur et la température du milieu réfrigérant :

Il est donné par :

$$\theta_{air} = \frac{\sum P_{air}}{S_{mot \cdot air}} \quad [C^\circ] \quad (6.13)$$

Avec :

α_{air} : Coefficient de réchauffement d'air, il est donné suivant la courbe 7.6 pour différent diamètre extérieur.

i) Ecart moyen de température de l'enroulement statorique et la température du milieu réfrigérant :

Il est donné par :

$$\theta_1 = \theta_1' + \theta_{air} \quad [C^\circ] \quad (6.14)$$

l enroulement statorique :

$$I_{enr1} = I_1 + 40 \quad [C^\circ] \quad (6.15)$$

II.2.2. Calcul du ventilateur :

II.2.2.1. Importance du problème :

a) Du point de vue électrique :

Le vieillissement des diélectriques est relatif a la température de service des machines .Or la durée de vie de ces machines dépend de l'état de l'isolation, de ce fait, pour pouvoir assurer la bonne tenue de l'isolation de l'enroulement ainsi que pour augmenter la durée de vie de ces machines, il faut avoir une source froide qui limite cette augmentation de température. Il est important encore de signaler que la température augmente les pertes, ce qui diminue le rendement.

b) Du point de vue mécanique :

Etant donné que les machines électriques soit 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 même pour tous les matériaux, ainsi que les parties de la machine ne sont pas à un instant donnée 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 des 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 entraînent en plus des contraintes mécaniques sur les isolants et possibilité de claquage.

c) Du point de vue économique :

Economiquement, toute machine surdimensionné aura moins de pertes et s'échauffera moins 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 de ces différents facteurs. Par contre une machine sous dimensionnés nécessitera une ventilation plus abondante, ce qui accroîtra d'autant les pertes mécaniques.

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

a) Dimensions du ventilateur :

- **Débit d'air du ventilateur :**

$$Q_b = 0,9 \cdot 10^{-3} M_t \sum P_{air} \cdot \frac{\sqrt{N_2 \cdot 10^{-3} \cdot D_{v2} \cdot 10^{-2}}}{\Delta\theta_{air}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (6.16)$$

Avec :

M_t Coefficient donné suivant la hauteur d'axe.

D_{v2} Diamètre extérieur du ventilateur en [mm].

$$D_{v2} = (1,6 \div 1,8) \cdot h_{axe} \quad (6.17)$$

- **Vitesse linéaire périphérique des ailettes :**

$$V_e = \pi \cdot D_{v2} \frac{N_2}{60 \cdot 10^3} \quad [\text{m/s}] \quad (6.18)$$

- **Surface transversale du canal entre les palettes à la sortie d'air :**

$$S_p = 2 \cdot 10^6 \frac{Q_b}{0,45 \cdot V_e} \quad [\text{mm}^2] \quad (6.19)$$

b) Résistance aérodynamique de la chaîne de ventilation :

Donnée par une forme empirique, vu la complexité de son calcul :

$$Z = 12,3 (N_2 \cdot 10^{-3})^2 (D_{ext} \cdot 10^{-2}) Q_b^2 \quad [\text{s}^2/\text{m}^6] \quad (6.20)$$

[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

le δ ailette :

$$V_1 = \sqrt{V_e - 1,85 \cdot Z \cdot Q_b^2} \quad [\text{m/s}] \quad (6.21)$$

- **Calcul du nombre d'ailette :**

$$N_p = \frac{6 \cdot D_{v2}}{D_{v2} - D_{v1}} \quad (6.22)$$

- **Surface d'une ailette :**

$$S_{bp} = S_p \cdot \frac{D_{v2} - D_{v1}}{2\pi \cdot D_{v2}} \quad [\text{mm}^2] \quad (6.23)$$

DIMENSIONNEMENT DU STATOR

La puissance électromagnétique: p_e

k_e : Facteur de majoration $k_e := 0.975$
 P_n : Puissance nominale $P_n := 3$ (Kw)
 $\cos(\phi_n)$: Facteur de puissance $\cos(\phi_n) := 0.83$
 η_n : Le rendement nominal $\eta_n := 0.87$
 $\phi_n := 0.54$ $p_e := \frac{k_e \cdot P_n}{\eta_n \cdot \cos(\phi_n)}$ $p_e = 4.051$ (Kw)
 $m_1 := 3$

α_i : Coefficient de recouvrement polaire $\alpha_i := 0.64$
 k_f : Facteur de la forme de la courbe d'induction $k_f := 1.11$
 N : vitesse de rotation de synchronisme $N := 1500$ $\left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}}\right)$
 D_1 : Diamètre intérieur du stator $D_1 := 104$ (mm)
 B_δ : L'induction dans l'entrefer $B_\delta := 0.92$ (T)

Le pas polaire en nombre d'encoches:

p : Le nombre de paire de pôles $p := 2$
 Z_1 : Le nombre d'encoches

$\left(\frac{Z_1}{\tau_p}\right) := 36$

$Z_1 = 36$

$\tau_p := \frac{Z_1}{2 \cdot p}$ $\tau_p = 9$ encoches

Le pas polaire en mm:

$\tau_{p1} := \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p}$ $\tau_{p1} = 81.681$ (mm)

$$t1 := \frac{\pi \cdot D1}{Z1}$$

$$t1 = 9.076 \text{ (mm)}$$

Le nombre d'encoches par pôle et par phase:

$$q1 := \frac{Z1}{2 \cdot p \cdot m1}$$

$$q1 = 3$$

Ken1 : Le facteur de bobinage de l'enroulement statorique

$$kd1 := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m1}\right)}{q1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m1 \cdot q1}\right)}$$

$$kd1 = 0.96$$

Le pas d'enroulement :

$\varepsilon :=$

$$\varepsilon = 0$$

$$y1 := \frac{Z1}{2 \cdot p} - \varepsilon$$

$$y1 = 9$$

$$\beta := \frac{y1}{\tau p}$$

$$\beta = 1$$

$$kr1 := \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right)$$

$$kr1 = 1$$

$$Ken1 := kd1 \cdot kr1$$

$$Ken1 = 0.96$$

La longueur virtuelle de l'induit: Li

A1 : La charge linéaire

$A1 :=$

$$A1 = 2 \times 10^4 \left(\frac{A}{m}\right)$$

Elaboration d'un programme de calcul

$$L_i := \frac{6.1 \cdot 10^{-3} \cdot p_e}{\alpha_i \cdot k_f \cdot N \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B \delta \cdot K_{en1}}$$

$$L_i := 130.472 \quad (\text{mm})$$

Le coefficient de longueur:

$$\lambda := \frac{L_i}{D_1}$$

$$\lambda = 1.255$$

L'angle électrique séparant deux encoches successives:

$$\gamma := \frac{p \cdot 360}{Z_1}$$

$$\gamma = 20$$

La zone de phase:

$$\alpha := q_1 \cdot \gamma$$

$$\alpha = 60$$

Le courant nominal dans une phase:

U_{n1} : La tension simple

U_{n1}	:=	380
I_{n1}		
U_{en1}		

$$U_{n1} = 380 \quad (\text{V})$$

$$I_{n1} := \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \cos(\phi_n) \cdot \eta_n}$$

$$I_{n1} = 3.644 \quad (\text{A})$$

Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche:

a_1 : Le nombre de voies parallèles $a_1 := 1$

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

$$U_{en1} = 49.807$$

$$\text{round}(U_{en1}) = 50$$

Elaboration d'un programme de calcul

Le nombre de spires d'une voie parallèle:

$$W1 := \frac{p \cdot q1 \cdot \text{round}(Uen1)}{a1}$$

$$W1 = 300 \text{ Spires}$$

La fréquence:

$$f1 := \frac{N \cdot p}{60}$$

$$f1 = 50 \text{ (Hz)}$$

La section effective:

$$j1 := 7.5 \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$\text{Seff1} := \frac{I_{n1}}{a1 \cdot j1}$$

$$\text{Seff1} = 0.486 \text{ (mm}^2\text{)}$$

La section élémentaire:

$$Nel := 2$$

$$\text{Snor1} := (0.2463) \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$\text{diso} := 0.619 \text{ (mm)}$$

$$\text{dnu} := 0.56 \text{ (mm)}$$

$$\text{Selt1} := \frac{\text{Seff1}}{Nel}$$

$$\text{Selt1} = 0.243 \text{ (mm}^2\text{)}$$

La largeur de la dent:

$$\text{Bz1max} := 1.9 \text{ (T)} \quad (\text{kfer}) := 0.97$$

$$\text{bz1} := \frac{t1 \cdot B\delta}{\text{kfer} \cdot \text{Bz1max}}$$

$$\text{bz1} = 4.53 \text{ (mm)}$$

La hauteur du dos statorique:

$$\text{Bc1} := 1.65$$

$$\text{hc1} := \frac{0.5 \cdot \alpha i \cdot \tau p1 \cdot B\delta}{\text{kfer} \cdot \text{Bc1}}$$

$$\text{hc1} = 15.025 \text{ (mm)}$$

La hauteur de la dent:

$$\text{Dext} := 168 \text{ (mm)}$$

$$\text{hz1} := 0.5 \cdot (\text{Dext} - D1) - \text{hc1}$$

$$\text{hz1} = 16.975 \text{ (mm)}$$

La largeur minimale de l'encoche:

$$benc_{11} := -bz_1 + \frac{\pi \cdot (D1 + 0.2hz_1)}{Z1} \qquad benc_{11} = 4.842 \quad (\text{mm})$$

La largeur maximale de l'encoche:

$$hf_1 := 0.8 \div 1.2 \qquad hf_1 = 0.8 \quad (\text{mm})$$

$$benc_{12} := -bz_1 + \frac{\pi \cdot (D1 + 2 \cdot hz_1)}{Z1} \qquad benc_{12} = 7.508 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de la clavette:

$$hk_1 := 0.6 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de l'encoche:

$$henc_1 := hz_1 - \left(hk_1 + hf_1 + \frac{benc_{12}}{2} \right) \qquad henc_1 = 11.955 \quad (\text{mm})$$

La section de l'encoche:

$$Sencaiso_1 := 0.5(benc_{11} + benc_{12}) \cdot henc_1 + \pi \cdot \frac{(benc_{11})^2}{4 \cdot 2} \qquad Sencaiso_1 := 66.24 \quad (\text{mm}^2)$$

La section occupée par les conducteurs:

$$e_1 := 0.37 \div 0.4 \qquad e_1 := 0.4 \quad (\text{mm})$$

$$Siso := \left(benc_{11} + 2henc_1 + \pi \cdot \frac{benc_{12}}{2} \right) \cdot e_1 \qquad Siso = 16.218 \quad (\text{mm}^2)$$

$$Senc_1 := Sencaiso_1 - Siso \qquad Senc_1 = 50.022 \quad (\text{mm}^2)$$

Coefficient de remplissage de l'encoche:

$$kre_1 := \frac{Nel \cdot Uen_1 \cdot diso^2}{Senc_1} \qquad kre_1 = 0.763$$

Flux sous un pôle:

$$\phi := \frac{ke \cdot Un_1}{4 \cdot kf \cdot W1 \cdot f1 \cdot Ken_1} \qquad \phi = 5.796 \times 10^{-3} \quad (\text{Wb})$$

DIMENSIONNEMENT DU ROTOR

Nombre d'encoche rotorique:

Z2 :=

Z2 = 28

Diamètre extérieur du rotor:

$\delta := 0.4 \quad (\text{mm})$

D2 := D1 - 2· δ

D2 = 103.2 (mm)

Pas dentaire:

$t2 := \frac{\pi \cdot D2}{Z2}$

t2 = 11.579 (mm)

Le courant dans la barre:

$I2 := 1.11 \cdot In1 \cdot \frac{6 \cdot W1 \cdot \cos(\phi n) \cdot Ken1}{Z2}$

I2 = 207.163 (A)

La hauteur de la culasse rotorique:

Bc2 := 2 (T)

$\tau p2 := \frac{\pi \cdot D2}{2 \cdot p}$

$\tau p2 = 81.053 \quad (\text{mm})$

$hc2 := \frac{0.5 \cdot \alpha i \cdot \tau p2 \cdot B\delta}{kfer \cdot Bc2}$

hc2 = 12.3 (mm)

La hauteur de la dent: hz2

Dint2 := 37 (mm)

hz2 := 0.5 · (D2 - Dint2) - hc2

hz2 = 20.8 (mm)

Calcul de l'encoche rotorique:

La largeur de l'encoche:

Bz2max := 1.75 (T)

$bz2 := \frac{t2 \cdot B\delta}{kfer \cdot Bz2max}$

bz2 = 6.276 (mm)

Diamètre maximal de l'encoche:

hf2 := 0.7 (mm)

$$d_{21} := \frac{\pi \cdot (D2 - 2 \cdot hf2) - Z2 \cdot bz2}{\pi + Z2}$$

$$d_{21} = 4.627 \quad (\text{mm})$$

Diamètre minimale de l'encoche:

$$d_{22} := \frac{\pi \cdot (D2 - 2 \cdot hz2) - Z2 \cdot bz2}{Z2 - \pi}$$

$$d_{22} = 0.716 \quad (\text{mm})$$

La cage rotorique:

Section de la barre:

$$h_2 := hz2 - hf2 - 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22})$$

$$h_2 = 17.428 \quad (\text{mm})$$

$$henc2 := h_2 + 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22})$$

$$henc2 = 20.1 \quad (\text{mm})$$

$$S_b := 0.125 \cdot \left[(d_{21})^2 + (d_{22})^2 \right] \cdot \pi + 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \cdot h_2$$

$$S_b = 55.174 \quad (\text{mm}^2)$$

Densité du courant:

$$j_b := \frac{I_2}{S_b}$$

$$j_b = 3.755 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

Dimensionnement de l'anneau de court circuit:

La hauteur de l'anneau:

$$han := (1.1 \div 1.25) \cdot hz2 \quad (\text{mm})$$

$$han := 1.13 \cdot hz2$$

$$han = 23.504 \quad (\text{mm})$$

La section de l'anneau:

$$San := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z2 \cdot S_b}{2 \cdot p}$$

$$San := 0.35 \cdot \frac{Z2 \cdot S_b}{2 \cdot p}$$

$$San = 135.177 \quad (\text{mm}^2)$$

La largeur de l'anneau:

$$ban := \frac{San}{han}$$

$$ban = 5.751 \quad (\text{mm})$$

Diamètre moyen intérieur de l'anneau:

$$Dan := D2 - ban$$

$$Dan = 79.696 \quad (\text{mm})$$

CALCUL DU CIRCUIT MAGNETIQUE

A/ Calcul du circuit magnétique statorique:

Induction dans l'entrefer du stator:

Automatisation du circuit magnétique (dent statorique)

$$B_{z1} := \frac{B\delta \cdot t1}{k_{fer} \cdot b_{z1}} \quad B_{z1} = 1.9 \quad (T)$$

$$H'(B_{z1}) = 2.07 \times 10^3 \left(\frac{A}{m} \right)$$

Fmm dans la dent du stator:

$$F_{z1} := H'(B_{z1}) \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} \quad F_{z1} = 35.139 \quad (V)$$

La longueur moyenne des lignes dans la culasse statorique:

$$L_{c1} := \frac{\pi \cdot (D_{ext} - h_{c1})}{2 \cdot p} \quad L_{c1} = 120.147 \quad (mm)$$

Fmm dans la culasse:

Automatisation du circuit magnétique (culasse statorique)

$$B_{c1} := 1.65 \quad (T)$$

$$H''(B_{c1}) = 946 \left(\frac{A}{m} \right)$$

$$F_{c1} := H''(B_{c1}) \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad F_{c1} = 113.659 \quad (A)$$

L'entrefer:

Fmm dans l'entrefer:

$$b_{f1} := 2.8 \quad (mm)$$

$$k_{\delta 1} := 1 + \frac{b_{f1}}{t1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t1}{b_{f1}}} \quad k_{\delta 1} = 1.219$$

Elaboration d'un programme de calcul

$$bf2 := 2 \cdot disc \quad (\text{mm})$$

$$bf2 := 1.238 \quad (\text{mm})$$

$$k\delta 2 := 1 + \frac{bf2}{t2 - bf2 + \frac{5 \cdot \delta \cdot t2}{bf2}}$$

$$k\delta 2 = 1.043$$

$$k\delta := k\delta 1 \cdot k\delta 2$$

$$k\delta = 1.271$$

$$F\delta := 0.8 \cdot B\delta \cdot k\delta \cdot \delta \cdot 10^3$$

$$F\delta = 374.311 \quad (\text{A})$$

Circuit magnétique rotorique:

Induction dans la dent:

Automatisation du circuit magnétique (dent rotorique)

$$Bz2 := \frac{B\delta \cdot t2}{kfer \cdot bz2}$$

$$Bz2 = 1.75 \quad (\text{T})$$

$$H1'(Bz2) = 1.33 \times 10^3 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

Fmm dans la dent:

$$Fz2 := H1'(Bz2) \cdot (hz2 - 0.4 \cdot d22) \cdot 10^{-3}$$

$$Fz2 = 27.283 \quad (\text{A})$$

La longueur moyenne des lignes dans la culasse rotorique:

$$Lc2 := (D2 - 2 \cdot hz2 - hc2) \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot p} \right) + hc2$$

$$Lc2 = 51.02 \quad (\text{mm})$$

Fmm dans la culasse rotorique:

Automatisation du circuit magnétique (culasse rotorique)

$$Bc2 := 2 \quad (\text{T})$$

$$H2'(Bc2) = 5.77 \times 10^3 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$Fc2 := H2'(Bc2) \cdot Lc2 \cdot 10^{-3}$$

$$Fc2 = 294.386 \quad (\text{A})$$

Fmm totale par paire de pole:

$$F := 2 \cdot (F\delta + Fz1 + Fz2) + Fc1 + Fc2 \quad F = 1.282 \times 10^3 \quad (\text{A})$$

Coefficient de saturation des dents:

$$k_{\mu z} := \frac{F\delta + Fz1 + Fz2}{F\delta} \quad k_{\mu z} = 1.167$$

Coefficient de saturation de la machine:

$$k_{\mu} := \frac{F}{2 \cdot F\delta} \quad k_{\mu} = 1.712$$

Le courant magnétisant:

$$I_{\mu} := \frac{p \cdot F}{0.9 \cdot m1 \cdot W1 \cdot Ken1} \quad I_{\mu} = 3.297 \quad (\text{A})$$

La réactance de magnétisation:

$$X_m := \frac{k_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad X_m = 112.383 \quad (\text{ohm})$$

Coefficient de dispersion magnétique du stator:

$$\lambda_1 := 3.478$$

$$X_1 := \frac{1.58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \quad X_1 = 5.377 \quad (\text{ohm})$$

$$\sigma_{\mu} := \frac{X_1}{X_m} \quad \sigma_{\mu} = 0.048$$

Force électromagnétique à vide:

$$E_0 := \frac{U_{n1}}{1 + \sigma_{\mu}} \quad E_0 = 362.648 \quad (\text{V})$$

Paramètres du stator

Résistance active:

$$T := 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rho_{cu} := 0.0172 \cdot 10^{-6} \text{ (ohm}\cdot\text{m)} \quad y1_{moy} := 9$$

$$b1_{moy} := \frac{\pi \cdot (D1 + hz1) \cdot y1_{moy}}{Z1} \quad b1_{moy} = 95.014 \text{ (mm)}$$

$$Lf1 := (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b1_{moy} + 15 \quad Lf1 = 151.82 \text{ (mm)}$$

$$Lw1 := 2 \cdot (Li + Lf1) \quad Lw1 = 564.584 \text{ (mm)}$$

$$R1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a1 \cdot Nel \cdot Selt1} \quad R1 = 5.995 \text{ (ohm)}$$

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

$$R1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a1 \cdot Nel \cdot Selt1} \quad R1 := 4.5 \text{ (ohm)}$$

La réactance de fuite frontale:

$$KB1 := 1 \quad KB2 := 1 \quad Q1 := \frac{Z2}{p} \quad Q1 = 14$$

$$Kdd1 := 0.93 \quad Krr1 := 0.014$$

$$\lambda_{1f} := 0.34 \cdot \frac{q1 \cdot (Lf1 - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau p1)}{Li} \quad \lambda_{1f} = 0.778$$

$$X_{1f} := 1.58 \cdot f1 \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda_{1f}}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X_{1f} = 1.203 \text{ (ohm)}$$

La réactance de fuite différentielle:

$$Kr1 := 1 - \left(\frac{0.033 \cdot b f1^2}{\delta \cdot t1} \right) \quad Kr1 = 0.929$$

Elaboration d'un programme de calcul

$$\lambda_{1d} := \frac{0.9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{en1})^2 \cdot K_{rr1} \cdot (K_{dd1}^2 \cdot K_{r1})}{k \delta \cdot \delta}$$

$$\lambda_{1d} = 1.497$$

$$X_{1d} := 1.58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_{1d}}{p \cdot q_1 \cdot 10^8}$$

$$X_{1d} = 2.315 \quad (\text{ohm})$$

Réactance de fuite d'encoche:

$$h_1 := h_{enc1}$$

$$h_{11} := 1$$

$$h_1 = 11.955$$

$$\lambda_{enc1} := \frac{h_1 \cdot K_{B1}}{3 \cdot b_{enc11}} + \left(\frac{h_{11}}{b_{enc11}} + \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc11} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{B2}$$

$$\lambda_{enc1} = 1.44$$

$$X_{enc1} := 1.58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_{enc1}}{p \cdot q_1 \cdot 10^8}$$

$$X_{enc1} = 2.227 \quad (\text{ohm})$$

La réactance totale:

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

$$\lambda_1 = 3.716$$

$$X_1 := 1.58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8}$$

$$X_1 = 5.377 \quad (\text{ohm})$$

PARAMETRES DU ROTOR

Résistance active de la barre:

$$T := 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rho_{AL}(T) := 2.8 \cdot 10^{-8} \text{ (Ohm}\cdot\text{m)} \quad K_{dep} := 0.915 \quad L2 := Li$$

$$R_b := \rho_{AL}(T) \cdot \frac{K_{dep} \cdot L2 \cdot 10^3}{S_b} \quad R_b = 6.058 \times 10^{-5} \text{ (ohm)}$$

Résistance de l'anneau:

$$R_{an} := \frac{\rho_{AL}(T) \cdot 2 \cdot \lambda \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z2 \cdot S_{an}} \quad R_{an} = 1.479 \times 10^{-6} \text{ (ohm)}$$

Résistance de l'anneau ramenée a la barre:

$$K_{red} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{Z2} \quad K_{red} = 0.449$$

$$R_{anramb} := \frac{R_{an}}{K_{red}^2} \quad R_{anramb} = 7.344 \times 10^{-6} \text{ (ohm)}$$

Résistance de l'anneau ramenée au stator:

$$\beta_{ob} := \frac{t1}{t2} \quad \beta_{ob} = 0.784$$

$$\alpha_{ob} := \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \beta_{ob}}{Z2} \quad \alpha_{ob} = 0.352$$

$$K_{ob} := \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \quad K_{ob} = 0.995$$

$$M := \left(\frac{4 \cdot m1}{Z2}\right) \cdot \left(\frac{W1 \cdot Ken1}{K_{ob}}\right)^2 \quad M = 3.59 \times 10^4$$

$$R_{anrams} := M \cdot R_{anraml} \quad R_{anrams} = 0.264 \text{ (ohm)}$$

Résistance active d'une phase rotorique:

$$R2 := Rb + Ranraml \quad R2 = 6.793 \times 10^{-5} \text{ (ohm)}$$

Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator:

$$R2ram := M \cdot R2 \quad R2ram = 2.439 \text{ (ohm)}$$

Réactances de dispersions et perméances du rotor:

$$\lambda_{ob} := \frac{t2 \cdot \beta_{ob}}{9.5 \cdot \delta \cdot k\delta \cdot k\mu} \quad \lambda_{ob} = 1.097$$

$$I_{an} := \frac{I_2}{K_{red}} \quad I_{an} = 461.595 \text{ (A)}$$

$$J_{an} := \frac{I_{an}}{S_{an}} \quad J_{an} = 3.415 \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$\lambda_{2f} := \frac{2.3 \cdot D_{an}}{Z2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log \left[\frac{4.7 \cdot D_{an}}{2 \cdot (h_{an} + b_{an})} \right] \quad \lambda_{2f} = 0.201$$

$$\psi := 1$$

$$C\lambda := \psi \cdot \left[0.66 - \left(\frac{bf2}{2 \cdot d_{21}} \right) + \left(\frac{1 - \pi \cdot d_{21}}{8 \cdot S_b} \right)^2 \cdot \left(\frac{h_2 + 0.4 \cdot d_{22}}{3 \cdot d_{21}} \right) \right] \quad C\lambda = 0.527$$

$$\lambda_{2enc} := C\lambda + \frac{hf2}{bf2} \quad \lambda_{2enc} = 1.093$$

$$K_{dd2} := \frac{9.15}{100 \cdot \left(\frac{Z2}{6 \cdot p} \right)^2} \quad K_{dd2} = 0.017$$

Elaboration d'un programme de calcul

$$\lambda_{2d} := \frac{0.9 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot p}\right)^2 \cdot K_{dd2}}{\delta \cdot k_{\delta}}$$

$$\lambda_{2d} = 1.875$$

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

$$\lambda_2 = 4.266$$

$$X_2 := 7.9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9}$$

$$X_2 = 2.199 \times 10^{-4} \quad (\text{ohm})$$

Réactance du rotor ramenée au stator:

$$X_{2ram} := M \cdot X_2$$

$$X_{2ram} = 7.893 \quad (\text{ohm})$$

Paramètre au démarrage:

Profondeur de pénétration:

$$\phi_1 := 0.44 \quad g_d := 1$$

$$h_b := h_{enc2}$$

$$h_{pp} := \frac{h_b}{1 + \phi_1}$$

$$h_{pp} = 13.958$$

$$\xi_1 := 0.064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g_d}$$

$$\xi_1 = 1.286$$

La largeur à limite de pénétration:

$$b_{pp} := d_{21} - \left[\left(\frac{d_{21} - d_{22}}{h_2} \right) \cdot \left(h_{pp} - \frac{d_{21}}{2} \right) \right] \quad b_{pp} = 2.014 \quad (\text{mm})$$

Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage:

$$S_{bdem} := \left[\frac{\pi \cdot (d_{21})^2}{8} \right] + \left[0.5 \cdot (d_{21} + b_{pp}) \cdot h_{pp} - 0.5 \cdot d_{21} \right]$$

$$S_{bdem} = 52.446 \quad (\text{mm}^2)$$

Résistance de la barre au démarrage:

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

$$K_{dep} = 1.052$$

$$R_{bdem} := R_b \cdot K_{dep}$$

$$R_{bdem} = 6.374 \times 10^{-5} \quad (\text{ohm})$$

Résistance de la cage au démarrage:

$$R_{2dem} := R_{anramb} + R_{bdem} \qquad R_{2dem} = 7.108 \times 10^{-5} \quad (\text{ohm})$$

Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator:

$$R_{2demram} := M \cdot (R_{anramb} + R_{bdem}) \qquad R_{2demram} = 2.552 \quad (\text{ohm})$$

Réactance de fuite au démarrage:

$$\psi_1 := 1$$

$$C_{\lambda 1} := C_{\lambda} \cdot \psi_1 \qquad C_{\lambda} = 0.527$$

$$\lambda_{2encdem} := C_{\lambda 1} + \frac{hf_2}{bf_2} \qquad \lambda_{2encdem} = 1.093$$

$$\lambda_{2dem} := \lambda_{2encdem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \qquad \lambda_{2dem} = 4.266$$

$$X_{2dem} := 7.9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_{2dem} \cdot 10^{-9} \qquad X_{2dem} = 2.199 \times 10^{-4} \quad (\text{ohm})$$

Réactance de fuite au démarrage ramenée au stator:

$$X_{2demram} := M \cdot X_{2dem} \qquad X_{2demram} = 7.893 \quad (\text{ohm})$$

CALCUL DES PERTES ET DU RENDEMENT

Pertes principales dans fer:

Pertes dans les dents:

$$p_1 := 2.5 \quad (w \cdot Kg^{-1})$$

$$G_{z1} := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot k_{fer} \cdot [hz_1 \cdot \pi \cdot (D_1 + hz_1) - Senc_1 \cdot Z_1] \quad G_{z1} = 4.591 \quad (Kg)$$

$$pf_{z1} := 1.7 \cdot p_1 \cdot G_{z1} \cdot Bz_1^2 \quad pf_{z1} = 70.437 \quad (W)$$

Pertes dans la culasse statorique:

$$G_{c1} := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot L_i \cdot k_{fer} \cdot hc_1 \cdot \pi \cdot (D_{ext} - hc_1) \quad G_{c1} = 7.128 \quad (Kg)$$

$$pfc_1 := 1.7 \cdot p_1 \cdot G_{c1} \cdot Bc_1^2 \quad pfc_1 = 82.474 \quad (W)$$

$$P_{fer} := pfc_1 + pf_{z1} \quad P_{fer} = 152.911 \quad (W)$$

Pertes électriques dans le cuivre et l'aluminium:

Pertes joules statorique:

$$P_{j1} := m_1 \cdot R_1 \cdot (I_{n1})^2 \quad P_{j1} = 179.297 \quad (W)$$

Pertes joules rotorique:

$$m_2 := 28$$

$$P_{j2} := m_2 \cdot R_2 \cdot (I_2)^2 \quad P_{j2} = 81.627 \quad (W)$$

Perte mécanique:

$$\text{Pour } 2p = 2 \quad K_t := 1.3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3})$$

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

$$P_{mec} := K_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4 \quad P_{mec} = 17.923 \quad (W)$$

Pertes supplémentaires:

$$P_{\text{sup}} := 0.005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad P_{\text{sup}} = 17.241 \quad (\text{W})$$

Pertes totales:

$$P_t := P_{\text{fer}} + P_{j1} + P_{j2} + P_{\text{mec}} + P_{\text{sup}} \quad P_t = 449 \quad (\text{W})$$

Rendement de la machine:

$$\eta := \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_t} \quad \eta = 0.87$$

Calcul de la résistance de magnétisation:

$$U_n := 380 \quad (\text{V})$$

$$P_{a10} := R_1 \cdot m_1 \cdot I_\mu^2 \quad P_{a10} = 146.728 \quad (\text{W})$$

$$I_{0a} := \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_n} \quad I_{0a} = 0.279 \quad (\text{A})$$

$$R_m := \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{0a}} \quad R_m = 1.33 \times 10^3 \quad (\text{ohm})$$

CALCUL DES PERFORMANCES DU MOTEUR

Caractéristique de fonctionnement du moteur:

La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire:

$$P_n := 3000 \quad (\text{W})$$

$$P'_2 := P_n + P_{\text{sup}} + P_{\text{mec}} \quad P'_2 = 3.035 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

Le glissement:

$$s := \left(\frac{3 \cdot U_n^2}{2 \cdot P'_2} \right) - R_1 \quad A = 66.864$$

$$R' := R_{2\text{ram}} \cdot \left[\left[\left(\frac{R_1}{R_{2\text{ram}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{X_{2\text{ram}}}{X_m} \right) \right]^2 \right] + \left[\left(\frac{X_1}{R_{2\text{ram}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{X_{2\text{ram}}}{X_m} \right) + \frac{X_{2\text{ram}}}{R_{2\text{ram}}} \right]^2$$

$$R' = 90.357 \quad (\text{ohm})$$

Elaboration d'un programme de calcul

$$B := 2 \cdot A + R'$$

$$B = 224.084$$

$$C1 := 1 + \frac{X1}{Xm}$$

$$C1 = 1.051$$

$$g := \frac{A - \sqrt{A^2 - C1^2 \cdot R2ram \cdot B}}{B}$$

$$g = 0.021$$

L'inductance équivalente:

$$R2eq := C1 \cdot R1 + \frac{C1^2 \cdot R2ram}{g}$$

$$R2eq = 133.778 \text{ (ohm)}$$

$$X2eq := C1 \cdot X1 + C1^2 \cdot X2ram$$

$$X2eq = 14.759 \text{ (ohm)}$$

$$Z2eq := \sqrt{R2eq^2 + X2eq^2}$$

$$Z2eq = 134.59 \text{ (ohm)}$$

Calcul du courant secondaire:

$$I2 := \frac{Un}{Z2eq}$$

$$I2 = 2.823 \text{ (A)}$$

Le facteur de puissance rotorique:

$$\cos\phi'2 := \frac{R2eq}{Z2eq}$$

$$\cos\phi'2 = 0.994$$

$$I''2 := \frac{Un}{Z2eq}$$

$$I''2 = 2.823 \text{ (A)}$$

$$I'2 := C1 \cdot I''2$$

$$I'2 = 2.968 \text{ (A)}$$

$$I0a := \frac{Pa10 + Pfer}{m1 \cdot Un}$$

$$I0a = 0.263 \text{ (A)}$$

Le courant magnétisant:

$$p := 2$$

$$I0r := \frac{p \cdot F}{0.9 \cdot m1 \cdot W1 \cdot Ken1}$$

$$I0r = 3.297 \text{ (A)}$$

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$$

$$I_0 = 3.307 \quad (\text{A})$$

Le courant absorbé:

$$\sin^2 \phi := \frac{X_{2eq}^2}{Z_{2eq}^2}$$

$$\sin^2 \phi = 0.11$$

$$I''_{2r} := I''_2 \cdot \sin \phi$$

$$I''_{2r} = 0.31 \quad (\text{A})$$

$$I''_{2a} := I''_2 \cdot \cos \phi$$

$$I''_{2a} = 2.806 \quad (\text{A})$$

$$I_{1r} := I_{0r} + I''_{2r}$$

$$I_{1r} = 3.606 \quad (\text{A})$$

$$I_{1a} := I_{0a} + I''_{2a}$$

$$I_{1a} = 3.069 \quad (\text{A})$$

$$I_1 := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$$

$$I_1 = 4.736 \quad (\text{A})$$

Le facteur de puissance de la machine:

$$\cos^2 \phi := \frac{I_{1a}}{I_1}$$

$$\cos^2 \phi = 0.65$$

Puissance absorbée par le moteur:

$$P_a := m_1 \cdot U_n \cdot I_{1a}$$

$$P_a = 3.499 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

Vitesse de rotation du moteur:

$$N_2 := N \cdot (1 - g)$$

$$N_2 = 1.469 \times 10^3 \quad \left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$$

Le couple utile sur l'arbre du moteur:

$$P_n := 3 \quad (\text{KW})$$

$$C_u := \frac{9.55 \cdot P_n \cdot 10^3}{N_2}$$

$$C_u = 19.507 \quad (\text{Nm})$$

Résistance équivalente au démarrage:

$$R_{eqdem} := C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot R_{2demran}$$

$$R_{eqdem} = 7.549 \quad (\text{ohm})$$

Réactance équivalente au démarrage:

$$K_v := 0.0825$$

$$\lambda_{enc1var} := \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc11} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_B2 \quad \lambda_{enc1var} = 0.41$$

$$\lambda_{1var} := \lambda_{enc1var} + \lambda_{1d} \quad \lambda_{1var} = 1.908$$

$$\lambda_{enc2var} := \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad \lambda_{enc2var} = 0.565$$

$$\lambda_{2var} := \lambda_{enc2var} + \lambda_{2d} \quad \lambda_{2var} = 2.44$$

$$X_{var} := \frac{C_1 \cdot X_1 \cdot \lambda_{1var}}{\lambda_1} + \frac{C_1^2 \cdot X_{2ram} \cdot \lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad X_{var} = 8.089 \quad (\text{ohm})$$

$$X_{const} := \frac{C_1 \cdot X_1 \cdot (\lambda_1 - \lambda_{1var})}{\lambda_1} + \frac{C_1^2 \cdot X_{2demram} \cdot (\lambda_{2d} - \lambda_{2var})}{\lambda_{2d}} \quad X_{const} = 0.308 \quad (\text{ohm})$$

$$X_{eqdem} := X_{const} + K_v \cdot X_{var} \quad X_{eqdem} = 0.975 \quad (\text{ohm})$$

Capacité de surcharge:

$$g_{nom} := g \quad g_{cr} := C_1 \cdot \frac{R_{2ram}}{X_1 + C_1 \cdot X_{2ram}} \quad g_{cr} = 0.183$$

$$R_{cr} := 2 \cdot R_1 \cdot \frac{g_{cr}}{R_{2ram} \cdot C_1} \quad R_{cr} = 0.641 \quad (\text{ohm})$$

$$g_{Cmax} := \frac{\left(C_1^2 \cdot R_{2demram} \right)^2}{\sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 \right)^2 + X_{eqdem}^2}} \quad C_{max} := \frac{p \cdot m_1 \cdot U_n^2 \cdot \frac{R_{2demram}}{g_{Cmax}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2demram}}{g_{Cmax}} \right)^2 + X_{eqdem}^2 \right]}$$

$$C_{max} = 130.555 \quad (\text{Nm})$$

$$C_s := \frac{C_{max}}{C_u} \quad C_s = 6.693$$

$$I_{ld} := \frac{U_n}{\sqrt{R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2}}$$

$$I_{ld} = 49.92 \quad (A)$$

$$\frac{I_{ld}}{I_l} = 10.541$$

Le couple de démarrage:

$$C_d := \frac{p \cdot m_1 \cdot U_n^2 \cdot R_{2demram}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (R_{eqdem}^2 + X_{eqdem}^2)}$$

$$C_d = 121.451 \quad (Nm)$$

$$\frac{C_d}{C_u} = 6.226$$

PARTIE II

CALCUL DE L'ECHAUFFEMENT DE LA MACHINE (CALCUL THERMIQUE)

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

$$K0 := 1.07 \qquad K := 0.22 \qquad \alpha 1 := 15 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta\theta_{surf} := K \cdot \frac{K0 \cdot \frac{2 \cdot Li \cdot Pj1}{Lw1} + Pfer}{\pi \cdot D1 \cdot Li \cdot \alpha 1} \qquad \Delta\theta_{surf} = 8.312 \quad ^\circ\text{C}$$

Calcul de la chute de température dans l'isolation de la partie d'encoche de l'enroulement statorique:

$$jfr := 2 \cdot h1 + benc_{11} + \pi \cdot \frac{benc_{12}}{2} \qquad jfr = 40.544 \qquad \frac{diso}{dnu} = 1.105$$

$$\Gamma_{eq} \equiv 16 \cdot 10^{-5} \qquad \Gamma_{eq1} \equiv 18 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta\theta_{iso} := \left(\frac{K0 \cdot Pj1 \cdot \frac{2 \cdot Li}{Lw1}}{jfr \cdot Z1 \cdot Li} \right) \cdot \left(\frac{e1}{\Gamma_{eq}} + \frac{benc_{11} + benc_{12}}{16 \cdot \Gamma_{eq1}} \right) \qquad \Delta\theta_{iso} = 1.364 \quad ^\circ\text{C}$$

Calcul de l'augmentation de température dans la surface extérieure des parties frontales sur la température de l'air à l'intérieur du moteur:

$$haxe \leq 132 \qquad Lfr1 := (0.19 + 0.1 \cdot p) \cdot b1moy + 10 \qquad Lfr1 = 47.055 \quad (\text{mm})$$

$$\Delta\theta_{fr1} := \frac{K \cdot K0 \cdot Pj1 \cdot \frac{2 \cdot Lf1}{Lw1}}{2 \cdot \pi \cdot D1 \cdot Lfr1 \cdot \alpha 1} \qquad \Delta\theta_{fr1} = 4.921 \quad ^\circ\text{C}$$

Calcul de la chute de température dans l'isolation des parties frontales de l'enroulement statorique:

$$\Delta\theta_{\text{isofr1}} := \left(\frac{K0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot L_{f1}}{L_{w1}}}{2 \cdot j_{fr} \cdot L_{f1} \cdot Z1} \right) \cdot \left(\frac{h1}{12 \cdot \Gamma_{eq1}} \right) \quad \Delta\theta_{\text{isofr1}} = 0.129 \quad ^\circ\text{C}$$

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

$$\Delta\theta'1 := (\Delta\theta_{\text{surf}} + \Delta\theta_{\text{iso}}) \cdot \frac{2 \cdot L_i}{L_{w1}} + (\Delta\theta_{\text{fr1}} + \Delta\theta_{\text{isofr1}}) \cdot \frac{2 \cdot L_{f1}}{L_{w1}} \quad \Delta\theta'1 = 7.188 \quad ^\circ\text{C}$$

Surface conventionnelle de refroidissement du moteur:

$$h_p := 20 \quad n_p := 16.3 \quad h_{pnp} := 300$$

$$S_{\text{mot}} := (\pi \cdot D_{\text{ext}} + 8 \cdot h_{pnp}) \cdot (L_i + 2 \cdot L_{f1}) \quad S_{\text{mot}} = 6.575 \times 10^5 \quad (\text{mm}^2)$$

pertes transmises dans l'air à l'intérieur du moteur:

$$P' := P_t - (K0 - 1) \cdot (P_{j1} + P_{j2}) \quad P' = 430.735 \quad (\text{W})$$

$$P_{\text{elsurf}} := K0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot L_i}{L_{w1}} \quad P_{\text{elsurf}} = 88.67 \quad (\text{W})$$

$$P_{\text{air}} := P' - (1 - K) \cdot (P_{\text{elsurf}} + P_{\text{fer}}) - 0.9 \cdot P_{\text{mec}} \quad P_{\text{air}} = 226.171 \quad (\text{W})$$

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

$$\alpha_{\text{air}} := 2.22 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta\theta_{\text{air}} := \frac{P_{\text{air}}}{S_{\text{mot}} \cdot \alpha_{\text{air}}} \quad \Delta\theta_{\text{air}} = 15.494 \quad ^\circ\text{C}$$

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

$$\Delta\theta_1 := \Delta\theta'1 + \Delta\theta_{air} \qquad \Delta\theta_1 = 22.682 \quad ^\circ\text{C}$$

Température moyenne de l'enroulement statorique:

$$\theta_{enr1} := \Delta\theta_1 + 40 \qquad \theta_{enr1} = 62.682 \quad ^\circ\text{C}$$

CALCUL DE LA VENTILATION

Calcul:

Dimensions du ventilateur:

Le débit d'air du ventilateur:

$$haxe := 100 \text{ (mm)} \qquad Dv2 := 1.6 \cdot haxe \qquad Dv2 = 160 \qquad Mt := 1.8$$

$$Q_b := 0.9 \cdot 10^{-3} \cdot Mt \cdot \text{Pair} \cdot \frac{\sqrt{N2 \cdot 10^{-3} \cdot Dv2 \cdot 10^{-2}}}{\Delta\theta_{air}} \qquad Q_b = 0.036$$

La vitesse linéaire périphérique des ailettes:

$$V_e := \pi \cdot Dv2 \cdot \frac{N2}{60 \cdot 10^3} \qquad V_e = 12.304 \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

La surface transversale du canal entre les palettes à la sortie d'air:

$$S_p := 2 \cdot 10^6 \cdot \frac{Q_b}{0.45 \cdot V_e} \qquad S_p = 1.309 \times 10^4 \quad (\text{mm}^2)$$

Résistance aérodynamique de la chaîne de ventilation:

$$Z := \frac{12.3 \cdot (N2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^2}{Q_b^2} \qquad Z = 5.699 \times 10^4$$

La vitesse à l'intérieur de l'ailette:

$$V_1 := \sqrt{V_e^2 - 1.85 \cdot Z \cdot Q_b^2} \qquad V_1 = 3.586$$

$$Dv1 := \frac{60 \cdot 10^3 \cdot V1}{N2}$$

$$Dv1 = 146.48$$

$$Np := 6 \cdot \frac{Dv2}{Dv2 - Dv1}$$

$$Np = 71.008$$

$$\text{round}(Np) = 71 \quad \text{ailette}$$

La surface d'une ailette:

$$Sbp := Sp \cdot \frac{Dv2 - Dv1}{2 \cdot \pi \cdot Dv2}$$

$$Sbp = 176.093 \quad (\text{mm}^2)$$

Caractéristique de la machine

$$\eta_n := 0.87 \quad Dext := 168 \quad (\text{mm})$$

$$N := 1500 \quad \left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$$

$$Kt := 1.3 \cdot (1 - Dext \cdot 10^{-3})$$

$$Kt = 1$$

Pour $2 \cdot p > 2$

$$Pmec := Kt \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (Dext \cdot 10^{-2})^4$$

$$Pmec = 17.923 \quad (\text{W})$$

$$Pn := 0, 10..4000$$

$$Psup(Pn) := 0.005 \cdot \frac{Pn}{\eta_n}$$

$$P'2(Pn) := Pn + Psup(Pn) + Pmec$$

Elaboration d'un programme de calcul

P'2(Pn) =

	0
0	11.539
1	21.597
2	31.654
3	41.712
4	51.769
5	61.827
6	71.884
7	81.942
8	91.999
9	102.056
10	112.114
11	122.171
12	132.229
13	142.286
14	152.344
15	162.401

Psup(Pn) =

	0
0	0
1	0.057
2	0.115
3	0.172
4	0.23
5	0.287
6	0.345
7	0.402
8	0.46
9	0.517
10	0.575
11	0.632
12	0.69
13	0.747
14	0.805
15	0.862

$$A(Pn) := -R1 + \frac{3 \cdot Un^2}{2 \cdot P'2(Pn)}$$

$$B(Pn) := 2A(Pn) + R'$$

$$geq(Pn) := \frac{A(Pn) - \sqrt{A(Pn)^2 - C1^2 \cdot R2ram \cdot B(Pn)}}{B(Pn)}$$

$$R2eq(Pn) := C1 \cdot R1 + \frac{C1^2 \cdot R2ram}{geq(Pn)}$$

$$Z2eq(Pn) := \sqrt{R2eq(Pn)^2 + X2eq^2}$$

$$I'2(Pn) := \frac{Un}{Z2eq(Pn)}$$

$$\cos\phi'2(Pn) := \frac{R2eq(Pn)}{Z2eq(Pn)}$$

$$I'2a(Pn) := I'2(Pn) \cdot \cos\phi'2(Pn)$$

$$Pa_{10} := 146.728 \quad (W)$$

$$Ila(Pn) := I0a + I'2a(Pn)$$

$$I0a := \frac{Pa_{10} + Pfer + Pmec}{3 \cdot Un}$$

Elaboration d'un programme de calcul

$$\sin\phi^2(P_n) := \frac{1}{Z_{2eq}(P_n)}$$

$$I''_{2r}(P_n) := I''_2(P_n) \cdot \sin\phi^2(P_n)$$

$$I_{0r} := \frac{p \cdot F}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot Ken_1}$$

$$I_{1r}(P_n) := I_{0r} + I''_{2r}(P_n)$$

$$R_{2eq}(P_n) =$$

	0
0	3.753·10 ⁴
1	2.005·10 ⁴
2	1.368·10 ⁴
3	1.038·10 ⁴
4	8.361·10 ³
5	7·10 ³
6	6.019·10 ³
7	5.28·10 ³
8	4.702·10 ³
9	4.238·10 ³
10	3.857·10 ³
11	3.539·10 ³
12	3.269·10 ³
13	3.038·10 ³
14	2.837·10 ³
15	2.66·10 ³

$$Z_{2eq}(P_n) =$$

	0
0	3.753·10 ⁴
1	2.005·10 ⁴
2	1.368·10 ⁴
3	1.038·10 ⁴
4	8.361·10 ³
5	7·10 ³
6	6.019·10 ³
7	5.28·10 ³
8	4.702·10 ³
9	4.238·10 ³
10	3.857·10 ³
11	3.539·10 ³
12	3.269·10 ³
13	3.038·10 ³
14	2.837·10 ³
15	2.66·10 ³

$$g_{eq}(P_n) =$$

	0
0	7.179·10 ⁻⁵
1	1.344·10 ⁻⁴
2	1.97·10 ⁻⁴
3	2.597·10 ⁻⁴
4	3.224·10 ⁻⁴
5	3.852·10 ⁻⁴
6	4.48·10 ⁻⁴
7	5.108·10 ⁻⁴
8	5.736·10 ⁻⁴
9	6.365·10 ⁻⁴
10	6.994·10 ⁻⁴
11	7.624·10 ⁻⁴
12	8.254·10 ⁻⁴
13	8.884·10 ⁻⁴
14	9.515·10 ⁻⁴
15	1.015·10 ⁻³

$$I''_2(P_n) =$$

	0
0	0.01
1	0.019
2	0.028
3	0.037
4	0.045
5	0.054
6	0.063
7	0.072
8	0.081
9	0.09
10	0.099
11	0.107
12	0.116
13	0.125
14	0.134
15	0.143

$$I_l(P_n) := \sqrt{I_{1a}(P_n)^2 + I_{1r}(P_n)^2}$$

Elaboration d'un programme de calcul

	0
0	0.273
1	0.282
2	0.291
3	0.299
4	0.308
5	0.317
6	0.326
7	0.335
8	0.344
9	0.353
10	0.361
11	0.37
12	0.379
13	0.388
14	0.397
15	0.406

$$I1r(Pn) =$$

	0
0	3.297
1	3.297
2	3.297
3	3.297
4	3.297
5	3.297
6	3.297
7	3.297
8	3.297
9	3.297
10	3.297
11	3.297
12	3.297
13	3.297
14	3.297
15	3.298

$$In1(Pn) := \frac{Pn}{3 \cdot Un \cdot \cos(\phi_n) \cdot \eta_n}$$

$$I2(Pn) := \frac{1.11 \cdot In1(Pn) \cdot 2 \cdot m1 \cdot W1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot Ken1}{Z2}$$

$$\cos\phi(Pn) := \frac{I1a(Pn)}{I1(Pn)}$$

$$Pj1(Pn) := m1 \cdot In1(Pn)^2 \cdot R1$$

$$Pj2(Pn) := m2 \cdot I2(Pn)^2 \cdot R2$$

$$\cos\phi(Pn) =$$

	0
0	0.083
1	0.085
2	0.088
3	0.09
4	0.093
5	0.096
6	0.098
7	0.101
8	0.104
9	0.106
10	0.109
11	0.112
12	0.114
13	0.117
14	0.119
15	0.122
16	0.125
17	0.127
18	0.13

$$Pj1(Pn) =$$

	0
0	0
1	1.992 · 10 ⁻³
2	7.969 · 10 ⁻³
3	0.018
4	0.032
5	0.05
6	0.072
7	0.098
8	0.127
9	0.161
10	0.199
11	0.241
12	0.287
13	0.337
14	0.39
15	0.448

$$Pj2(Pn) =$$

	0
0	0
1	9.07 · 10 ⁻⁴
2	3.628 · 10 ⁻³
3	8.163 · 10 ⁻³
4	0.015
5	0.023
6	0.033
7	0.044
8	0.058
9	0.073
10	0.091
11	0.11
12	0.131
13	0.153
14	0.178
15	0.204

Elaboration d'un programme de calcul

$$P_{\text{tota}}(P_n) := P_{j1}(P_n) + P_{j2}(P_n) + P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + P_{\text{sup}}(P_n)$$

$$P_1(P_n) := P_n + P_{\text{tota}}(P_n) \qquad \eta_1(P_n) := \frac{P_n}{P_n + P_{\text{tota}}(P_n)}$$

$P_{\text{tota}}(P_n) =$

	0
0	164.451
1	164.81
2	165.315
3	165.965
4	166.76
5	167.699
6	168.784
7	170.014
8	171.388
9	172.908
10	174.572
11	176.381
12	178.336
13	180.435
14	182.679
15	185.069

$P_1(P_n) =$

	0
0	164.451
1	214.81
2	265.315
3	315.965
4	366.76
5	417.699
6	468.784
7	520.014
8	571.388
9	622.908
10	674.572
11	726.381
12	778.336
13	830.435
14	882.679
15	935.069

$\eta_1(P_n) =$

	0
0	0
1	0.233
2	0.377
3	0.475
4	0.545
5	0.599
6	0.64
7	0.673
8	0.7
9	0.722
10	0.741
11	0.757
12	0.771
13	0.783
14	0.793
15	0.802

$$P_e := 4.051$$

$$C_1 := 1 + \frac{X_1}{X_m}$$

$$C^u(P_n) := \frac{9.55 \cdot P_n \cdot 10^3}{N \cdot (1 - \text{geq}(P_n))}$$

$C^u(P_n) =$

	0
0	0
1	318.456
2	637.112
3	955.97
4	1.275·10 ³
5	1.594·10 ³
6	1.914·10 ³
7	2.233·10 ³
8	2.553·10 ³
9	2.873·10 ³
10	3.194·10 ³
11	3.514·10 ³
12	3.835·10 ³
13	4.156·10 ³
14	4.477·10 ³
15	4.798·10 ³

Elaboration d'un programme de calcul

$$C'elm(N) := \frac{p \cdot m1 \cdot Un^2 \cdot \frac{R2demram}{N2-N}}{N2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot \left[\left(C1 \cdot R1 + \frac{C1^2 \cdot R2demram}{\frac{N2-N}{N2}} \right)^2 + Xeqdem^2 \right]$$

$$Ild(N) := \frac{Un}{\sqrt{\left(C1 \cdot R1 + \frac{C1^2 \cdot R2demram}{\frac{N2-N}{N2}} \right)^2 + Xeqdem^2}}$$

N := 0,50..1500

C'elm(N) =

	0
0	121.451
1	122.538
2	123.6
3	124.63
4	125.621
5	126.562
6	127.442
7	128.249
8	128.968
9	129.58
10	130.065
11	130.398
12	130.55
13	130.485
14	130.163

Ild(N) =

	0
0	49.92
1	49.282
2	48.615
3	47.917
4	47.186
5	46.42
6	45.616
7	44.77
8	43.881
9	42.944
10	41.955
11	40.91
12	39.804
13	38.632
14	37.387
15	36.064

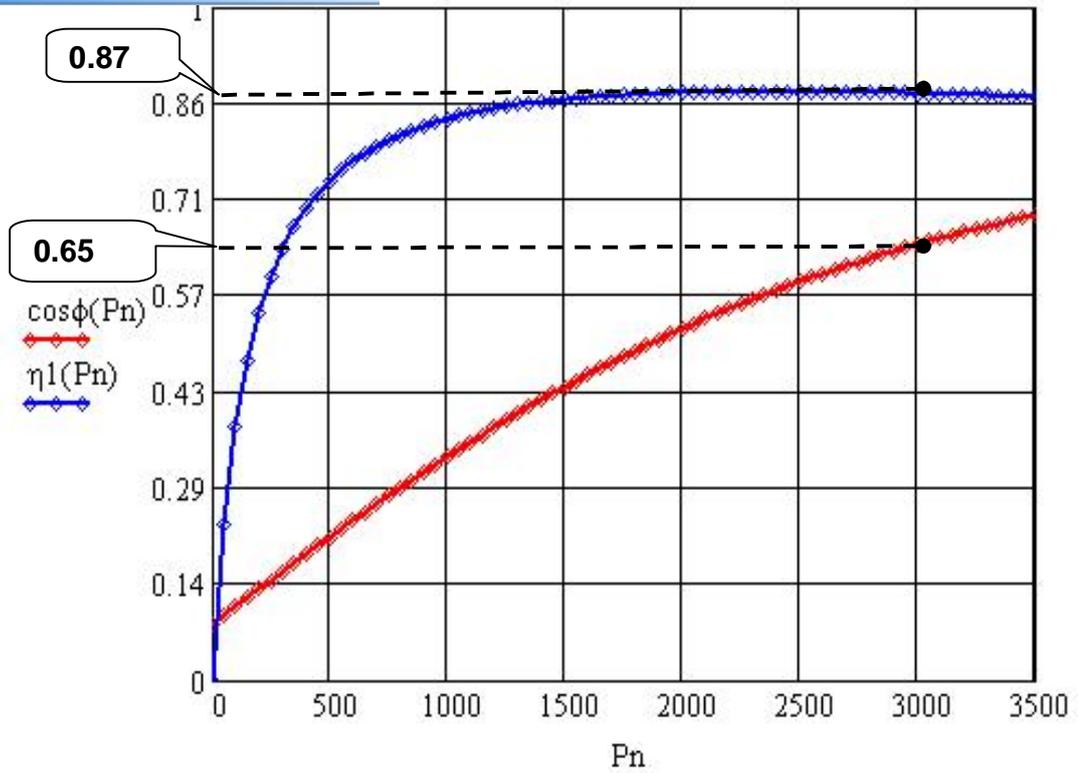


Figure 01 : le rendement et le facteur puissance en fonction de la puissance nominale

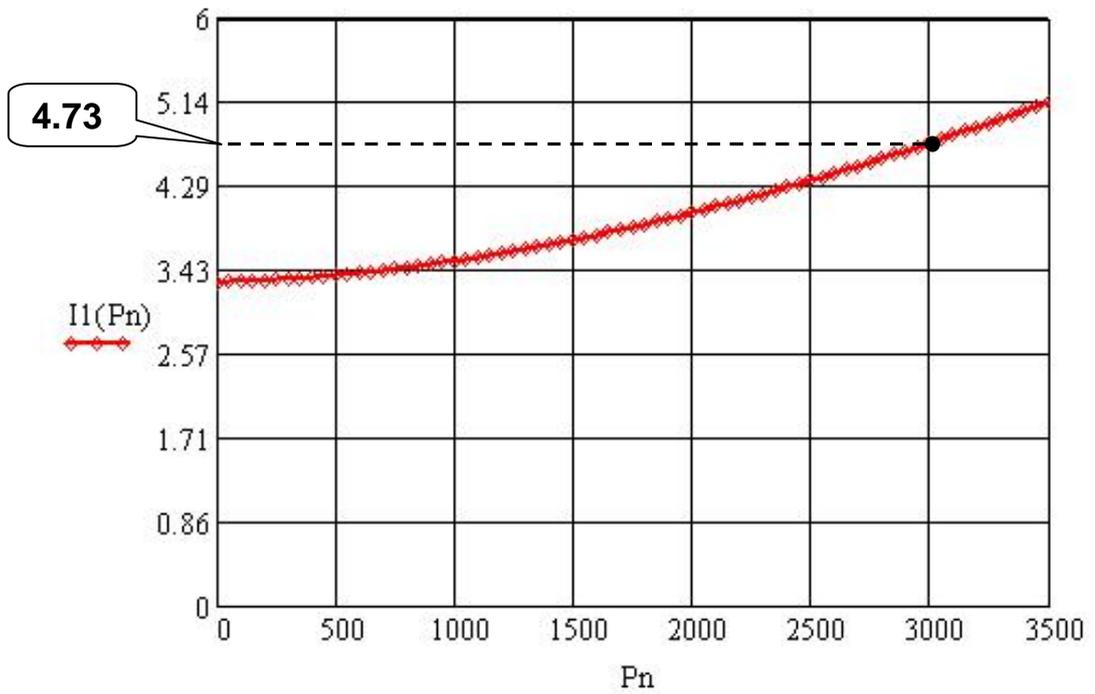
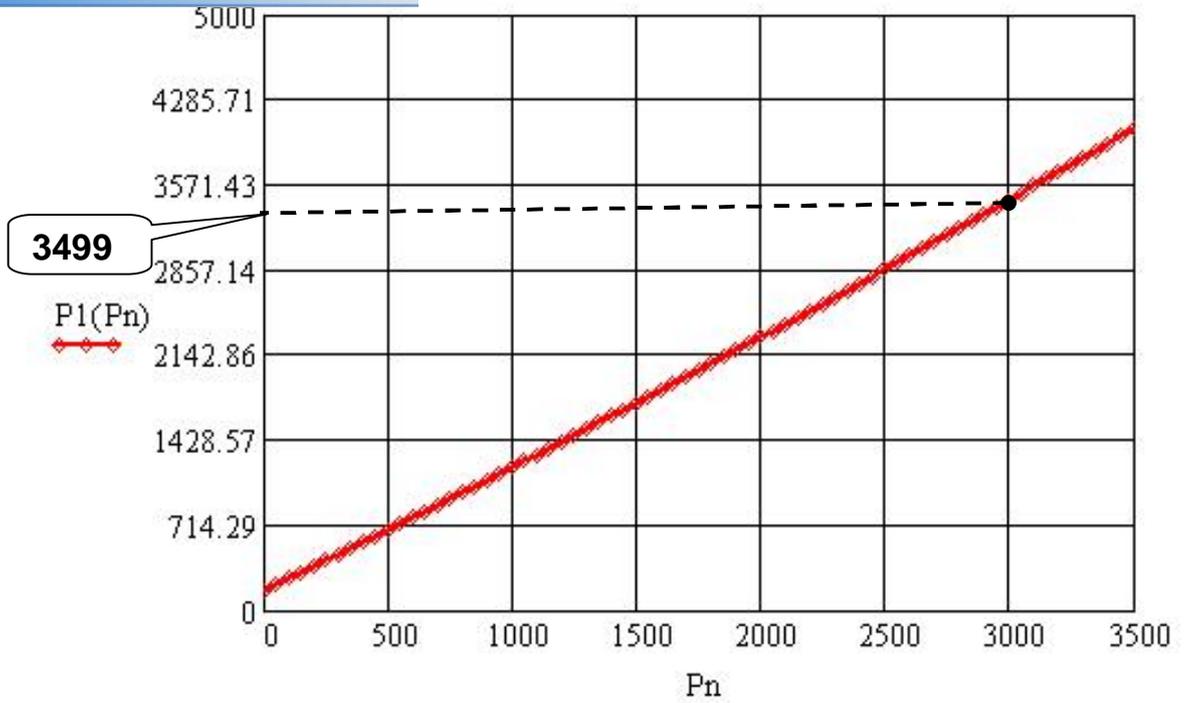
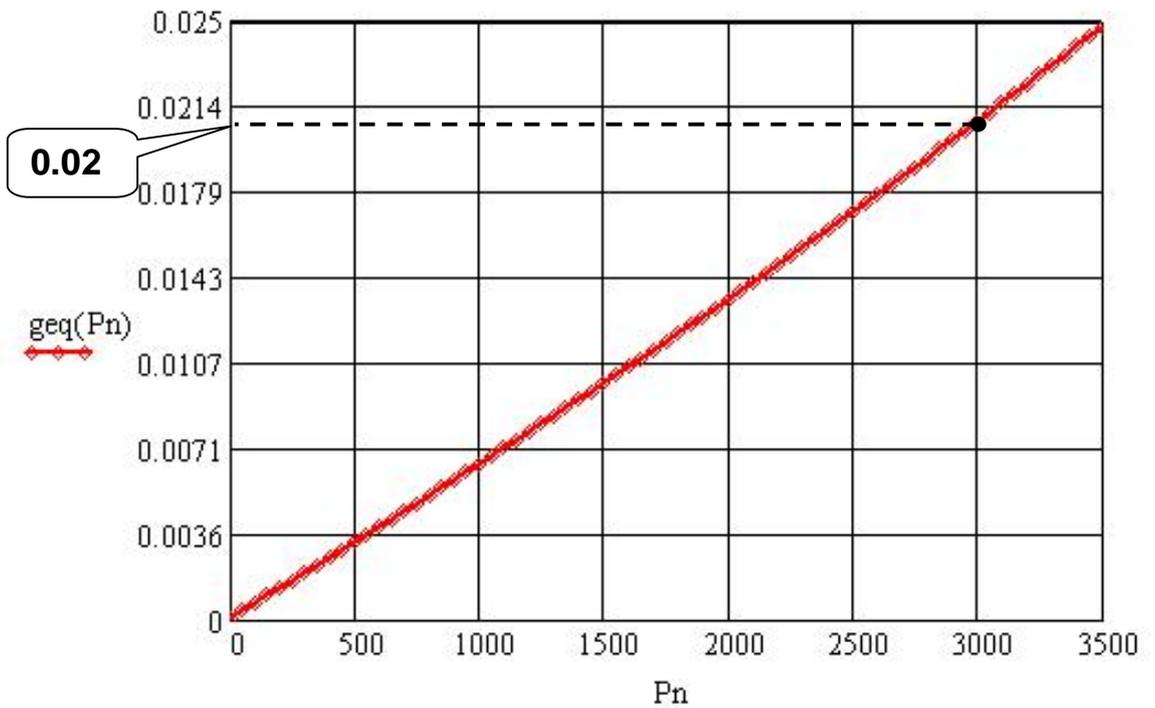


Figure 02 : le courant absorbé en fonction de la puissance nominale

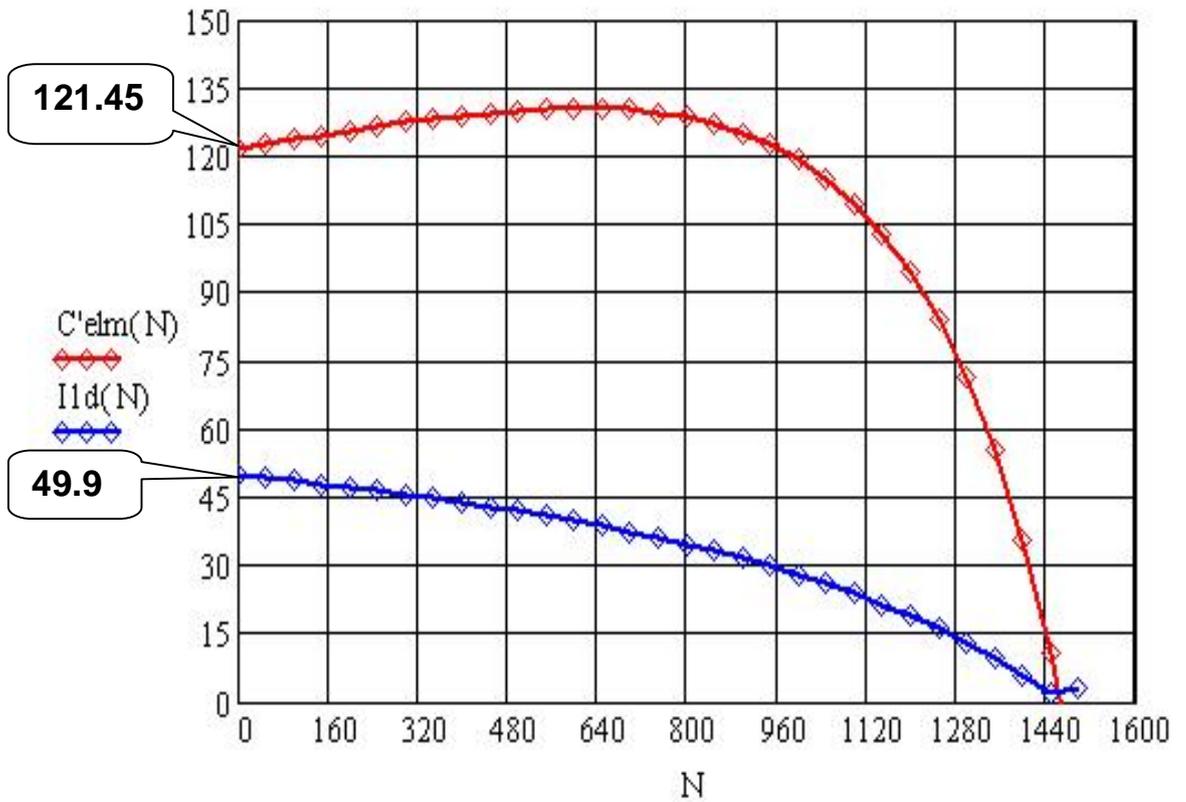
Elaboration d'un programme de calcul



Courbe 03 : La puissance absorbée en fonction de la puissance nominale



Courbe 04 : Le glissement en fonction de la puissance nominale



Courbe 05 : La caractéristique mécanique et le courant de démarrage en fonction de la vitesse

mium, les tôles magnétiques et l'isolation on a du moteur réalisé auparavant.

Pour le moteur qu'on a calculé, nous avons gardés la même longueur virtuelle de l'induit du moteur qui a été réalisé avec un rendement de 79% et on a imposé au début du programme un rendement de 87%.

On a fait un programme de calcul toute en respectant les plages de variation des différents paramètres et on a aboutis à des résultats suivants :

IV.1. Tableau des résultats :

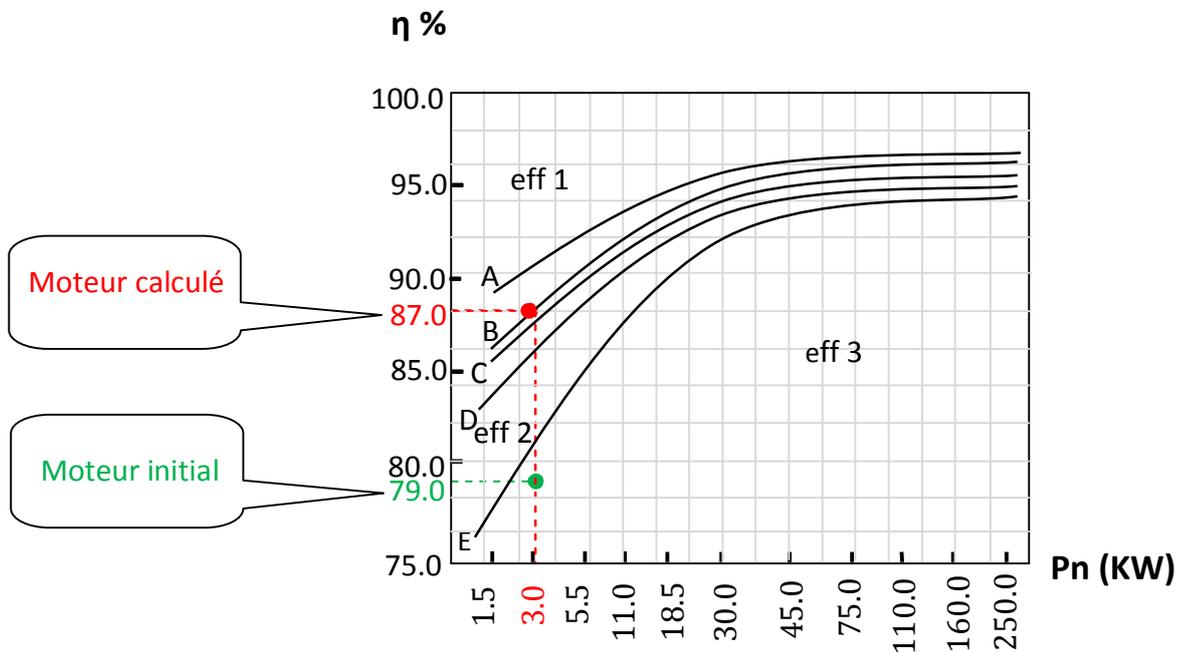
	Moteur Réalisé	Moteur calculé
θ °C	86	62.68
I_{μ} [A]	3	3.29
J_1 [A/mm ²]	8.2	7.5
Cos Φ	0.83	0.65
η %	79	87
Pa [kW]	3.92	3.49
R_1 [á]	5.99	5.99
K_{rel} %	78	76.3
S_{eff} [mm ²]	0.489	0.486
d_{iso} [mm]	0.619	0.619
N [tr /min]	1381	1469
C_u [N /m]	20.44	19.50
I_n [A]	4.01	3.64
D1 [mm]	88.5	104
D2 [mm]	87.7	103.20
Dext [mm]	145	168
Uenl	54	50
A1 [A/M]	28300	20000
V [mm ³]	2153391.43	2871188.57
W1 (spires)	324	300

Après avoir calculé notre moteur on remarque que :

- Le volume du moteur a augmenté de $1/3$ par rapport au volume initial.
- La densité du courant a diminuée ce qui permet la diminution de la section des conducteurs.
- La section des conducteurs a diminuée.
- La charge linéaire a diminuée ce qui implique la diminution de nombre d'ampères sur la périphérie de l'induit.
- Le couple utile a diminué car il est proportionnel au glissement et ce dernier a diminué.
- La puissance absorbée a diminuée.
- La température moyenne de l'enroulement statorique a diminuée ainsi que le réchauffement du moteur ce qui permet au moteur de garder ses performances pour une longue période.
- La vitesse de rotation a augmentée ce qui permet de diminué le glissement donc la profondeur de pénétration des courants induits augmente ce qui implique la diminution du refoulement du courant (résistance de la cage diminue).
- Le courant nominal dans une phase a diminué.
- Le nombre de spires d'une voie parallèle a diminué donc il est économique ainsi que les pertes statorique seront minimisées.
- Le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche a diminué.
- Le diamètre intérieur du stator a augmenté.
- Le diamètre extérieur du stator a augmenté.
- Le diamètre extérieur du rotor a augmenté.
- La résistance active du stator n'a pas changée.
- Le coefficient de remplissage de l'encoche a diminué.
- Le courant magnétisant a augmenté.
- Le facteur de puissance a diminué.

Comparaison et interprétation des résultats

s a conduit à un rendement de 87%, donc notre
 sser notre moteur en effective 1 alors qu'il a été en
 effective 3, voir figure suivante : « Conférence internationale en UKRAIN »



Les courbes « A-B-C-D » représentent l'effective (1), entre « D » et « E » l'effective(2) et au dessous de la courbe « E » l'effective (3).

Pour une puissance de 3KW et un rendement de 79% le point d'intersection est représenté en vert, il est sur la zone de l'effective (3) et il représente le moteur qui est déjà réalisé.

Pour une même puissance et un rendement de 87% le point d'intersection est représenté en rouge, il est sur la zone de l'effective (1), il représente le moteur qu'on a calculé.

es :

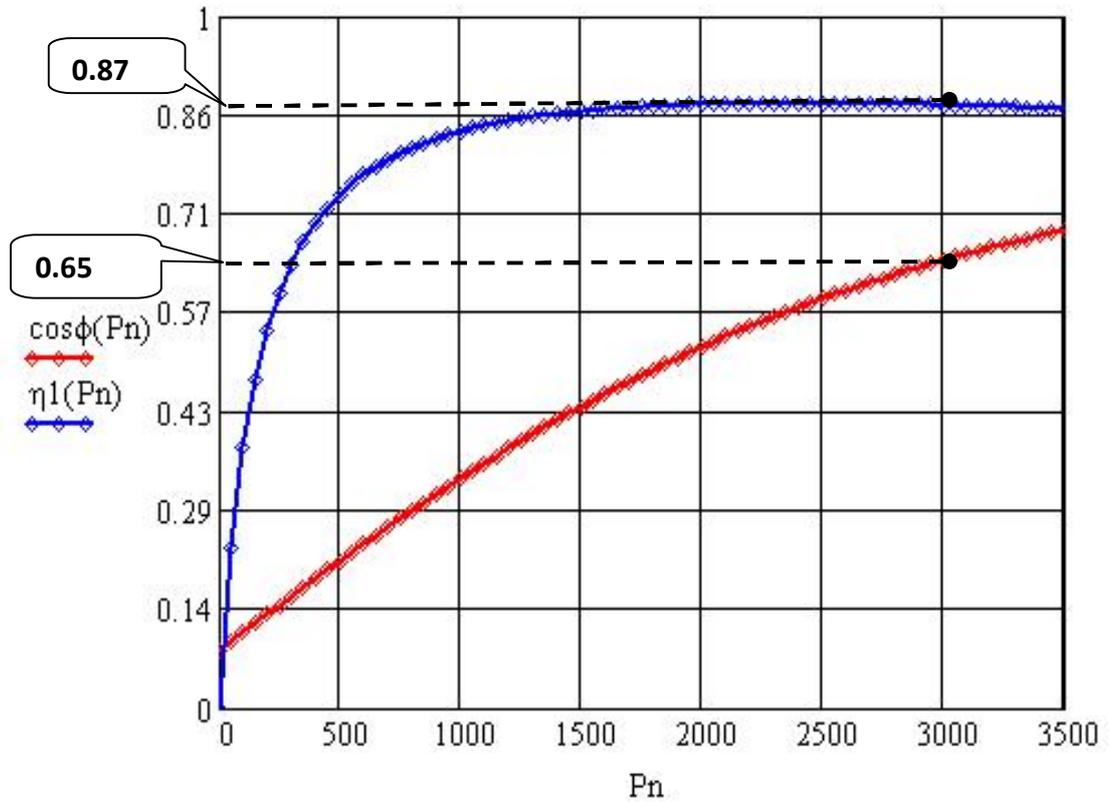


Figure 02

La figure-1- représente le rendement et le facteur de puissance en fonction de la puissance nominale :

- a- La courbe du rendement en fonction de la puissance nominale est représentée en bleu elle commence par l'origine, elle évolue linéairement jusqu'à presque 300 watts donc on peut dire que le rendement est proportionnel à la puissance nominale dans cette zone, de 300 watts à 1050 watts elle forme un coude donc le rendement n'est pas proportionnel à la puissance dans cette zone, dès que elle dépasse la puissance 1050 watts la courbe se sature donc dans cette zone il n'y a pas une grande variation par rapport au rendement quelque soit la variation de la puissance.

ance en fonction de la puissance nominale est
 commence pas par l'origine et elle évolue d'une
 manière exponentielle, donc la courbe représente un exponentiel croissant.

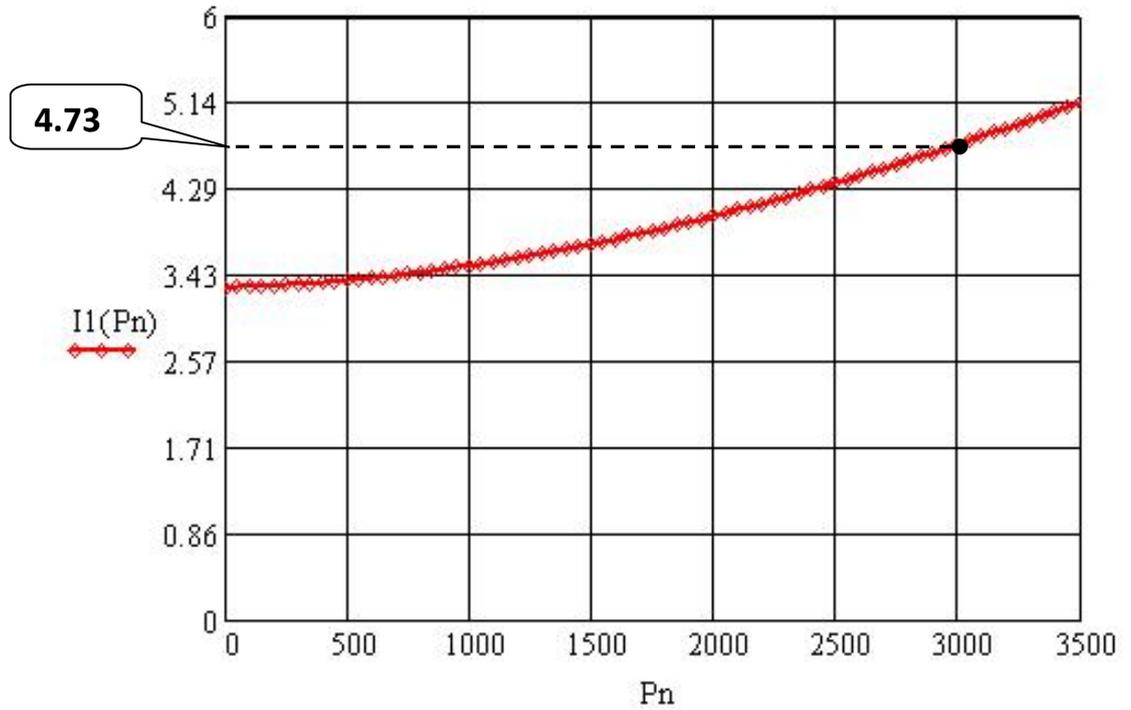
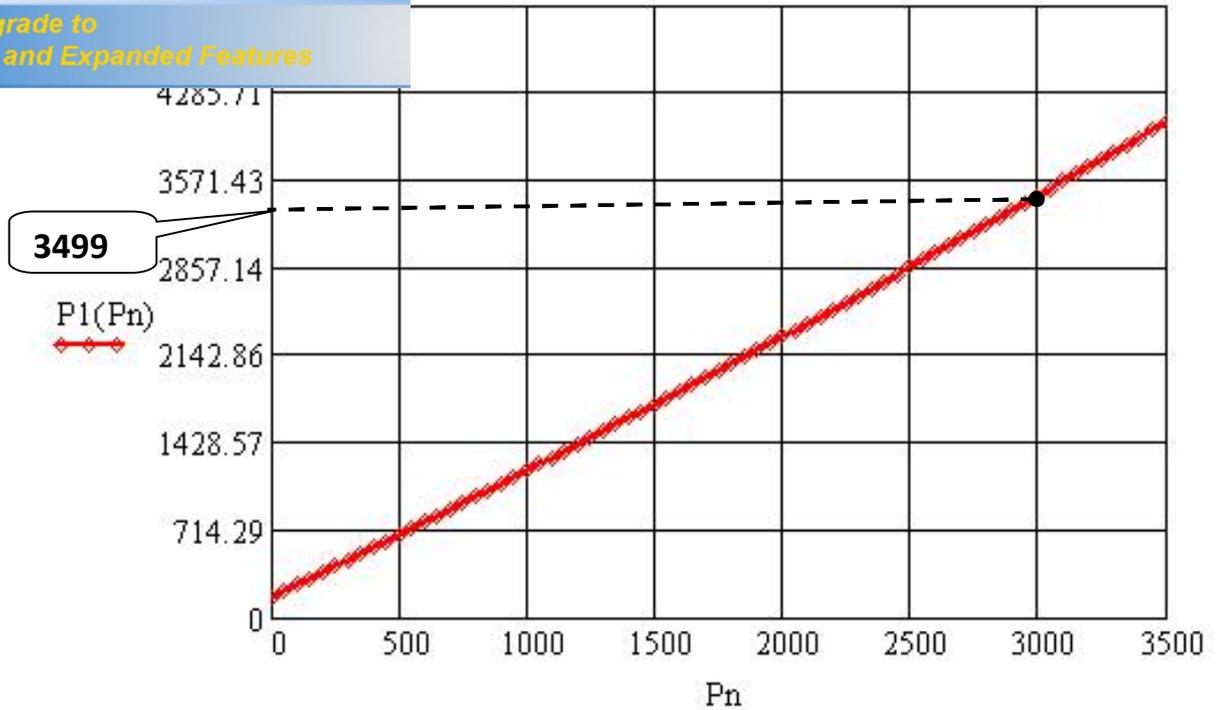


Figure 03

La figure-3- représente le courant absorbé en fonction de la puissance nominale, on remarque qu'à chaque fois qu'on augmente la puissance nominale le courant absorbé augmente.

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

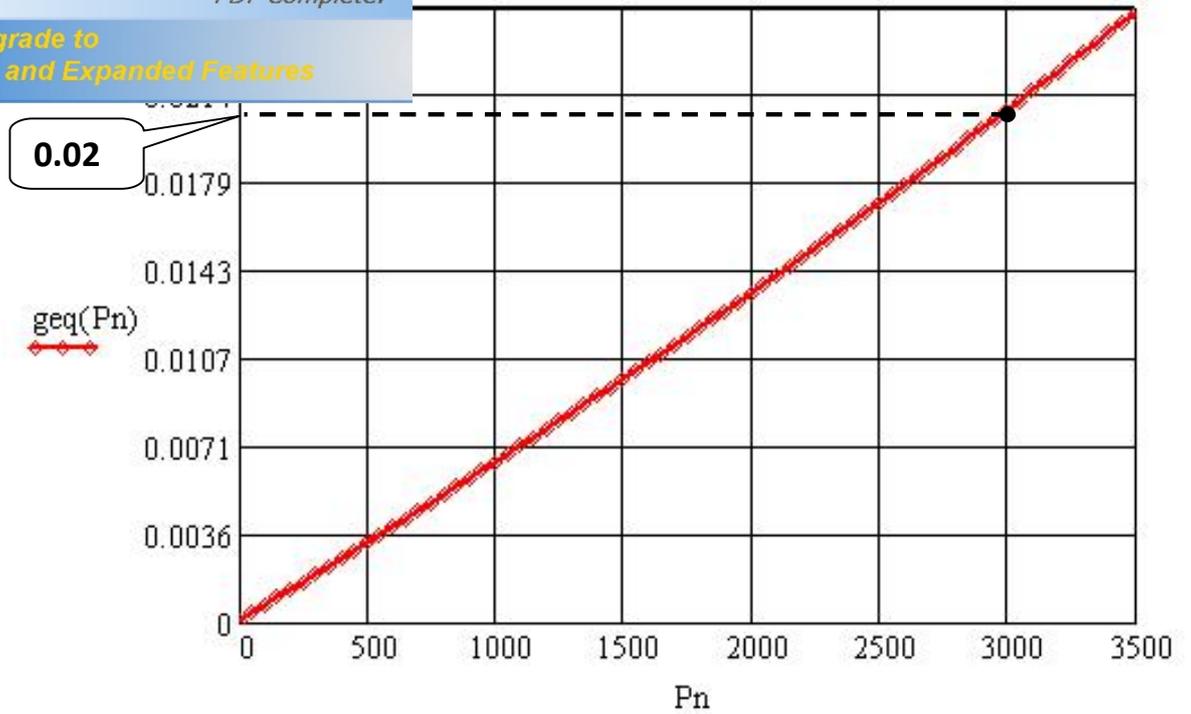


Courbe 04

La figure-4- représente la puissance absorbée par le moteur en fonction de la puissance nominale, on remarque qu'elle augmente d'une manière presque linéaire avec la puissance nominale, donc à chaque fois qu'on augmente la puissance nominale la puissance absorbée augmente.

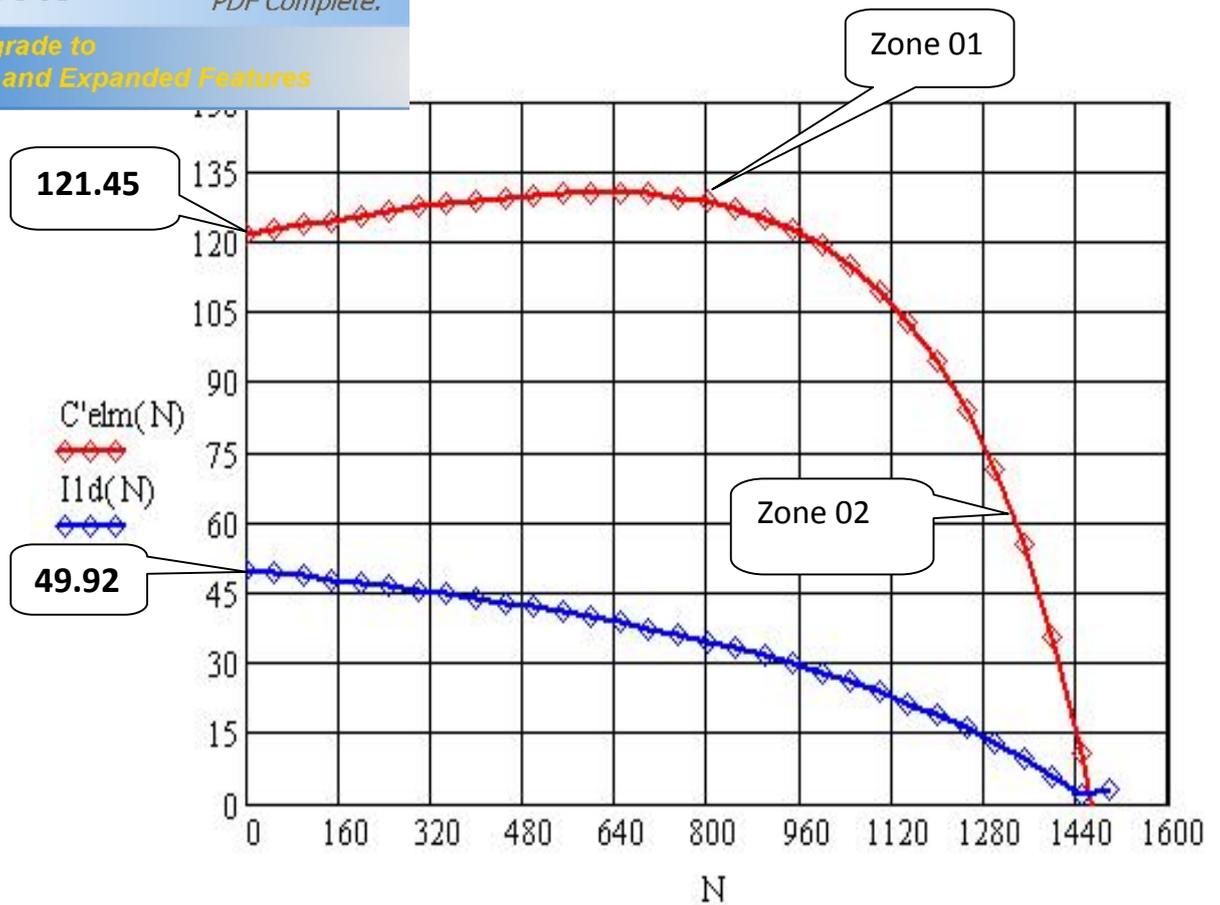
Finalement on pourra dire que la puissance absorbée est presque égale à la puissance nominale, il ya une petite différence qui représente les pertes.

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features



Courbe 05

La courbe -5- représente le glissement en fonction de la puissance nominale, on remarque que la courbe est presque une droite, à chaque fois qu'on augmente la puissance nominale le glissement augmente.



Courbe 06

La figure -6- représente la caractéristique mécanique du moteur, et le courant de démarrage en fonction de la vitesse.

La courbe en rouge représente la caractéristique mécanique, on remarque que la zone 01 représente la zone de démarrage du moteur et la zone 02 représente la zone linéaire ou de fonctionnement du moteur, on remarque que le couple de démarrage est très grand il est dû au pic du courant de démarrage (courant de démarrage très grand), pour une vitesse de rotation nulle.

La courbe en bleu représente le courant de démarrage en fonction de la vitesse, il commence par le maximum après avoir augmenté la vitesse le courant de démarrage diminue. Donc au démarrage il y a des pics de courants qui sont dangereux sur le moteur.

DIMENSIONNEMENT DU STATOR

La puissance électromagnétique: p_e

$$k_e: \text{facteur de majoration} \quad k_e := 0.975$$

$$P_n: \text{puissance nominale} \quad P_n := 3 \quad (\text{Kw})$$

$$\cos(\phi_n): \text{facteur de puissance} \quad \cos(\phi_n) := 0.83$$

$$\eta_n: \text{le rendement nominal} \quad \eta_n := 0.87$$

$$\phi_n := 0.54 \quad p_e := \frac{k_e \cdot P_n}{\eta_n \cdot \cos(\phi_n)} \quad p_e = 4.051 \quad (\text{Kw})$$

$$m_1 := 3$$

$$\alpha_i: \text{coefficient de recouvrement polaire} \quad \alpha_i := 0.64$$

$$k_f: \text{facteur de la forme de la courbe d'induction} \quad k_f := 1.11$$

$$N: \text{vitesse de rotation de synchronisme} \quad N := 1500 \quad \left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$$

$$D_1: \text{diametre interieur du stator} \quad D_1 := 104 \quad (\text{mm})$$

$$B_\delta: \text{l'induction dans l'entrefer} \quad B_\delta := 0.92 \quad (\text{T})$$

le pas polaire en nombre d'encoches:

$$p: \text{le nombre de paire de pôles} \quad p := 2$$

Z_1 : le nombre d'encoches

$$\left(\begin{array}{l} Z_1 \\ \tau_p \end{array} \right) := 36$$

$$Z_1 = 36$$

$$\tau_p := \frac{Z_1}{2 \cdot p} \quad \tau_p = 9$$

le pas polaire en mm:

$$\tau_{p1} := \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad \tau_{p1} = 81.681 \quad (\text{mm})$$

$$t1 := \frac{\pi \cdot D1}{Z1} \qquad t1 = 9.076 \quad (\text{mm})$$

le nombre d'encoches par pôle et par phase:

$$q1 := \frac{Z1}{2 \cdot p \cdot m1} \qquad q1 = 3$$

Ken1 : le facteur de bobinage de l'enroulement statorique

$$kd1 := \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m1}\right)}{q1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m1 \cdot q1}\right)} \qquad kd1 = 0.96$$

Le pas d'enroulement :

$\varepsilon_w :=$	0
--------------------	---

$$\varepsilon = 0$$

$$y1 := \frac{Z1}{2 \cdot p} - \varepsilon \qquad y1 = 9$$

$$\beta := \frac{y1}{\tau p} \qquad \beta = 1$$

$$kr1 := \sin\left(\frac{\beta \cdot \pi}{2}\right) \qquad kr1 = 1$$

$$Ken1 := kd1 \cdot kr1 \qquad Ken1 = 0.96$$

La longueur virtuelle de l'induit: Li

A1 : la charge linéaire

$A1 :=$	20000
---------	-------

$$A1 = 2 \times 10^4 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}}\right)$$

$$L_i := \frac{6.1 \cdot 10^{12} \cdot p_e}{\alpha_i \cdot k_f \cdot N \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot B \delta \cdot K_{en1}}$$

$$L_i := 130.472 \quad (\text{mm})$$

le coefficient de longueur:

$$\lambda := \frac{L_i}{D_1}$$

$$\lambda = 1.255$$

l'angle électrique séparant deux encoches successives:

$$\gamma := \frac{p \cdot 360}{Z_1}$$

$$\gamma = 20$$

la zone de phase:

$$\alpha := q_1 \cdot \gamma$$

$$\alpha = 60$$

le courant nominal dans une phase:

U_{n1} : la tension simple

$\begin{pmatrix} U_{n1} \\ I_{n1} \\ U_{en1} \end{pmatrix} :=$	380
--	-----

$$U_{n1} = 380 \quad (\text{V})$$

$$I_{n1} := \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{n1} \cdot \cos(\phi_n) \cdot \eta_n}$$

$$I_{n1} = 3.644 \quad (\text{A})$$

Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche:

a_1 : le nombre de voies parallèles $a_1 := 1$

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

$$U_{en1} = 49.807$$

$$\text{round}(U_{en1}) = 50$$

ie parallèle:

$$W1 := \frac{p \cdot q1 \cdot \text{round}(Uen1)}{a1}$$

$$W1 = 300$$

la fréquence:

$$f1 := \frac{N \cdot p}{60} \quad f1 = 50 \text{ (Hz)}$$

la section effective:

$$j1 := 7.5 \left(\frac{A}{\text{mm}^2} \right)$$

$$Seff1 := \frac{In1}{a1 \cdot j1}$$

$$Seff1 = 0.486 \text{ (mm}^2\text{)}$$

La section élémentaire:

$$Nel := 2$$

$$Snor1 := (0.2463) \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$\text{diso} := 0.619 \text{ (mm)}$$

$$\text{dnu} := 0.56 \text{ (mm)}$$

$$\text{Selt1} := \frac{Seff1}{Nel}$$

$$\text{Selt1} = 0.243 \text{ (mm}^2\text{)}$$

La largeur de la dent:

$$Bz1_{\text{max}} := 1.9 \text{ (T)} \quad (kfer) := 0.97$$

$$bz1 := \frac{t1 \cdot B\delta}{kfer \cdot Bz1_{\text{max}}}$$

$$bz1 = 4.53 \text{ (mm)}$$

La hauteur du dos statorique:

$$Bc1 := 1.65$$

$$hc1 := \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau p1 \cdot B\delta}{kfer \cdot Bc1}$$

$$hc1 = 15.025 \text{ (mm)}$$

La hauteur de la dent:

$$Dext := 168 \text{ (mm)}$$

$$hz1 := 0.5 \cdot (Dext - D1) - hc1$$

$$hz1 = 16.975 \text{ (mm)}$$

the:

$$\text{benc}_{11} := -bz_1 + \frac{\pi \cdot (D1 + 0.2hz_1)}{Z1}$$

$$\text{benc}_{11} = 4.842 \quad (\text{mm})$$

La largeur maximale de l'encoche:

$$\text{hf}_1 := 0.8 \div 1.2$$

$$\text{hf}_1 = 0.8 \quad (\text{mm})$$

$$\text{benc}_{12} := -bz_1 + \frac{\pi \cdot (D1 + 2 \cdot \text{hz}_1)}{Z1}$$

$$\text{benc}_{12} = 7.508 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de la clavette:

$$\text{hk}_1 := 0.6 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de l'encoche:

$$\text{henc}_1 := \text{hz}_1 - \left(\text{hk}_1 + \text{hf}_1 + \frac{\text{benc}_{12}}{2} \right)$$

$$\text{henc}_1 = 11.955 \quad (\text{mm})$$

La section de l'encoche:

$$\text{Sencaiso}_1 := 0.5(\text{benc}_{11} + \text{benc}_{12}) \cdot \text{henc}_1 + \pi \cdot \frac{(\text{benc}_{11})^2}{4 \cdot 2}$$

$$\text{Sencaiso}_1 = 66.24 \quad (\text{mm}^2)$$

La section occupée par les conducteurs:

$$\text{e}_1 := 0.37 \div 0.4$$

$$\text{e}_1 := 0.4 \quad (\text{mm})$$

$$\text{Siso} := \left(\text{benc}_{11} + 2\text{henc}_1 + \pi \cdot \frac{\text{benc}_{12}}{2} \right) \cdot \text{e}_1$$

$$\text{Siso} = 16.218 \quad (\text{mm}^2)$$

$$\text{Senc}_1 := \text{Sencaiso}_1 - \text{Siso}$$

$$\text{Senc}_1 = 50.022 \quad (\text{mm}^2)$$

Coefficient de remplissage de l'encoche:

$$\text{kre}_1 := \frac{\text{Nel} \cdot \text{Uen}_1 \cdot \text{diso}^2}{\text{Senc}_1}$$

$$\text{kre}_1 = 0.763$$

Flux sous un pôle:

$$\phi := \frac{\text{ke} \cdot \text{Un}_1}{4 \cdot \text{kf} \cdot \text{W1} \cdot \text{f1} \cdot \text{Ken}_1}$$

$$\phi = 5.796 \times 10^{-3} \quad (\text{Wb})$$

POSITIONNEMENT DU ROTOR

nombre d'encoche rotorique:

$Z_2 :=$	28
----------	----

$$Z_2 = 28$$

Diametre extérieur du rotor:

$$\delta := 0.4 \quad (\text{mm})$$

$$D_2 := D_1 - 2 \cdot \delta$$

$$D_2 = 103.2 \quad (\text{mm})$$

Pas dentaire:

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2}$$

$$t_2 = 11.579 \quad (\text{mm})$$

Le courant dans la barre:

$$I_2 := 1.11 \cdot I_{n1} \cdot \frac{6 \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot K_{en1}}{Z_2}$$

$$I_2 = 207.163 \quad (\text{A})$$

La hauteur de la culasse rotorique:

$$B_{c2} := 2 \quad (\text{T})$$

$$\tau_{p2} := \frac{\pi \cdot D_2}{2 \cdot p}$$

$$\tau_{p2} = 81.053 \quad (\text{mm})$$

$$h_{c2} := \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau_{p2} \cdot B \delta}{k_{fer} \cdot B_{c2}}$$

$$h_{c2} = 12.3 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de la dent: h_{z2}

$$D_{int2} := 37 \quad (\text{mm})$$

$$h_{z2} := 0.5 \cdot (D_2 - D_{int2}) - h_{c2}$$

$$h_{z2} = 20.8 \quad (\text{mm})$$

Calcul de l'encoche rotorique:

La largeur de l'encoche:

$$B_{z2max} := 1.75 \quad (\text{T})$$

$$b_{z2} := \frac{t_2 \cdot B \delta}{k_{fer} \cdot B_{z2max}}$$

$$b_{z2} = 6.276 \quad (\text{mm})$$

Diamètre maximal de l'encoche:

$$h_{f2} := 0.7 \quad (\text{mm})$$

$$d_{21} := \frac{\pi \cdot (D2 - 2 \cdot hz2) - Z2 \cdot bz2}{\pi + Z2}$$

$$d_{21} = 4.627 \quad (\text{mm})$$

Diamètre minimale de l'encoche:

$$d_{22} := \frac{\pi \cdot (D2 - 2 \cdot hz2) - Z2 \cdot bz2}{Z2 - \pi}$$

$$d_{22} = 0.716 \quad (\text{mm})$$

La cage rotorique:

Section de la barre:

$$h_2 := hz2 - hf2 - 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22})$$

$$h_2 = 17.428 \quad (\text{mm})$$

$$henc2 := h_2 + 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22})$$

$$henc2 = 20.1 \quad (\text{mm})$$

$$S_b := 0.125 \cdot [(d_{21})^2 + (d_{22})^2] \cdot \pi + 0.5 \cdot (d_{21} + d_{22}) \cdot h_2$$

$$S_b = 55.174 \quad (\text{mm}^2)$$

Densité du courant:

$$j_b := \frac{I_2}{S_b}$$

$$j_b = 3.755 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

Dimensionnement de l'anneau de court circuit:

La hauteur de l'anneau:

$$han := (1.1 \div 1.25) \cdot hz2 \quad (\text{mm})$$

$$han := 1.13 \cdot hz2$$

$$han = 23.504 \quad (\text{mm})$$

La section de l'anneau:

$$San := (0.35 \div 0.45) \cdot \frac{Z2 \cdot S_b}{2 \cdot p}$$

$$San := 0.35 \cdot \frac{Z2 \cdot S_b}{2 \cdot p}$$

$$San = 135.177 \quad (\text{mm}^2)$$

La largeur de l'anneau:

$$ban := \frac{San}{han}$$

$$ban = 5.751 \quad (\text{mm})$$

Diamètre moyen intérieur de l'anneau:

$$Dan := D2 - han$$

$$Dan = 79.696 \quad (\text{mm})$$

CIRCUIT MAGNETIQUE

A/ Calcul du circuit magnetique statorique:

Induction dans l'entrefer du stator:

► Automatisation du circuit magnétique (dent statorique)

$$Bz1 := \frac{B\delta \cdot t1}{kfer \cdot bz1} \quad Bz1 = 1.9 \quad (\text{T})$$

$$H'(Bz1) = 2.07 \times 10^3 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

Fmm dans la dent du stator:

$$Fz1 := H'(Bz1) \cdot hz1 \cdot 10^{-3} \quad Fz1 = 35.139 \quad (\text{V})$$

La longueur moyenne des lignes dans la culasse statorique:

$$Lc1 := \frac{\pi \cdot (Dext - hc1)}{2 \cdot p} \quad Lc1 = 120.147 \quad (\text{mm})$$

Fmm dans la culasse:

► Automatisation du circuit magnétique (culasse statorique)

$$Bc1 := 1.65 \quad (\text{T})$$

$$H''(Bc1) = 946 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$Fc1 := H''(Bc1) \cdot Lc1 \cdot 10^{-3} \quad Fc1 = 113.659 \quad (\text{A})$$

L'entrefer:

Fmm dans l'entrefer:

$$bf1 := 2.8 \quad (\text{mm})$$

$$k\delta1 := 1 + \frac{bf1}{t1 - bf1 + \frac{5 \cdot \delta \cdot t1}{bf1}} \quad k\delta1 = 1.219$$

$$bf2 := 2 \cdot diso \quad (\text{mm})$$

$$bf2 := 1.238 \quad (\text{mm})$$

$$k\delta2 := 1 + \frac{bf2}{t2 - bf2 + \frac{5 \cdot \delta \cdot t2}{bf2}}$$

$$k\delta2 = 1.043$$

$$k\delta := k\delta1 \cdot k\delta2$$

$$k\delta = 1.271$$

$$F\delta := 0.8 \cdot B\delta \cdot k\delta \cdot \delta \cdot 10^3$$

$$F\delta = 374.311 \quad (\text{A})$$

Circuit magnetique rotorique:

Induction dans la dent:

► Automatisation du circuit magnétique (dent rotorique)

$$Bz2 := \frac{B\delta \cdot t2}{kfer \cdot bz2}$$

$$Bz2 = 1.75 \quad (\text{T})$$

$$H1'(Bz2) = 1.33 \times 10^3 \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

Fmm dans la dent:

$$Fz2 := H1'(Bz2) \cdot (hz2 - 0.4 \cdot d22) \cdot 10^{-3}$$

$$Fz2 = 27.283 \quad (\text{A})$$

La longueur moyenne des lignes dans la culasse rotorique:

$$Lc2 := (D2 - 2 \cdot hz2 - hc2) \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot p} \right) + hc2$$

$$Lc2 = 51.02 \quad (\text{mm})$$

Fmm dans la culasse rotorique:

► Automatisation du circuit magnétique (culasse rotorique)

$$Bc2 := 2 \quad (\text{T})$$

$$H2'(Bc2) = 5.77 \times 10^3 \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$Fc2 := H2'(Bc2) \cdot Lc2 \cdot 10^{-3}$$

$$Fc2 = 294.386 \quad (\text{A})$$

$$F_{\omega} := 2 \cdot (F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}) + F_{c1} + F_{c2} \quad F = 1.282 \times 10^3 \quad (\text{A})$$

Coefficient de saturation des dents:

$$k_{\mu z} := \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad k_{\mu z} = 1.167$$

Coefficient de saturation de la machine:

$$k_{\mu} := \frac{F}{2 \cdot F_{\delta}} \quad k_{\mu} = 1.712$$

Le courant magnétisant:

$$I_{\mu} := \frac{p \cdot F}{0.9 \cdot m1 \cdot W1 \cdot K_{en1}} \quad I_{\mu} = 3.297 \quad (\text{A})$$

La réactance de magnétisation:

$$X_m := \frac{k_e \cdot U_{n1}}{I_{\mu}} \quad X_m = 112.383 \quad (\text{ohm})$$

Coefficient de dispersion magnétique du stator:

$$\lambda_1 := 3.478$$

$$X_1 := \frac{1.58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \quad X_1 = 5.377 \quad (\text{ohm})$$

$$\sigma_{\mu} := \frac{X_1}{X_m} \quad \sigma_{\mu} = 0.048$$

Force électromagnétique à vide:

$$E_0 := \frac{U_{n1}}{1 + \sigma_{\mu}} \quad E_0 = 362.648 \quad (\text{V})$$

Paramètres du stator

Résistance active:

$$T := 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rho_{cu} := 0.0172 \cdot 10^{-6} \text{ (ohm}\cdot\text{m)} \quad y1moy := 9$$

$$b1moy := \frac{\pi \cdot (D1 + hz1) \cdot y1moy}{Z1} \quad b1moy = 95.014 \text{ (mm)}$$

$$Lf1 := (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b1moy + 15 \quad Lf1 = 151.82 \text{ (mm)}$$

$$Lw1 := 2 \cdot (Li + Lf1) \quad Lw1 = 564.584 \text{ (mm)}$$

$$R1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a1 \cdot Nel \cdot Selt1} \quad R1 = 5.995 \text{ (ohm)}$$

$$T := 115 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \rho_{cu} := 24.4 \cdot 10^{-9} \text{ (ohm}\cdot\text{m)}$$

$$R1 := \rho_{cu} \cdot \frac{W1 \cdot Lw1 \cdot 10^3}{a1 \cdot Nel \cdot Selt1} \quad R1 := 4.5 \text{ (ohm)}$$

La réactance de fuite frontale:

$$KB1 := 1 \quad KB2 := 1 \quad Q1 := \frac{Z2}{p} \quad Q1 = 14$$

$$Kdd1 := 0.93 \quad Krr1 := 0.014$$

$$\lambda1f := 0.34 \cdot \frac{q1 \cdot (Lf1 - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau p1)}{Li} \quad \lambda1f = 0.778$$

$$X1f := 1.58 \cdot f1 \cdot Li \cdot W1^2 \cdot \frac{\lambda1f}{p \cdot q1 \cdot 10^8} \quad X1f = 1.203 \text{ (ohm)}$$

La réactance de fuite différentielle:

$$Kr1 := 1 - \left(\frac{0.033 \cdot bf1^2}{\delta \cdot t1} \right) \quad Kr1 = 0.929$$

$$\lambda_{1d} := \frac{0.9 \cdot t_1 \cdot (q_1 \cdot K_{en1})^2 \cdot K_{rr1} \cdot (K_{dd1}^2 \cdot K_{r1})}{k \delta \cdot \delta} \quad \lambda_{1d} = 1.497$$

$$X_{1d} := 1.58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_{1d}}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \quad X_{1d} = 2.315 \quad (\text{ohm})$$

Réactance de fuite d'encoche:

$$h_1 := h_{enc1} \quad h_{11} := 1 \quad h_1 = 11.955$$

$$\lambda_{enc1} := \frac{h_1 \cdot K_{B1}}{3 \cdot b_{enc11}} + \left(\frac{h_{11}}{b_{enc11}} + \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc11} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_{B2} \quad \lambda_{enc1} = 1.44$$

$$X_{enc1} := 1.58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_{enc1}}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \quad X_{enc1} = 2.227 \quad (\text{ohm})$$

La réactance totale:

$$\lambda_1 := (\lambda_{enc1} + \lambda_{1f} + \lambda_{1d}) \quad \lambda_1 = 3.716$$

$$X_1 := 1.58 \cdot f_1 \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \frac{\lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \quad X_1 = 5.745 \quad (\text{ohm})$$

PARAMETRES DU ROTOR

Résistance active de la barre:

$$T := 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rho_{AL}(T) := 2.8 \cdot 10^{-8} \text{ (Ohm}\cdot\text{m)} \quad K_{dep} := 0.915 \quad L2 := L1$$

$$R_b := \rho_{AL}(T) \cdot \frac{K_{dep} \cdot L2 \cdot 10^3}{S_b} \quad R_b = 6.058 \times 10^{-5} \text{ (ohm)}$$

Résistance de l'anneau:

$$R_{an} := \frac{\rho_{AL}(T) \cdot 2 \cdot \lambda \cdot D_{an} \cdot 10^3}{Z2 \cdot S_{an}} \quad R_{an} = 1.479 \times 10^{-6} \text{ (ohm)}$$

Résistance de l'anneau ramenée a la barre:

$$K_{red} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{p}{Z2} \quad K_{red} = 0.449$$

$$R_{anramb} := \frac{R_{an}}{K_{red}^2} \quad R_{anramb} = 7.344 \times 10^{-6} \text{ (ohm)}$$

Résistance de l'anneau ramenée au stator:

$$\beta_{ob} := \frac{t1}{t2} \quad \beta_{ob} = 0.784$$

$$\alpha_{ob} := \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \beta_{ob}}{Z2} \quad \alpha_{ob} = 0.352$$

$$K_{ob} := \frac{\sin\left(\frac{\alpha_{ob}}{2}\right)}{\frac{\alpha_{ob}}{2}} \quad K_{ob} = 0.995$$

$$M := \left(\frac{4 \cdot m1}{Z2}\right) \cdot \left(\frac{W1 \cdot K_{en1}}{K_{ob}}\right)^2 \quad M = 3.59 \times 10^4$$

$$R_{anrams} := M \cdot R_{anramb} \quad R_{anrams} = 0.264 \text{ (ohm)}$$

Résistance active d'une phase rotorique:

$$R_2 := R_b + R_{anramb} \qquad R_2 = 6.793 \times 10^{-5} \text{ (ohm)}$$

Résistance d'une phase rotorique raménée au stator:

$$R_{2ram} := M \cdot R_2 \qquad R_{2ram} = 2.439 \text{ (ohm)}$$

Réactances de dispersions et perméances du rotor:

$$\lambda_{ob} := \frac{t_2 \cdot \beta_{ob}}{9.5 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu}} \qquad \lambda_{ob} = 1.097$$

$$I_{an} := \frac{I_2}{K_{red}} \qquad I_{an} = 461.595 \text{ (A)}$$

$$J_{an} := \frac{I_{an}}{S_{an}} \qquad J_{an} = 3.415 \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$K_{dd2} := \frac{9.15}{100 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot p} \right)^2} \qquad K_{dd2} = 0.017$$

$$\lambda_{2f} := \frac{2.3 \cdot D_{an}}{Z_2 \cdot L_i \cdot K_{red}^2} \cdot \log \left[\frac{4.7 \cdot D_{an}}{2 \cdot (h_{an} + b_{an})} \right] \qquad \lambda_{2f} = 0.201$$

$$\psi := 1$$

$$C_{\lambda} := \psi \cdot \left[0.66 - \left(\frac{bf_2}{2 \cdot d_{21}} \right) + \left(\frac{1 - \pi \cdot d_{21}}{8 \cdot S_b} \right)^2 \cdot \left(\frac{h_2 + 0.4 \cdot d_{22}}{3 \cdot d_{21}} \right) \right] \qquad C_{\lambda} = 0.527$$

$$\lambda_{2enc} := C_{\lambda} + \frac{hf_2}{bf_2} \qquad \lambda_{2enc} = 1.093$$

$$K_{dd2} := \frac{9.15}{100 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot p} \right)^2} \qquad K_{dd2} = 0.017$$

$$\lambda_{2d} := \frac{0.9 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{Z_2}{6 \cdot p}\right)^2 \cdot K_{dd2}}{\delta \cdot k\delta} \quad \lambda_{2d} = 1.875$$

$$\lambda_2 := \lambda_{2enc} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \quad \lambda_2 = 4.266$$

$$X_2 := 7.9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-9} \quad X_2 = 2.199 \times 10^{-4} \quad (\text{ohm})$$

Réactance du rotor ramenée au stator:

$$X_{2ram} := M \cdot X_2 \quad X_{2ram} = 7.893 \quad (\text{ohm})$$

Paramètre au démarrage:

Profondeur de pénétration:

$$\begin{aligned} \phi_1 &:= 0.44 & g_d &:= 1 & h_b &:= h_{enc2} \\ h_{pp} &:= \frac{h_b}{1 + \phi_1} & & & h_{pp} &= 13.958 \\ \xi_1 &:= 0.064 \cdot h_b \cdot \sqrt{g_d} & & & \xi_1 &= 1.286 \end{aligned}$$

La largeur à limite de pénétration:

$$b_{pp} := d_{21} - \left[\left(\frac{d_{21} - d_{22}}{h_2} \right) \cdot \left(h_{pp} - \frac{d_{21}}{2} \right) \right] \quad b_{pp} = 2.014 \quad (\text{mm})$$

Section de la barre pénétrée par le courant de démarrage:

$$S_{bdem} := \left[\frac{\pi \cdot (d_{21})^2}{8} \right] + \left[0.5 \cdot (d_{21} + b_{pp}) \cdot h_{pp} - 0.5 \cdot d_{21} \right]$$

$$S_{bdem} = 52.446 \quad (\text{mm}^2)$$

Résistance de la barre au démarrage:

$$K_{dep} := \frac{S_b}{S_{bdem}} \quad K_{dep} = 1.052$$

$$R_{bdem} := R_b \cdot K_{dep} \quad R_{bdem} = 6.374 \times 10^{-5} \quad (\text{ohm})$$

Résistance de la cage au démarrage:

$$R_{2dem} := R_{anramb} + R_{bdem} \qquad R_{2dem} = 7.108 \times 10^{-5} \text{ (ohm)}$$

Résistance de la cage au démarrage ramenée au stator:

$$R_{2demram} := M \cdot (R_{anramb} + R_{bdem}) \qquad R_{2demram} = 2.552 \text{ (ohm)}$$

Réactance de fuite au démarrage:

$$\psi_1 := 1$$

$$C\lambda_1 := C\lambda \cdot \psi_1 \qquad C\lambda = 0.527$$

$$\lambda_{2encdem} := C\lambda_1 + \frac{hf_2}{bf_2} \qquad \lambda_{2encdem} = 1.093$$

$$\lambda_{2dem} := \lambda_{2encdem} + \lambda_{2d} + \lambda_{2f} + \lambda_{ob} \qquad \lambda_{2dem} = 4.266$$

$$X_{2dem} := 7.9 \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot \lambda_{2dem} \cdot 10^{-9} \qquad X_{2dem} = 2.199 \times 10^{-4} \text{ (ohm)}$$

Réactance de fuite au démarrage ramannée au stator:

$$X_{2demram} := M \cdot X_{2dem} \qquad X_{2demram} = 7.893 \text{ (ohm)}$$

CALCUL DES PERTES ET DU RENDEMENT

Pertes principales dans fer:

Pertes dans les dents:

$$p_1 := 2.5 \cdot (w \cdot Kg^{-1})$$

$$G_{z1} := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot Li \cdot kfer \cdot [hz1 \cdot \pi \cdot (D1 + hz1) - Senc1 \cdot Z1]$$

$$G_{z1} = 4.591 \quad (\text{Kg})$$

$$pfz1 := 1.7 \cdot p_1 \cdot G_{z1} \cdot Bz1^2$$

$$pfz1 = 70.437 \quad (\text{W})$$

Pertes dans la culasse statorique:

$$G_{c1} := 7.8 \cdot 10^{-6} \cdot Li \cdot kfer \cdot hc1 \cdot \pi \cdot (Dext - hc1)$$

$$G_{c1} = 7.128 \quad (\text{Kg})$$

$$pfc1 := 1.7 \cdot p_1 \cdot G_{c1} \cdot Bc1^2$$

$$pfc1 = 82.474 \quad (\text{W})$$

$$Pfer := pfc1 + pfz1$$

$$Pfer = 152.911 \quad (\text{W})$$

Pertes électriques dans le cuivre et l'aluminium:

perles joules statorique:

$$P_{j1} := m1 \cdot R1 \cdot (In1)^2$$

$$P_{j1} = 179.297 \quad (\text{W})$$

perles joules rotorique:

$$m2 := 28$$

$$P_{j2} := m2 \cdot R2 \cdot (I2)^2$$

$$P_{j2} = 81.627 \quad (\text{W})$$

Perte mécanique:

$$\text{pour } 2p = 2 \quad K_t := 1.3 \cdot (1 - Dext \cdot 10^{-3})$$

$$\text{pour } 2p > 2 \quad K_t := 1$$

$$P_{mec} := K_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (Dext \cdot 10^{-2})^4$$

$$P_{mec} = 17.923 \quad (\text{W})$$

Pertes supplémentaires:

$$P_{\text{sup}} := 0.005 \cdot \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n} \quad P_{\text{sup}} = 17.241 \quad (\text{W})$$

Pertes totales:

$$P_t := P_{\text{fer}} + P_{j1} + P_{j2} + P_{\text{mec}} + P_{\text{sup}} \quad P_t = 449 \quad (\text{W})$$

Rendement de la machine:

$$\eta := \frac{P_n \cdot 10^3}{P_n \cdot 10^3 + P_t} \quad \eta = 0.87$$

Calcul de la résistance de magnétisation:

$$U_n := 380 \quad (\text{V})$$

$$P_{a10} := R_1 \cdot m_1 \cdot I_\mu^2 \quad P_{a10} = 146.728 \quad (\text{W})$$

$$I_{0a} := \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{mec}} + P_{a10}}{m_1 \cdot U_n} \quad I_{0a} = 0.279 \quad (\text{A})$$

$$R_m := \frac{X_m \cdot I_\mu}{I_{0a}} \quad R_m = 1.33 \times 10^3 \quad (\text{ohm})$$

CALCUL DES PERFORMANCES DU MOTEUR

caractéristique de fonctionnement du moteur:

La puissance rapportée du circuit secondaire au circuit primaire:

$$P_n := 3000 \quad (\text{W})$$

$$P'_2 := P_n + P_{\text{sup}} + P_{\text{mec}} \quad P'_2 = 3.035 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

Le glissement:

$$A := \left(\frac{3 \cdot U_n^2}{2 \cdot P'_2} \right) - R_1 \quad A = 66.864$$

$$R' := R_{2\text{ram}} \cdot \left[\left[\left(\frac{R_1}{R_{2\text{ram}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{X_{2\text{ram}}}{X_m} \right) \right]^2 \right] + \left[\left(\frac{X_1}{R_{2\text{ram}}} \right) \cdot \left(1 + \frac{X_{2\text{ram}}}{X_m} \right) + \frac{X_{2\text{ram}}}{R_{2\text{ram}}} \right]^2$$

$$R' = 90.357 \quad (\text{ohm})$$

$$B := 2 \cdot A + R'$$

$$B = 224.084$$

$$C1 := 1 + \frac{X1}{Xm}$$

$$C1 = 1.051$$

$$g := \frac{A - \sqrt{A^2 - C1^2 \cdot R2ram \cdot B}}{B}$$

$$g = 0.021$$

L'inductance équivalente:

$$R2eq := C1 \cdot R1 + \frac{C1^2 \cdot R2ram}{g}$$

$$R2eq = 133.778 \quad (\text{ohm})$$

$$X2eq := C1 \cdot X1 + C1^2 \cdot X2ram$$

$$X2eq = 14.759 \quad (\text{ohm})$$

$$Z2eq := \sqrt{R2eq^2 + X2eq^2}$$

$$Z2eq = 134.59 \quad (\text{ohm})$$

Calcul du courant secondaire:

$$I2 := \frac{Un}{Z2eq}$$

$$I2 = 2.823 \quad (\text{A})$$

Le facteur de puissance rotorique:

$$\cos\phi'2 := \frac{R2eq}{Z2eq}$$

$$\cos\phi'2 = 0.994$$

$$I''2 := \frac{Un}{Z2eq}$$

$$I''2 = 2.823 \quad (\text{A})$$

$$I'2 := C1 \cdot I''2$$

$$I'2 = 2.968 \quad (\text{A})$$

$$I0a := \frac{Pa10 + Pfer}{m1 \cdot Un}$$

$$I0a = 0.263 \quad (\text{A})$$

Le courant magnétisant:

$$p := 2$$

$$I0r := \frac{p \cdot F}{0.9 \cdot m1 \cdot W1 \cdot Ken1}$$

$$I0r = 3.297 \quad (\text{A})$$

Le courant total à vide:

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2} \quad I_0 = 3.307 \quad (\text{A})$$

Le courant absorbé:

$$\sin\phi^2 := \frac{X_{2eq}^2}{Z_{2eq}^2} \quad \sin\phi^2 = 0.11$$

$$I''_{2r} := I''_2 \cdot \sin\phi^2 \quad I''_{2r} = 0.31 \quad (\text{A})$$

$$I''_{2a} := I''_2 \cdot \cos\phi^2 \quad I''_{2a} = 2.806 \quad (\text{A})$$

$$I_{1r} := I_{0r} + I''_{2r} \quad I_{1r} = 3.606 \quad (\text{A})$$

$$I_{1a} := I_{0a} + I''_{2a} \quad I_{1a} = 3.069 \quad (\text{A})$$

$$I_{1\text{eff}} := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2} \quad I_1 = 4.736 \quad (\text{A})$$

Le facteur de puissance de la machine:

$$\cos\phi^2 := \frac{I_{1a}}{I_1} \quad \cos\phi^2 = 0.648$$

Puissance absorbée par le moteur:

$$P_a := m_1 \cdot U_n \cdot I_{1a} \quad P_a = 3.499 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

Vitesse de rotation du moteur:

$$N_2 := N \cdot (1 - g) \quad N_2 = 1.469 \times 10^3 \quad \left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$$

Le couple utile sur l'arbre du moteur:

$$P_n := 3000 \quad (\text{W})$$

$$C_u := \frac{9.55 \cdot P_n}{N_2} \quad C_u = 19.507 \quad (\text{Nm})$$

le rendement:

$$\eta_1 := \frac{P_n}{P_a} \quad \eta_1 = 0.857$$

Résistance équivalente au démarrage:

$$R_{eqdem} := C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot R2_{demram} \quad R_{eqdem} = 7.549 \quad (\text{ohm})$$

Réactance équivalente au démarrage:

$$K_v := 0.0825$$

$$\lambda_{enc1var} := \left(\frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{enc11} + 2 \cdot b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_B2 \quad \lambda_{enc1var} = 0.41$$

$$\lambda_{1var} := \lambda_{enc1var} + \lambda_{1d} \quad \lambda_{1var} = 1.908$$

$$\lambda_{enc2var} := \frac{h_{f2}}{b_{f2}} \quad \lambda_{enc2var} = 0.565$$

$$\lambda_{2var} := \lambda_{enc2var} + \lambda_{2d} \quad \lambda_{2var} = 2.44$$

$$X_{var} := \frac{C1 \cdot X1 \cdot \lambda_{1var}}{\lambda_1} + \frac{C1^2 \cdot X2_{ram} \cdot \lambda_{2var}}{\lambda_2} \quad X_{var} = 8.089 \quad (\text{ohm})$$

$$X_{const} := \frac{C1 \cdot X1 \cdot (\lambda_1 - \lambda_{1var})}{\lambda_1} + \frac{C1^2 \cdot X2_{demram} \cdot (\lambda_{2d} - \lambda_{2var})}{\lambda_{2d}} \quad X_{const} = 0.308 \quad (\text{ohm})$$

$$X_{eqdem} := X_{const} + K_v \cdot X_{var} \quad X_{eqdem} = 0.97 \quad (\text{ohm})$$

Capacité de surcharge:

$$g_{nom} := g \quad g_{cr} := C1 \cdot \frac{R2_{ram}}{X1 + C1 \cdot X2_{ram}} \quad g_{cr} = 0.183$$

$$R_{cr} := 2 \cdot R1 \cdot \frac{g_{cr}}{R2_{ram} \cdot C1} \quad R_{cr} = 0.641 \quad (\text{ohm})$$

$$C_s := \frac{\frac{g_{nom}}{g_{cr}} + \frac{g_{cr}}{g_{nom}} + R_{cr}}{2 + R_{cr}}$$

$$g_{Cmax} := \sqrt{\frac{(C1^2 \cdot R2demram)^2}{(C1 \cdot R1)^2 + Xeqdem^2}}$$

$$C_{max} := \frac{p \cdot m1 \cdot Un^2 \cdot \frac{R2demram}{g_{Cmax}}}{2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot \left[\left(C1 \cdot R1 + C1^2 \cdot \frac{R2demram}{g_{Cmax}} \right)^2 + Xeqdem^2 \right]}$$

$$C_{max} = 130.555 \quad (\text{Nm})$$

$$C_s := \frac{C_{max}}{C_u}$$

$$C_s = 6.693 \quad (\text{Nm})$$

Le courant au démarrage:

$$I_{1d} := \frac{Un}{\sqrt{Reqdem^2 + Xeqdem^2}}$$

$$I_{1d} = 49.92 \quad (\text{A})$$

$$\frac{I_{1d}}{I_1} = 10.541$$

Le couple de démarrage:

$$C_d := \frac{p \cdot m1 \cdot Un^2 \cdot R2demram}{2 \cdot \pi \cdot f1 \cdot (Reqdem^2 + Xeqdem^2)}$$

$$C_d = 121.4 \quad (\text{Nm})$$

$$\frac{C_d}{C_u} = 6.226$$

PARTIE II

CALCUL DE L'ECHAUFFEMENT DE LA MACHINE(CALCUL THERMIQUE)

Calcul de l'écart de température entre la surface intérieur de noyau statorique et celle de l' air à l'intérieur du moteur:

$$\underline{K0} := 1.07 \qquad \underline{K} := 0.22 \qquad \alpha 1 := 15 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta\theta_{\text{surf}} := K \cdot \frac{K0 \cdot \frac{2 \cdot Li \cdot Pj1}{Lw1} + Pfer}{\pi \cdot D1 \cdot Li \cdot \alpha 1} \qquad \Delta\theta_{\text{surf}} = 8.312 \quad ^\circ\text{C}$$

Calcul de la chute de température dans l'isolation de la partie d'encoche de l'enroulement statorique:

$$jfr := 2 \cdot h1 + benc_{11} + \pi \cdot \frac{benc_{12}}{2} \qquad jfr = 40.544 \qquad \frac{diso}{dnu} = 1.105$$

$$\Gamma_{eq} \equiv 16 \cdot 10^{-5} \qquad \Gamma_{eq1} \equiv 18 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta\theta_{\text{iso}} := \left(\frac{K0 \cdot Pj1 \cdot \frac{2 \cdot Li}{Lw1}}{jfr \cdot Z1 \cdot Li} \right) \cdot \left(\frac{e1}{\Gamma_{eq}} + \frac{benc_{11} + benc_{12}}{16 \cdot \Gamma_{eq1}} \right) \qquad \Delta\theta_{\text{iso}} = 1.364 \quad ^\circ\text{C}$$

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

$$haxe \leq 132 \qquad Lfr1 := (0.19 + 0.1 \cdot p) \cdot b1moy + 10 \qquad Lfr1 = 47.055 \quad (\text{mm})$$

$$\Delta\theta_{\text{fr1}} := \frac{K \cdot K0 \cdot Pj1 \cdot \frac{2 \cdot Lf1}{Lw1}}{2 \cdot \pi \cdot D1 \cdot Lfr1 \cdot \alpha 1} \qquad \Delta\theta_{\text{fr1}} = 4.921 \quad ^\circ\text{C}$$

Calcul de la chute de température dans l'isolation des parties frontales de l'enroulement statorique:

$$\Delta\theta_{\text{isofr1}} := \left(\frac{K0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot L_{f1}}{L_{w1}}}{2 \cdot j_{fr} \cdot L_{f1} \cdot Z1} \right) \cdot \left(\frac{h1}{12 \cdot \Gamma_{eq1}} \right) \quad \Delta\theta_{\text{isofr1}} = 0.129 \quad ^\circ\text{C}$$

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

$$\Delta\theta'1 := (\Delta\theta_{\text{surf}} + \Delta\theta_{\text{iso}}) \cdot \frac{2 \cdot L_i}{L_{w1}} + (\Delta\theta_{\text{fr1}} + \Delta\theta_{\text{isofr1}}) \cdot \frac{2 \cdot L_{f1}}{L_{w1}} \quad \Delta\theta'1 = 7.188 \quad ^\circ\text{C}$$

Surface conventionnelle de refroidissement du moteur:

$$h_p := 20 \quad n_p := 16.3 \quad h_{pnp} := 300$$

$$S_{\text{mot}} := (\pi \cdot D_{\text{ext}} + 8 \cdot h_{pnp}) \cdot (L_i + 2 \cdot L_{f1}) \quad S_{\text{mot}} = 6.575 \times 10^5 \quad (\text{mm}^2)$$

pertes transmises dans l'air à l'intérieur du moteur:

$$P' := P_t - (K0 - 1) \cdot (P_{j1} + P_{j2}) \quad P' = 430.735 \quad (\text{W})$$

$$P_{\text{elsurf}} := K0 \cdot P_{j1} \cdot \frac{2 \cdot L_i}{L_{w1}} \quad P_{\text{elsurf}} = 88.67 \quad (\text{W})$$

$$P_{\text{air}} := P' - (1 - K) \cdot (P_{\text{elsurf}} + P_{\text{fer}}) - 0.9 \cdot P_{\text{mec}} \quad P_{\text{air}} = 226.171 \quad (\text{W})$$

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

$$\alpha_{\text{air}} := 2.22 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta\theta_{\text{air}} := \frac{P_{\text{air}}}{S_{\text{mot}} \cdot \alpha_{\text{air}}} \quad \Delta\theta_{\text{air}} = 15.494 \quad ^\circ\text{C}$$

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

$$\Delta\theta_1 := \Delta\theta'_1 + \Delta\theta_{\text{air}} \qquad \Delta\theta_1 = 22.682 \quad ^\circ\text{C}$$

température moyenne de l'enroulement statorique:

$$\theta_{\text{enr1}} := \Delta\theta_1 + 40 \qquad \theta_{\text{enr1}} = 62.682 \quad ^\circ\text{C}$$

CALCUL DE LA VENTILATION

Calcul:

Dimensions du ventilateur:

Le débit d'air du ventilateur:

$$\text{haxe} := 100 \text{ (mm)} \qquad D_{v2} := 1.6 \cdot \text{haxe} \qquad D_{v2} = 160 \qquad M_t := 1.8$$

$$Q_b := 0.9 \cdot 10^{-3} \cdot M_t \cdot \text{Pair} \cdot \frac{\sqrt{N_2 \cdot 10^{-3} \cdot D_{v2} \cdot 10^{-2}}}{\Delta\theta_{\text{air}}} \qquad Q_b = 0.036$$

La vitesse linéaire périphérique des ailettes:

$$V_e := \pi \cdot D_{v2} \cdot \frac{N_2}{60 \cdot 10^3} \qquad V_e = 12.304 \quad \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

La surface transversale du canal entre les palettes à la sortie d'air:

$$S_p := 2 \cdot 10^6 \cdot \frac{Q_b}{0.45 \cdot V_e} \qquad S_p = 1.309 \times 10^4 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Résistance aérodynamique de la chaîne de ventilation:

$$Z := \frac{12.3 \cdot (N_2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{\text{ext}} \cdot 10^{-2})^2}{Q_b^2} \qquad Z = 5.699 \times 10^4$$

La vitesse à l'intérieur de l'ailette:

$$V_1 := \sqrt{V_e^2 - 1.85 \cdot Z \cdot Q_b^2} \qquad V_1 = 3.586$$

Calcul du nombre d'ailettes:

$$Dv1 := \frac{60 \cdot 10^3 \cdot V1}{N2}$$

$$Dv1 = 146.48$$

$$Np := 6 \cdot \frac{Dv2}{Dv2 - Dv1}$$

$$Np = 71.008$$

$$\text{round}(Np) = 71 \text{ ailettes}$$

La surface d'une ailette:

$$Sbp := Sp \cdot \frac{Dv2 - Dv1}{2 \cdot \pi \cdot Dv2}$$

$$Sbp = 176.093 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Caractéristique de la machine

$$\eta_n := 0.87 \quad D_{ext} := 168 \text{ (mm)}$$

$$N := 1500 \left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$$

$$K_t := 1.3 \cdot (1 - D_{ext} \cdot 10^{-3})$$

$$K_t = 1.082$$

$$\text{Pour } 2 \cdot p > 2$$

$$K_t := 1 \text{ (arrondissement)}$$

$$P_{mec} := K_t \cdot (N \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{ext} \cdot 10^{-2})^4$$

$$P_{mec} = 17.923 \text{ (W)}$$

$$P_n := 0,10..4000$$

$$P_{sup}(P_n) := 0.005 \cdot \frac{P_n}{\eta_n}$$

$$P'2(P_n) := P_n + P_{sup}(P_n) + P_{mec}$$

$P^2(P_n) =$

	0
0	17.923
1	27.981
2	38.038
3	48.096
4	58.153
5	68.211
6	78.268
7	88.326
8	98.383
9	108.441
10	118.498
11	128.556
12	138.613
13	148.67
14	158.728
15	168.785

$P_{sup}(P_n) =$

	0
0	0
1	0.057
2	0.115
3	0.172
4	0.23
5	0.287
6	0.345
7	0.402
8	0.46
9	0.517
10	0.575
11	0.632
12	0.69
13	0.747
14	0.805
15	0.862

$$A(P_n) := -R1 + \frac{3 \cdot Un^2}{2 \cdot P^2(P_n)}$$

$$B(P_n) := 2A(P_n) + R'$$

$$g_{eq}(P_n) := \frac{A(P_n) - \sqrt{A(P_n)^2 - C1^2 \cdot R2_{ram} \cdot B(P_n)}}{B(P_n)}$$

$$R2_{eq}(P_n) := C1 \cdot R1 + \frac{C1^2 \cdot R2_{ram}}{g_{eq}(P_n)}$$

$$Z2_{eq}(P_n) := \sqrt{R2_{eq}(P_n)^2 + X2_{eq}^2}$$

$$I''2(P_n) := \frac{Un}{Z2_{eq}(P_n)}$$

$$\cos\phi''2(P_n) := \frac{R2_{eq}(P_n)}{Z2_{eq}(P_n)}$$

$$I''2a(P_n) := I''2(P_n) \cdot \cos\phi''2(P_n)$$

$$Pa_{10} := 146.728 \quad (W)$$

$$I_{1a}(P_n) := I_{0a} + I''2a(P_n)$$

$$I_{0a} := \frac{Pa_{10} + P_{fer} + P_{mec}}{3 \cdot Un}$$

$$\sin^2(\phi_2(P_n)) := \frac{X_{2eq}}{Z_{2eq}(P_n)}$$

$$I''_{2r}(P_n) := I''_2(P_n) \cdot \sin^2(\phi_2(P_n))$$

$$I_{0r} := \frac{p \cdot F}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot Ken_1}$$

$$I_{1r}(P_n) := I_{0r} + I''_{2r}(P_n)$$

$$R_{2eq}(P_n) =$$

	0
0	2.416·10 ⁴
1	1.548·10 ⁴
2	1.138·10 ⁴
3	9·10 ³
4	7.442·10 ³
5	6.344·10 ³
6	5.528·10 ³
7	4.898·10 ³
8	4.396·10 ³
9	3.988·10 ³
10	3.649·10 ³
11	3.363·10 ³
12	3.118·10 ³
13	2.907·10 ³
14	2.722·10 ³
15	2.56·10 ³

$$Z_{2eq}(P_n) =$$

	0
0	2.416·10 ⁴
1	1.548·10 ⁴
2	1.138·10 ⁴
3	9·10 ³
4	7.442·10 ³
5	6.344·10 ³
6	5.528·10 ³
7	4.898·10 ³
8	4.396·10 ³
9	3.988·10 ³
10	3.649·10 ³
11	3.363·10 ³
12	3.118·10 ³
13	2.907·10 ³
14	2.722·10 ³
15	2.56·10 ³

$$g_{eq}(P_n) =$$

	0
0	1.115·10 ⁻⁴
1	1.742·10 ⁻⁴
2	2.368·10 ⁻⁴
3	2.995·10 ⁻⁴
4	3.623·10 ⁻⁴
5	4.25·10 ⁻⁴
6	4.878·10 ⁻⁴
7	5.507·10 ⁻⁴
8	6.136·10 ⁻⁴
9	6.765·10 ⁻⁴
10	7.394·10 ⁻⁴
11	8.024·10 ⁻⁴
12	8.654·10 ⁻⁴
13	9.284·10 ⁻⁴
14	9.915·10 ⁻⁴
15	1.055·10 ⁻³

$$I''_2(P_n) =$$

	0
0	0.016
1	0.025
2	0.033
3	0.042
4	0.051
5	0.06
6	0.069
7	0.078
8	0.086
9	0.095
10	0.104
11	0.113
12	0.122
13	0.131
14	0.14
15	0.148

$$I_{1l}(P_n) := \sqrt{I_{1a}(P_n)^2 + I_{1r}(P_n)^2}$$

$I_{1a}(P_n) =$

	0
0	0.279
1	0.287
2	0.296
3	0.305
4	0.314
5	0.323
6	0.332
7	0.34
8	0.349
9	0.358
10	0.367
11	0.376
12	0.385
13	0.394
14	0.402
15	0.411

$I_{1r}(P_n) =$

	0
0	3.297
1	3.297
2	3.297
3	3.297
4	3.297
5	3.297
6	3.297
7	3.297
8	3.297
9	3.297
10	3.297
11	3.297
12	3.297
13	3.297
14	3.298
15	3.298

$$I_{n1}(P_n) := \frac{P_n}{3 \cdot U_n \cdot \cos(\phi_n) \cdot \eta_n}$$

$$I_{2}(P_n) := \frac{1.11 \cdot I_{n1}(P_n) \cdot 2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot \cos(\phi_n) \cdot K_{en1}}{Z_2}$$

$$\cos\phi(P_n) := \frac{I_{1a}(P_n)}{I_1(P_n)}$$

$$P_{j1}(P_n) := m_1 \cdot I_{n1}(P_n)^2 \cdot R_1$$

$$P_{j2}(P_n) := m_2 \cdot I_2(P_n)^2 \cdot R_2$$

$\cos\phi(P_n) =$

	0
0	0.084
1	0.087
2	0.089
3	0.092
4	0.095
5	0.097
6	0.1
7	0.103
8	0.105
9	0.108
10	0.111
11	0.113
12	0.116
13	0.119
14	0.121
15	0.124
16	0.126
17	0.129
18	0.132

$P_{j1}(P_n) =$

	0
0	0
1	$1.992 \cdot 10^{-3}$
2	$7.969 \cdot 10^{-3}$
3	0.018
4	0.032
5	0.05
6	0.072
7	0.098
8	0.127
9	0.161
10	0.199
11	0.241
12	0.287
13	0.337
14	0.39
15	0.448

$P_{j2}(P_n) =$

	0
0	0
1	$9.07 \cdot 10^{-4}$
2	$3.628 \cdot 10^{-3}$
3	$8.163 \cdot 10^{-3}$
4	0.015
5	0.023
6	0.033
7	0.044
8	0.058
9	0.073
10	0.091
11	0.11
12	0.131
13	0.153
14	0.178
15	0.204

$$Pn := 0, 50.. 5500$$

$$Ptota(Pn) := Pj1(Pn) + Pj2(Pn) + Pfer + Pmec + Psup(Pn)$$

$$P1(Pn) := Pn + Ptota(Pn) \quad \eta1(Pn) := \frac{Pn}{Pn + Ptota(Pn)}$$

Ptota(Pn) =

	0
0	170.835
1	171.195
2	171.699
3	172.349
4	173.144
5	174.084
6	175.168
7	176.398
8	177.772
9	179.292
10	180.956
11	182.766
12	184.72
13	186.819
14	189.064
15	191.453

P1(Pn) =

	0
0	170.835
1	221.195
2	271.699
3	322.349
4	373.144
5	424.084
6	475.168
7	526.398
8	577.772
9	629.292
10	680.956
11	732.766
12	784.72
13	836.819
14	889.064
15	941.453

η1(Pn) =

	0
0	0
1	0.226
2	0.368
3	0.465
4	0.536
5	0.59
6	0.631
7	0.665
8	0.692
9	0.715
10	0.734
11	0.751
12	0.765
13	0.777
14	0.787
15	0.797

$$Pe := 4.051$$

$$C1 := 1 + \frac{X1}{Xm}$$

$$C'u(Pn) := \frac{9.55 \cdot Pn \cdot 10^3}{N \cdot (1 - geq(Pn))}$$

C'u(Pn) =

	0
0	0
1	318.469
2	637.138
3	956.008
4	1.275 · 10 ³
5	1.594 · 10 ³
6	1.914 · 10 ³
7	2.234 · 10 ³
8	2.553 · 10 ³
9	2.874 · 10 ³
10	3.194 · 10 ³
11	3.514 · 10 ³
12	3.835 · 10 ³
13	4.156 · 10 ³
14	4.477 · 10 ³
15	4.799 · 10 ³

$$C'_{elm}(N) := \frac{p \cdot m_1 \cdot U_n^2 \cdot \frac{R_{2demram}}{\frac{N_2 - N}{N_2}}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + \frac{C_1^2 \cdot R_{2demram}}{\frac{N_2 - N}{N_2}} \right)^2 + X_{eqdem}^2 \right]}$$

$$I_{1d}(N) := \frac{U_n}{\sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 + \frac{C_1^2 \cdot R_{2demram}}{\frac{N_2 - N}{N_2}} \right)^2 + X_{eqdem}^2}}$$

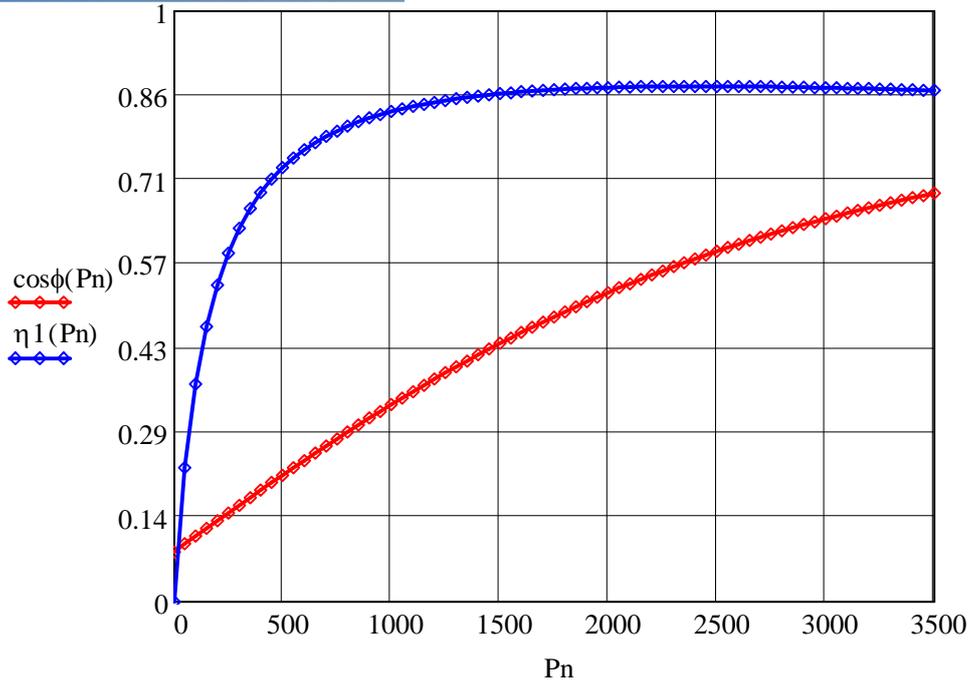
$N := 0, 50.. 1500$

$C'_{elm}(N) =$

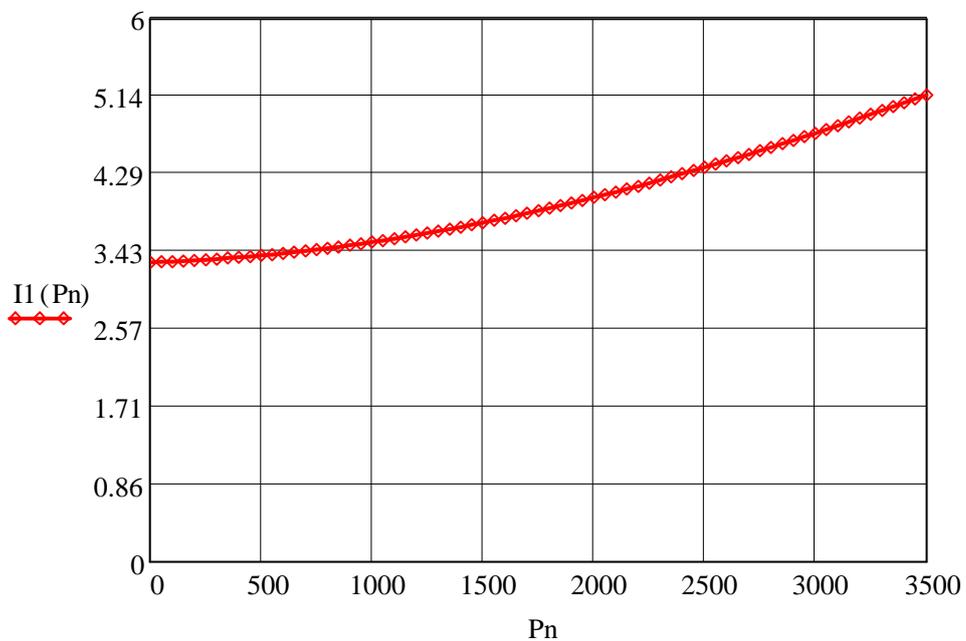
	0
0	121.451
1	122.538
2	123.6
3	124.63
4	125.621
5	126.562
6	127.442
7	128.249
8	128.968
9	129.58
10	130.065
11	130.398
12	130.55
13	130.485
14	130.163

$I_{1d}(N) =$

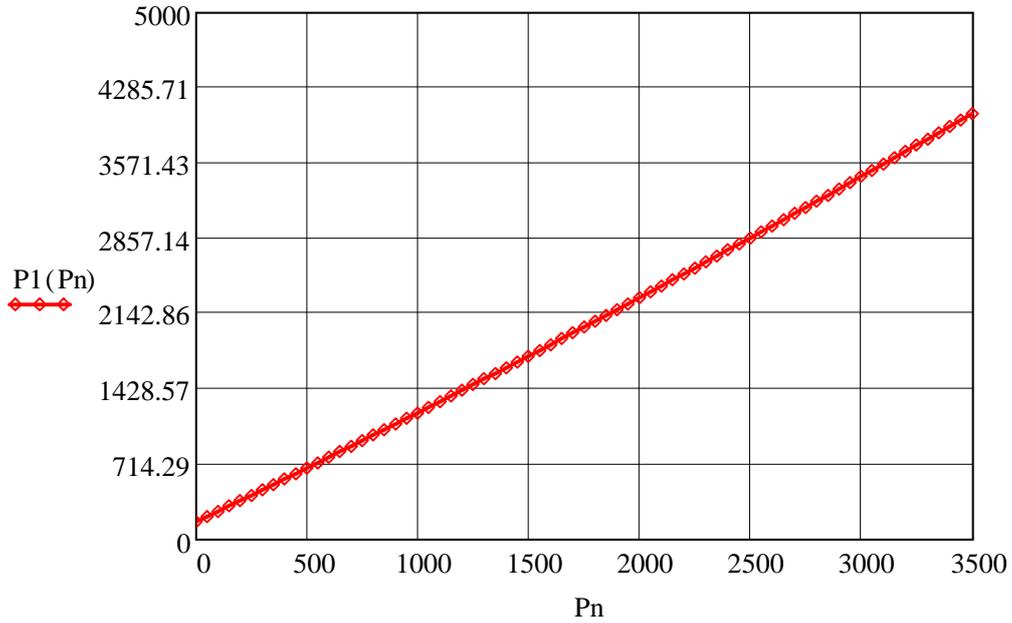
	0
0	49.92
1	49.282
2	48.615
3	47.917
4	47.186
5	46.42
6	45.616
7	44.77
8	43.881
9	42.944
10	41.955
11	40.91
12	39.804
13	38.632
14	37.387
15	36.064



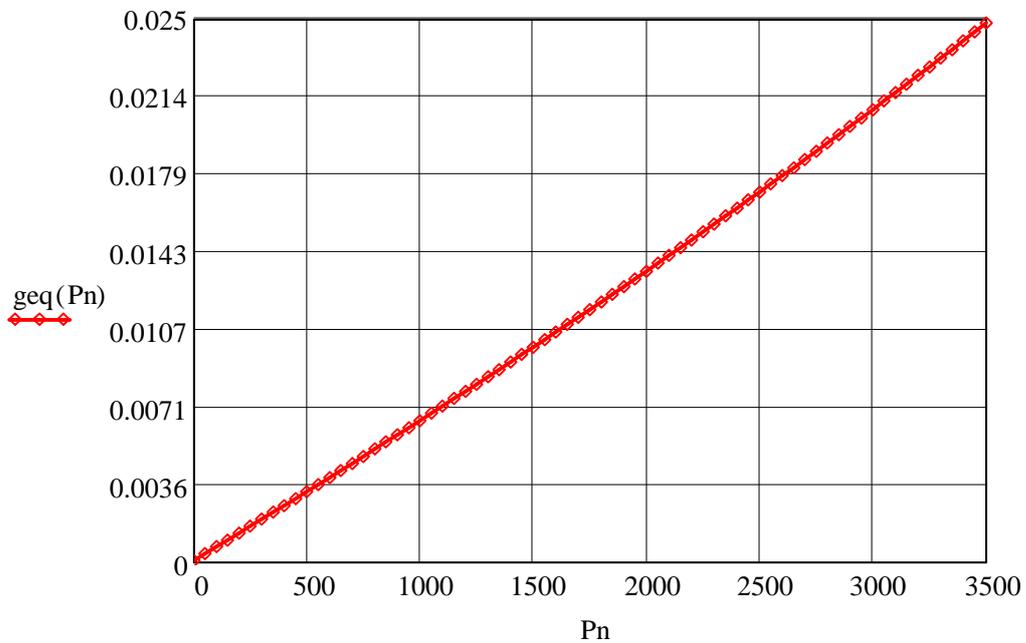
Courbe1: Le Rendement et le facteur de puissance en fonction de la puissance utile



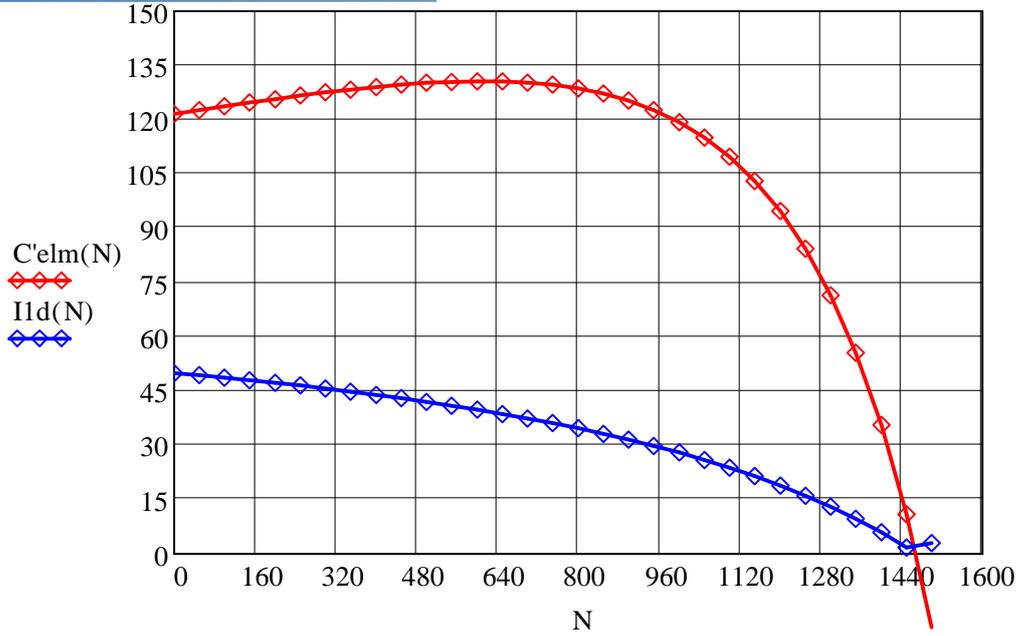
Courbe 2: Le courant absorbé en fonction de la puissance utile



Courbe3 :La puissance absorbée en fonction de la puissance utile



Courbe 4:Le glissement en fonction de la puissance utile



Courbe 5 : caractéristiques mécanique et le courant de démarrage en fonction de la vitesse



PDF
Complete

*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

[**Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features**](#)



PDF
Complete

*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

**[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)**



*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

**[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)**



PDF
Complete

*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

**[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)**



PDF
Complete

*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

**[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)**



PDF
Complete

*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

**[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)**



PDF
Complete

*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

**[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)**



*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

)



PDF
Complete

*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

**[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)**



PDF
Complete

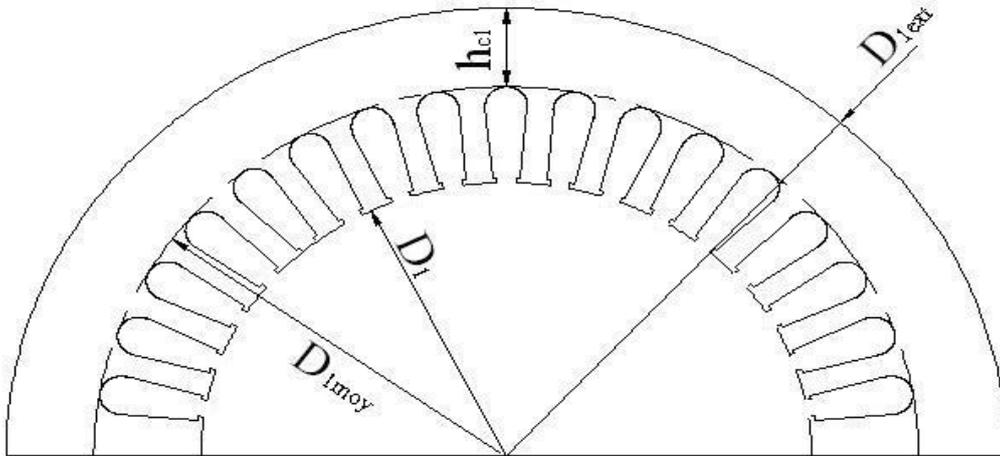
*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

**[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)**

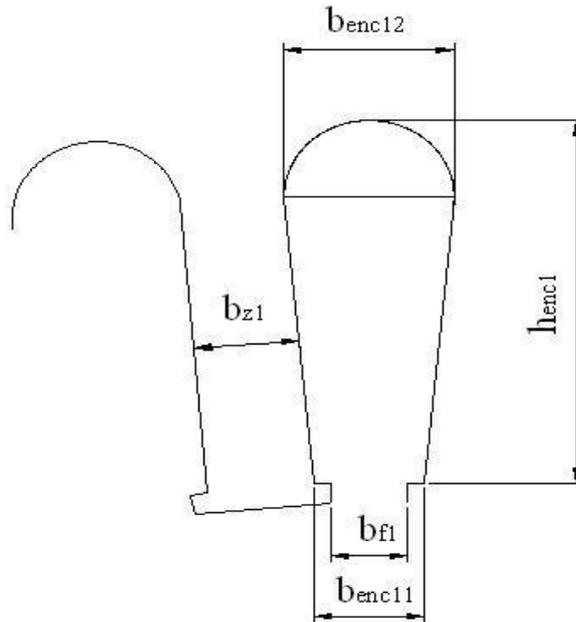
Après avoir terminé le programme, on conclut que :

Le volume du moteur a augmenté de $1/3$ par rapport au volume initial, le facteur de puissance a diminué donc il faut faire un compromis, c'est-à-dire choisir entre un bon rendement et un bon facteur de puissance, car il est peu aisé d'obtenir les deux en même temps. Les résultats trouvés dans les caractéristiques confirment les résultats calculés donc le programme est très précis, la méthode suggérée n'est pas unique et invariante. Elle offre une marge de manœuvre quant au choix des valeurs de certains paramètres pour lesquels on doit faire des compromis. Le résultat considéré comme final doit quelque fois faire l'objet de changement afin de satisfaire aux exigences visées.

La conception et l'amélioration des moteurs asynchrones triphasés ont été conçus dans le but d'ajouter aux connaissances théoriques déjà acquises sur leurs fonctionnements, le calcul des moteurs asynchrones est un domaine très vaste, nous souhaitons que d'autres études sur ce sujet prennent en considération d'autres paramètres comme l'amélioration du facteur de puissance.

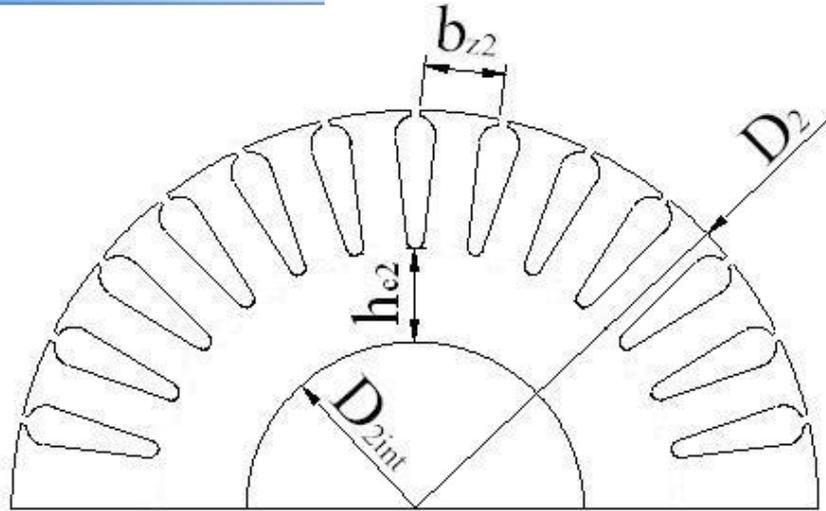


Annexe 02 : représente l'encoche statorique ovale semi-ouverte.

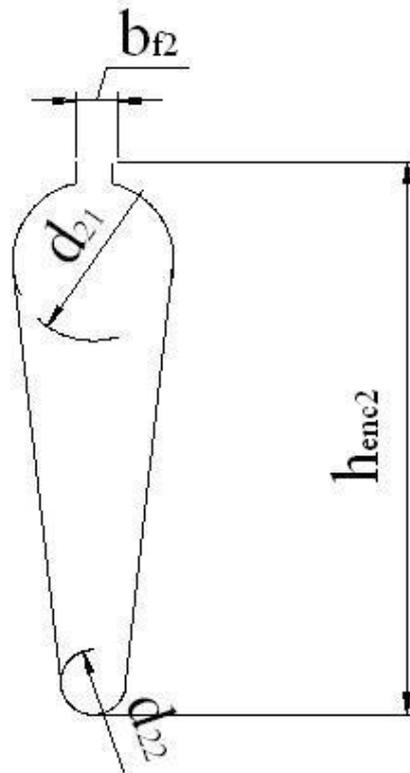


rotorique.

[Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features](#)



Annexe 04 : représente l'encoche rotorique ovale semi-ouverte.



du champ magnétique dans la culasse qui

B(H)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.4	52	53	54	55	56	57	58	59	60	62
0.5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	79
0.6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0.7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0.8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0.9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1.0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1.1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1.2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1.3	320	327	334	341	349	359	365	373	382	391
1.4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1.5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1.6	750	788	826	864	902	946	982	1020	1070	1110
1.7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1.8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1.9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2.0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8409	9000	9700

**du champ magnétique dans la dent statorique
et rotorique qui correspond a Bz1 et Bz2.**

B(H)	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	585	585
1,4	586	595	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	706	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2320	2480	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3500	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5110	5440	5740	5740	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	9940	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

ion de 2P.

hauteur d'axe [mm]	2P=2	2P=4	2P=6
63	4	2	2
71	4	2	2
80-100	4	3	2
112-132	4	3	3
160	6	4	3
180-225	6	4	4
250	8	5	4
280-355	8	5	4

Annexe 08 : représente Krr1 en fonction de Q1.

Q1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8
Krr1	-	0,0285	-	0,0141	0,0065	0,0052	-	-

nction de Z2/P.

Q1	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

Annexe 10 : représente 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

es extérieurs statorique (D_{ext}) des machines
auteurs d'axe.

h,mm	56	63	71	80	90	
D_{ext}, mm	81-96	110-108	116-122	131-139	149-157	
h,mm	100	112	132	160	180	
D_{ext}, mm	168-175	191-197	225-233	272-285	313-322	
h,mm	200	225	250	280	315	255
D_{ext}, mm	349-359	392-406	437-452	520-530	590	660

Annexe 12 : Représente le coefficient K_D en fonction du nombre de pôles $2p$.

$2p$	2	4	6	8	10-12
K_D	0.52-0.6	0.62-0.68	0.7-0.72	0.72-0.75	0.75-0.77

Annexe 13: Représente les sections normalisées.

[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

	<i>e nu (dnu) en mm</i>	<i>Diamètre avec isolation (diso) en mm</i>
		0.125
		0.131
		0.139
		0.145
		0.153
		0.161
		0.170
		0.181
		0.192
		0.203
		0.215
		0.225
		0.236
		0.250
		0.262
		0.276
		0.290
		0.307
		0.322
		0.344
		0.360
		0.381
		0.403
		0.424
		0.450
		0.478
		0.503
		0.531
		0.556
		0.576
		0.587
		0.619
		0.640
		0.661
		0.692
		0.713
		0.735
		0.776
		0.817
		0.848
		0.869
		0.890
		0.921
		0.952
		0.973
		1.0.24
		1.076
		1.137
		1.199
		1.260
		1.332
		1.404

Click Here to upgrade to Unlimited Pages and Expanded Features

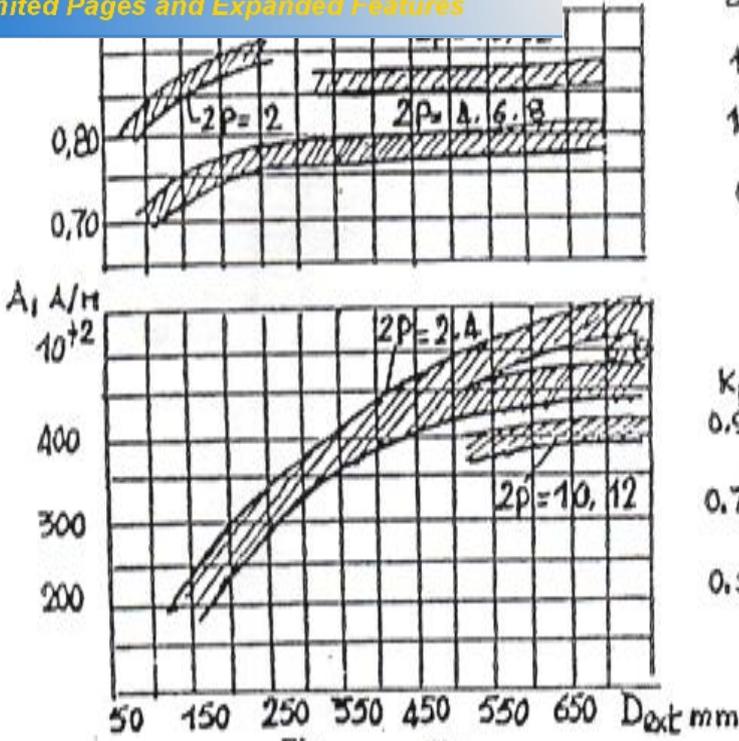


Fig 6.2 Fig 6.3

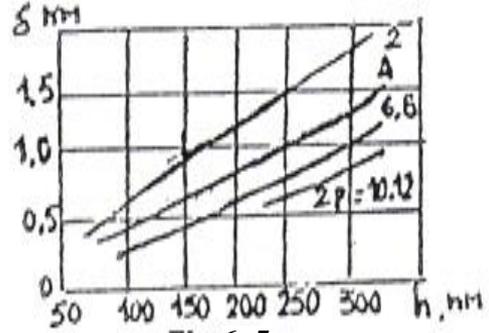


Fig 6.5

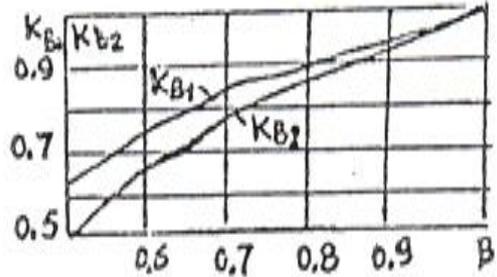


Fig 6.6

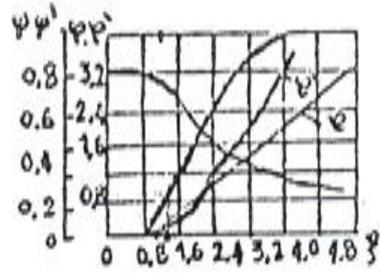
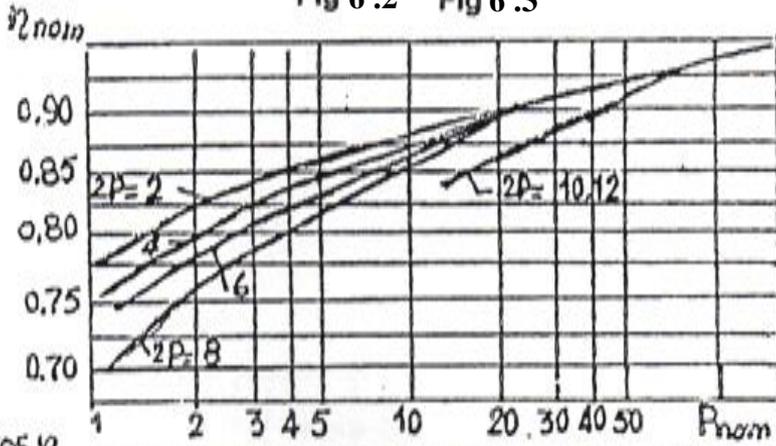


Fig 6.7

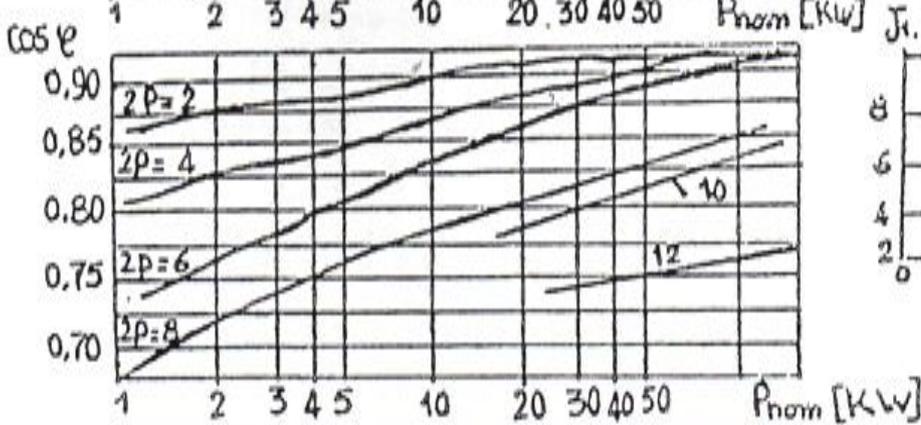


Fig 6.4

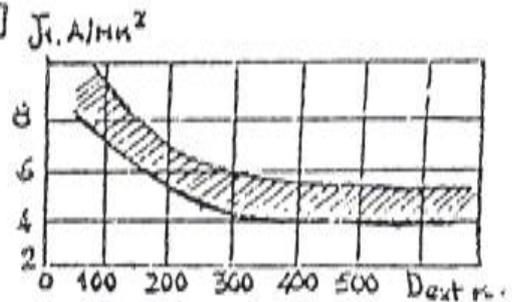


Fig 6.8

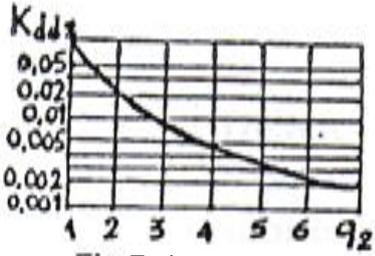


Fig 7.1

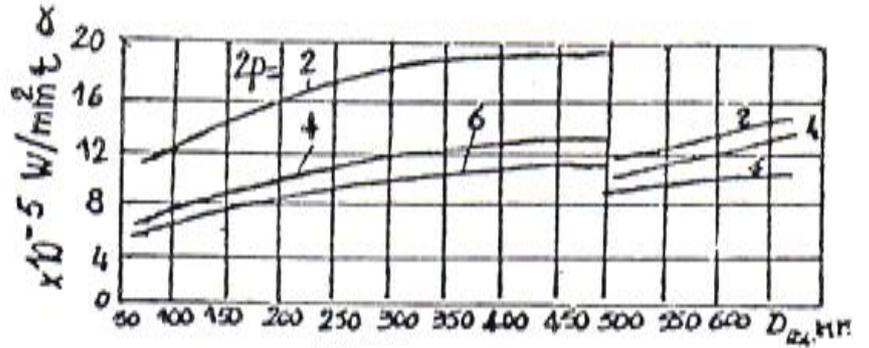


Fig 7.5

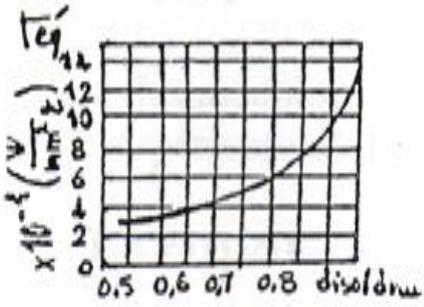


Fig 7.2

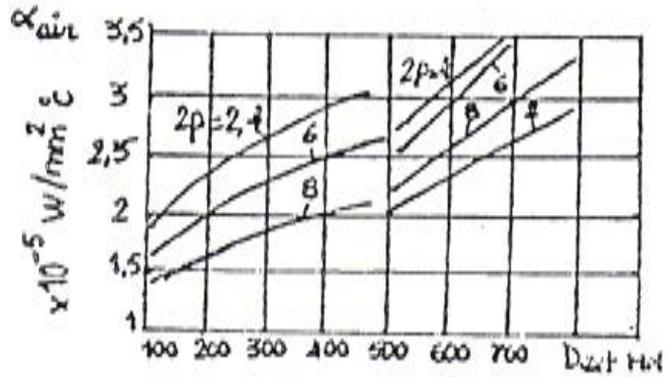


Fig 7.6

Fig 7.3

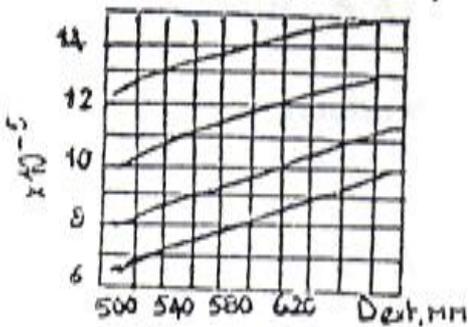
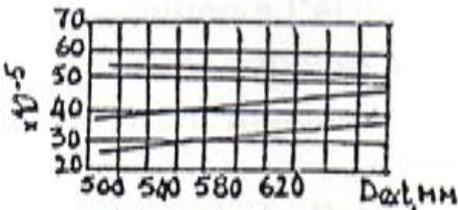


Fig 7.4

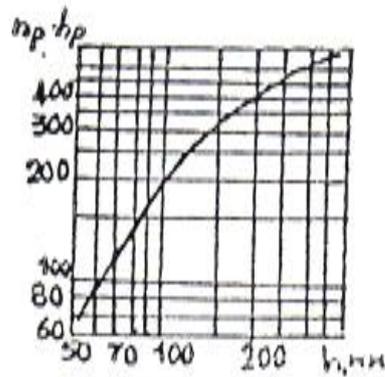


Fig 7.7

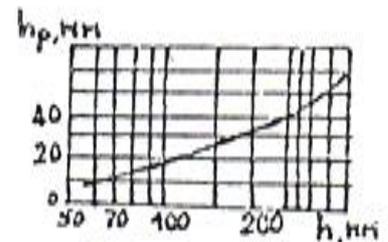


Fig 7.8



Cahier De Charge

Puissance nominale : $P_n = 3 \text{ KW}$.

Tension nominale : $U_{n1} = 380 \text{ V}$.

Nombre de paires de pôles : $P = 2$.

Fréquence du réseau d'alimentation : $f = 50 \text{ Hz}$.

Facteur de puissance : $\cos \phi_n = 0,83$.

Rendement : $\eta_n = 87 \%$.

Hauteur d'axe : $h = 100 \text{ mm}$.

Nombre de phase : $m = 3$.

Classe d'isolation : F.

Degré de protection : IP 54.

Système de refroidissement : IC 0141.



*Your complimentary
use period has ended.
Thank you for using
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

- [1].KATSMAN M.M .Calcul et construction des machines électrique.
Edition Ecole Supérieur de MOSCOU.1984.
- [2].A.FOUILLE. Machines électriques à courants alternatifs. Tome II
Edition Ecoles Nationales d'Ingénieur. FRANCE.1973.
- [3].A.FOUILLE. Problèmes d'électrotechnique à l'usage des ingénieurs. Tome I
Edition Ecoles Nationales d'Ingénieur. FRANCE.1986.
- [4].AMEUR.T, ANKOUR.A et ARTBAS.M. Conception d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écuriel alimenté par un convertisseur de fréquence. Mémoire d'ingénieur.
Université de Tizi-Ouzou.2008
- [5].LARBES.DJ, LARBI.F et SADALI.O. Caractérisation d'un acier St60-2 utilisé pour la fabrication d'arbres des moteurs asynchrones. Mémoire d'ingénieur.
Université de Tizi-Ouzou.2008
- [6].KARRICHE.y, MOUKHTARI.DJ et OUFFAD.A. Calcul d'un moteur asynchrone à rotor creux (servomoteur). Mémoire d'ingénieur.
Université de Tizi-Ouzou.2000
- [7].Réal-Paul BOUCHARD et GUY OLIVIER. Conception de moteurs asynchrones triphasés.
Edition Presses internationales polytechnique. CANADA 1997