

29/75

UNIVERSITÉ D'ALGER

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

الدراسة الوطنية للعلوم الهندسية
DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ
المكننة

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

الدراسة الوطنية للعلوم الهندسية
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE
CONSTRUCTION D'UN
MOTEUR ASYNCHRONE

A CAGE D'ÉCUREUIL 11 PLANCHES

3KW / 1KW

3000 tr/mn / 1000 tr/mn

Proposé par :
CAROL SAAL

Étudié par :
AHMED ZEKKOUR

Professeur D^r Ingénieur

PROMOTION 1975

UNIVERSITÉ D'ALGER

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

CONSTRUCTION D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

A CAGE D'ÉCUREUIL

3KW / 1KW

3000 tr/mn / 1000 tr/mn

Proposé par :

CAROL SAAL

Professeur D^r Ingénieur

Étudié par :

AHMED ZEKKOUR

PROMOTION 1975

//) E D I C A C E



M E S P A R E N T S

E T

A M I S

Σ O M M A I R E

=====

Page

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION :

Aperçu sur le bobinage dans la machine .. 1

I : Circuit magnétique 2

II : Dispersion 8

III : Pertes 18

IV : Echauffement et refroidissement 27

CALCUL DU MOTEUR

A : Dimensions principales 36

B : Parametres du moteur en regime de travail
(resistance et reactance) 42

C : Enroulements - Encoches - Dos rotorique 45

D : Parametres de travail du moteur 50

E	:	Calcul du circuit magnetique	57
F	:	Pertes en fer et pertes mecaniques	68
G	:	Diagramme du cercle	72
H	:	Valeurs nominales - C_{max}/C_n -	79
I	:	Caracteristiques de demarrage	81
		TABLEAUX :	
		- Caracteristiques de demarrage pour 1 kwatt - 1000 trs/mn	87
		- Caracteristiques de travail pour 1 kwatt - 1000 trs/mn	88
		- Caracteristiques de demarrage pour 3 kwatts - 3000 trs/mn	89
		- Caracteristiques de travail pour 3 kwatts - 3000 trs/mn	90
J	:	Determination de l'accroissement de temperature..	91
K	:	Calcul mecanique de l'arbre	93
H	:	Procedé technologique pour le sous ensemble du rotor	95
M	:	Protection de la machine électrique calculée ..	94

N :	Conduite du calcul du prix de revient de la	
	machine	100
CONCLUSION	100

E	:	Calcul du circuit magnetique	57
F	:	Pertes en fer et pertes mecaniques	68
G	:	Diagramme du cercle	72
H	:	Valeurs nominales - C_{max}/C_n -	79
I	:	Caracteristiques de demarrage	81
		TABLEAUX :	
		- Caracteristiques de demarrage pour 1 kwatt - 1000 trs/mn	87
		- Caracteristiques de travail pour 1 kwatt - 1000 trs/mn	88
		- Caracteristiques de demarrage pour 3 kwatts - 3000 trs/mn	89
		- Caracteristiques de travail pour 3 kwatts - 3000 trs/mn	90
J	:	Determination de l'accroissement de temperature..	91
K	:	Calcul mecanique de l'arbre	93
B	:	Procedé technologique pour le sous ensemble du rotor	95
M	:	Protection de la machine électrique calculée ..	98

S O M M A I R E

=====

Page

AVANT-PROPOS

INTRODUCTION :

Aperçu sur le bobinage dans la machine .. 1

I : Circuit magnétique 2

II :
Dispersion 8

III :
Pertes 18

IV :
Echauffement et refroidissement 27


CALCUL DU MOTEUR

A :
Dimensions principales 36

B :
Parametres du moteur en regime de travail
(resistance et reactance) 42

C :
Enroulements - Encoches - Dos rotorique 45

D :
Parametres de travail du moteur 50

) E D I C A C E



M E S P A R E N T S

E T

A M I S

- REMERCIEMENTS -

J'ai le plaisir d'adresser mes très vifs remerciements à Monsieur CAROL SAAL, Dr. Ing., qui m'a guidé tout au long de mon étude et qui m'a apporté toute son aide.

Par la même occasion, je voudrais transmettre mes remerciements et mon ample reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à ma formation.

Je voudrais également transmettre mes sincères amitiés à tous ceux qui, directement ou indirectement, ont participé à l'élaboration du présent ouvrage.

Ma gratitude s'adresse également à Messieurs les membres du Jury.

AVANT PROPOS

Avant d'aborder la presentation du sujet traité ,je tiens à faire une mise au point générale concernant les machines électriques et leur conception .

Elles sont considerées comme convertisseurs d'énergie electriques embrassant à l' heure actuelle une gamme de puissance allant de quelques milliwatts pour les petits moteurs auxiliaires ,de la technique d'information ,jusqu'à 1000W utilisés pour la production d'énergie .

Les machines electriques allant de 1kW à 1000 kW sont utilisés comme moteurs dans l'industrie pour production d'énergie à grande echelle.

Le but du developpement de ces machines est de les rendre moins chères et plus légères. Ainsi les calculs faits pour la realisation de ces machines sont limités du fait de la normalisation de l'exactitude ,relativement faible et de l'optimisation de l'emploi des materiaux.

Des difficultés surgissent au niveau du refroidissement généralement à réaliser .La classe d'isolation etant meilleur allant de E à H ,permet ainsi de reduire le gabarit de la machine; chacune d'elle ayant sa temperature max. admissible; Parmi ces machines, la machine asynchrone caracterisée par sa construction simple, sa robustesse, avec des caracteristiques de vitesse constante (independante de la charge aux environs la puissance nominale, pratiquement) d'où son utilisation dans l'industrie .

La variation de vitesse etant obtenue par variation de la charge

INTRODUCTION

L'étude faite ici ,concerne le calcul d'un moteur asyn-
-chrone à cage d'ecureil ,à pôles commutables,dans le rapport
polaire 1/3 permettant ainsi un réglage de vitesse sans pertes;
le rapport de puissance étant de 3kW/1kW .
La température de fonctionnement de cette machine est de 75°,
d'où le choix de la classe d'isolation qui est celle de B
du fait que l'enroulement du stator ,au cours du fonctionnement
en plein regime ,va atteindre une température supérieure à 75°
ET VOISINE DE la température limite admissible de E à savoir
120° .

L'épaisseur du matériau isolant ,élément important, est de
0,025mm.

L'isolation des encoches et principalement celle des têtes
de bobines est faite en papier d'épaisseur 0,25mm.Tandis que
celle de l'enroulement de la machine ,est faite à l'aide de la
laque synthétique .Ainsi la fiabilité de la machine peut être
conservée .

Cette machine asynchrone comprend :

-STATOR ayant :

a/Une carcasse en fonte ,construite spécialement pour
abriter un ventilateur ,ainsi que la boîte aux bornes,
les plateaux de serrage des tôles de la partie active
du circuit magnétique.

b/La partie active en tôles d'épaisseur 0,5mm en
acier avec une teneur en silicium permettant de dimin-
uer les pertes par courants Foucaults et le vieillisse-
ment de l'acier .Dans ces tôles sont prévus des encoches
où viennent se loger les enroulements.

c/L'enroulement du stator étant bobiné suivant le
type de Dahlander .

-Rotor ayant :

a/Empilage de tôles en acier ayant une teneur en Si
et d'épaisseur 0,5mm où a été prévu des encoches semi
ouvertes de forme ovale recevant de l'Aluminium coulé.

b/Axe en acier sur lequel sont calées les tôles.

Ainsi le processus du calcul de la machine se présentera tel que

-Calcul des dimensions principales de la machine .

-PARAMETRES du moteur en regime de travail pour le stator.

-Calcul de l'enroulement , Dimensions de l'encoche
et du dos rotorique .

-Paramètres en regime de travail pour le rotor .

- Calcul du circuit magnetique .
- Calcul des pertes .
- Construction du diagramme du cercle permettant ainsi l'élaboration des courbes $I_1, \cos \phi, I_2, P_1, n, g$, en fonction de P_2 , ainsi que le calcul des rapports $C_{I_1}^{Max}/C_n$ et $C_{dém.}/C_N$
- Calcul pour le tracé des caracteristiques mecaniques au demarrage en fonction de g (glissement).
- L'echauffement du moteur en plein regime pour 3kW-3000trs/mn et 1kW-1000trs/mn . La temperature maximume admissible pour la classe d'isolation E est de 120°.
- Le calcul mecanique concernant l'axe de rotation au fait des sollicitations qui sont exercées sur lui.
- Le processus technologique pour la fabrication des moteurs à grande serie et petite serie .
- Protection de la machine électrique calculée et Règles de la securité de travail concernant la mise à la terre de cette machine .

Il est à remarquer que les calculs sont faits en parallèle pour 3kW-3000trs/mn et 1kW - 1000trs/mn et que les details de calcul ont été omis .

Un aperçu theorique ., concernant le circuit magnetique , la dispersion (encoche, dent, entrefer), le refroidissement, la chaleur au demarrage et la durée de demarrage de la machine asynchrone, a été fait avant d'aborder le calcul proprement dit.

Aperçu sur le bobinage utilisé dans la machine (type Dahlander)

Ce type de bobinage est de plus en plus utilisé aujourd'hui dans les machines (cas des machines de rebobinage, des machines outils) du fait qu'il fait remédier à l'inconvénient majeur des moteurs asynchrones, à savoir le réglage de la vitesse sans pertes; qui se fait par commutation de pôles.

Le bobinage utilisé est de type Dahlander, son inventeur. Il est effectué au moyen d'enroulement à une couche, car s'il est effectué avec 2 couches, c.a.d un enroulement pour chaque vitesse il y aurait encombrement des encoches, donc celui du moteur et ainsi avoir un procédé coûteux. Donc le seul procédé employé pratiquement est celui utilisant un bobinage unique pour les 2 vitesses, pouvant être couplé pour les 2 polarités et avoir une variation du nombre de tours inversement proportionnel au nombre de pôles.

Le passage d'une vitesse à l'autre, pour les moteurs à rotor bobiné, en pleine charge nécessite un appareillage de manoeuvre d'autant plus compliqué que le nombre de polarité est élevé, d'où l'utilisation du rotor à cage d'écureuil qui n'a pas de polarité propre et convient pour différents nombres de pôles et simplifier ainsi l'appareillage.

L'enroulement de type de Dahlander est un bobinage à 2 côtés de bobine par encoche, La méthode consiste à composer chaque phase de 2 parties égales qui sont couplées en série pour le plus grand nombre de pôles (2P) et en parallèle pour le plus petit (P).

La commutation se fait à l'aide d'un commutateur placé dans la boîte aux bornes, permettant ainsi d'avoir 3 pôles où 1 pôle. En passant d'une polarité à l'autre, les connexions entre 2 fils de ligne doivent être inversés pour conservés le même sens de rotation du moteur.

Au cours de cette commutation, le champ n'est pas uniforme du fait de la naissance de champs parasites réduisant ainsi le couple de démarrage.

La puissance que doit fournir le moteur aux différentes vitesses détermine le plus souvent les enroulements employés ainsi que leur branchement.

Pour ce qui est de l'enroulement utilisé ici dans la machine calculée, il s'exécute avec un côté de bobine par encoche avec 9 bobines soit 3 bobines par phase. Le pas d'enroulement est égal au pas polaire à 2 pôles, il est donc triple de ce pas à 6 pôles. Le problème consiste à relier les 3 bobines de chacune des phases à 2 pôles en parallèle, et à relier en série ces mêmes bobines à 6 pôles.

Pour 3kW - 3000trs/mn :

$$\text{Pas d'enroulement } y : y = \frac{Z_1}{2p} = \frac{36}{2} = 18$$

$$\text{Nombre d'encoches } Z_1 : Z_1 = 36$$

$$\text{NOMBRE d'encoche par pôle et par phase} : q = \frac{Z_1}{2mp} = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 6$$

Pour 1kW - 1000trs/mn :

$$\text{Pas d'enroulement } y : y = \frac{36}{2 \cdot 3} = 6$$

$$\text{Nombre d'encoche } Z_1 : Z_1 = 36$$

$$\text{Nombre d'encoche par pôles et par phase} : q = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 2$$

I - CIRCUIT MAGNETIQUE.

Il sert à canaliser les lignes d'induction pour obtenir un flux le plus grand possible. Sa constitution est faite en matériaux ferromagnétiques.

Il comporte : le stator (carcasse+culasse) partie fixe servant de bâti, constituée par un cylindre creux sur lequel sont rapportés les pieds et dispositifs de fixation de la machine.

La carcasse étant réalisée en un seul bloc de fonte, dans laquelle on fixe des tôles feuilletées ayant des encoches régulièrement réparties, destinées à recevoir des encoches.

Le rotor constitué par un empilage de tôle découpées à la forme voulue et fixées sur l'arbre de la machine.

Entrefer : espace libre de faible épaisseur ménagé entre le stator et le rotor permettant la rotation de ce dernier.

A) LOI DE LA CIRCULATION DU CHAMP MAGNETIC

B) LA CHUTE DE POTENTIELS MAGNETIQUES PARTIELLES (entrefer, dents, culasse...).

~~LOI DE LA CIRCULATION DU CHAMP MAGNETIC~~

A) LOI DE LA CIRCULATION DU CHAMP MAGNETIC

Elle constitue la base du calcul du circuit magnétique la circulation du champ magnétique H le long d'une ligne fermée est égale au volume de courant F (f.m.m) couplé avec cette ligne : $\oint H dl = F$ en A.

.../...

H étant la composante suivant dl,

Pour N Spires couplées avec le circuit magnétique, et parcouru par un courant I , on a $F = Ni$.
 Dans les machines, il faut remplacer $\oint H dl$ par $\sum H_x l_x$ le circuit magnétique étant choisit de telle façon que H_1 ; H_2 ; ... peuvent être constants.

$$\text{Donc : } H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = F$$

En posant $U_x =$ la chute de potentiel magnétique on a :

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = F$$

Le calcul de la F.M.M s'effectue à partir de B et ϕ déterminé à partir de la F.E.M induite B et H à partir, de la courbe d'aimantation.

B) CHUTE DE POTENTIEL MAGNETIQUE DANS L'ENTREFER.

Elle est telle que : $U_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta$
 avec $B_\delta = \frac{\phi}{S_\delta} \text{ (T)}$

La détermination de S_δ se fait telle que en posant $S_\delta = b_i \cdot l_i \text{ m}^2$, car on a des interruptions du fer se produisant le long de l'entrefer, les encoches, les canaux radiaux de ventilation ainsi que l'influence de la saturation des dents sur la répartition de l'induction dans l'entrefer.

$b_i =$ longueur virtuelle de l'induit,
 longueur axiale du noyau ferromagnétique

$b_i =$ Arc polaire virtuelle (idéal) avec
 $b_i = \alpha_i \cdot \delta_p$

.../...

δ_p : longueur de l'arc de cercle ayant le ϕ_D correspondant à un seul pôle. On l'appelle le pas polaire.

$$\text{On a ainsi : } \delta_p = \frac{\pi \cdot D}{2p}$$

l_i étant prise telle que l'on suppose qu'on a une machine équivalente ayant constant son champ magnétique dans l'entrefer et égal à B_{Smax} dans l'entrefer.

$$\text{On a : } B_{\delta_{max}} = \frac{\phi_{max}}{\alpha_i \cdot \delta_p \cdot l_i}$$

La perméance des tubes d'induction, n'étant pas constante sur toute la longueur de la machine, à cause des canaux de ventilation on a ainsi l'induction dans l'entrefer qui varie localement.

On représente ces pertes par le coefficient $\sigma_B \cdot \beta_B$ but avec :

$$\sigma_B = \frac{b'_{vt}}{b_{vt}} ; \beta_B = \frac{B_0}{B_{max}}$$

On a ainsi $l_i = l_a - n_{vt} \cdot b'_{vt}$ canaux non décalés.

On peut déterminer l_i à partir du facteur de géométrie ($\lambda = 0,6 \div 2$). Si λ augmente on a η qui diminue, ainsi que .

On a ainsi λ qui est donné en fonction du nombre de de pôle :

$$p = 1 \Rightarrow \lambda \in (0,6 ; 1)$$

$$p = 2 \Rightarrow \lambda \approx \sqrt{p}$$

On a ainsi :

$$\lambda \cdot \delta_p = l_i$$

Calcul de b_i :

La valeur de b_i dépend, pour chaque type de machine de la saturation du fer et d'autres facteurs. Dans notre cas, c'est à dire pour les machines à synchrones faiblement saturées, la courbe d'induction est de forme presque sinusoïdale et on a :

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi}$$

Pour le cas d'une forte saturation du fer et S très petit, en sorte que la chute de potentiel magnétique dans les dents n'est pas négligeable par rapport à celle de l'entrefer, on a $\alpha_i > \frac{2}{\pi}$ et la courbe d'induction aplatie entraînant ainsi U_e coefficient de saturation devenant plus grand.

On a des courbes donnant α_i en fonction de K_s .

En tenant compte de l'influence des encoches de l'induit alors la perméance des tubes d'inductions dans l'entrefer n'est plus constante (plus grande au regard des dents qu'au regard des encoches).

Donc l'induction est plus grande à la tête des dents et pour un même flux, Φ la chute de potentiel magnétique augmente dans l'entrefer et ainsi on remplace la surface d'induit à encoches par une surface lisse de l'induit en introduisant à la place de l'entrefer δ , un entrefer fictif tel que : $\delta' = K_c \delta$ $K_c > 1$, K_c = facteur de carter.

Il est tel que : $K_C = K_{C1} K_{C2}$

δ_Z : pas dentaire.

$$K_{C1} \text{ pour le stator : } K_{C1} = \frac{\delta_{Z1}}{\delta_{Z1} - \gamma_{B1} \delta}$$

$$K_{C2} \text{ pour le rotor : } K_{C2} = \frac{\delta_{Z2}}{\delta_{Z2} - \gamma_{B2} \delta}$$

On a ainsi la chute de potentiel magnétique dans l'entrefer qui sera telle que : si $B_{\text{moyen}} = B_\delta$

$$U_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot K_C \cdot \delta$$

C) CHUTE DE POTENTIEL MAGNETIQUE DANS LES DENTS.

Pour un pas dentaire, on a le flux :

$$\phi_\delta = B_\delta \cdot l_i \cdot \delta_Z$$

La plupart du flux passe par la dent car $\mu_{\text{fer}} \gg \mu_{\text{air}}$ et la chute de potentiel est donnée par :

$$U_Z = h_Z \cdot H_Z \cdot m_{\text{éd}}$$

On prend : $h_Z = \frac{1}{3}$ hauteur de la dent.

$H_{Z\text{méd}}$: intensité médiane du champ qui est telle que :

$$H_{Z\text{méd}} = \frac{1}{6} (H_{Z\text{min}} + 4H_{Z\text{max}} + H_{Z\text{max}})$$

du fait qu'on a une variation de la section de la dent par conséquent de l'induction du champ H.

D) CHUTE DE POTENTIEL MAGNETIQUE DANS LA CULASSE.

Le flux d'induction est réparti uniformément dans la section droite de la culasse passant par l'axe interpolaire. L'induction moyenne dans cette section

$$B_j = \frac{\phi_j}{2K_F \cdot l_{Fe} h_j} \quad (\text{valeur max. de l'induction dans la culasse}).$$

ϕ_j : Flux magnétique par pôle pénétrant dans la culasse.

$\frac{\phi_j}{2}$: Flux magnétique traversant la section interpolaire droite

$$\text{On a : } l_j = \frac{\pi \cdot D_e}{2p} \text{ culasses statoriques.}$$

La chute de potentiel magnétique dans la culasse est alors :

$$U_j = H_j \cdot l_j.$$

II - DISPERSION.

A) NOTION

B) DIFFERENTES DEFINITIONS DE LA DISPERSION

C) CALCUL PRATIQUE DE LA DISPERSION DANS LES MACHINES.

D) REACTANCE TOTALE DE FUITE

E) EFFET PELLICULAIRE.

A) NOTION

La F.E.M de dispersion, due au flux de dispersion agissant sur le circuit primaire et sans effet sur le secondaire, en circuit ouvert, est causée par la différence qui existe entre la F.E.M d'auto-induction créées par l'excitation d'un circuit électrique linéaire, en courant alternatif et la F.E.M induite dans un circuit secondaire.

B) DIFFERENTES DEFINITIONS.

a) A partir des inductances:

Si on suppose qu'on a circuit privé de fer, on a le champ magnétique qui est proportionnel au courant d'excitation. Si on a 2 circuit linéaires sans fer (primaire + secondaire) :

i_1, L_1, ϕ_1 : courant, inductance, flux de dispersion du primaire.

i_2, L_2, ϕ_2 : courant, inductance, flux de dispersion du secondaire.

On aura les équations, si i_1 et i_2 parcourent le primaire et le secondaire respectivement :

$$\phi_1 = L_1 i_1 + K_1 (L_2 i_2) = (L_1 - K_1 L_2) i_1 + K_1 L_2 (i_1 + i_2)$$

$$\phi_2 = L_2 i_2 + K_2 (L_1 i_1) = (L_2 - K_2 L_1) i_2 + K_2 L_1 (i_2 + i_1).$$

.../...

Du fait qu'on a un effet inductif, à un transport d'énergie l'électromagnétique d'un circuit à l'autre est donné par les flux précédents dépendant des 2 courants $K_1 L_2 (i_1 + i_2)$ et $K_2 L_1 (i_1 + i_2)$ qui sont égaux du fait qu'on a pas de pertes entre les 2 circuits.

$$\text{On a ainsi : } K_1 L_2 = K_2 L_1 = M;$$

On a ainsi les flux dépendant des circuits propres produit par 2 circuits en pure perte (flux de dispersion).

$$\phi_{\sigma_1} = (L_1 - M) = L_{\sigma_1} i_1 \text{ (dispersion primaire)}$$

$$\phi_{\sigma_2} = (L_2 - M) = L_{\sigma_2} i_2 \text{ (dispersion secondaire)}$$

$$\phi_c = M (i_1 + i_2) = \text{flux produit en commun (mutuel)}$$

$$\phi_{c_1} = M i_1$$

$$\phi_{c_2} = M i_2 \longrightarrow \phi_c = \phi_{c_1} + \phi_{c_2}.$$

Les coefficients de dispersion :

$$\sigma_{H_1} = \frac{(L_1 - M)}{M i_1} i_1 = \frac{(L_1 - M)}{M}$$

$$\sigma_2 = \frac{L_2 - M}{M}$$

Le coefficient de dispersion totale :

$$K^2 = K_1 K_2 = \frac{M^2}{L_1 L_2} \text{ (degré de couplage)}$$

d'où

$$\sigma = 1 - K^2 = \frac{\sigma_H}{1 + \sigma_H} \text{ avec}$$

$$\sigma_H = \sigma_{H_1} + \sigma_{H_2} + \sigma_{H_1} \sigma_{H_2}$$

b) A partir de l'énergie magnétique:

Utilisé dans les conducteurs massifs malgré qu'on a l'apparition de l'influence de l'effet pelliculaire.

Pour un circuit parcouru par un courant

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L i^2 \quad (L : \text{inductance du circuit})$$

Pour 2 circuits linéaires :

$$\begin{aligned} W_m &= \frac{1}{2} \cdot i_1 \cdot \phi_1 + \frac{1}{2} \cdot i_2 \cdot \phi_2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot i_1^2 + \frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot i_2^2 + M \cdot i_1 \cdot i_2 \end{aligned}$$

En général, on a :

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} \cdot dV = \frac{1}{2} \mu_0 \int_V \mu \mathbf{H}^2 \cdot dV$$

c) A partir de l'allure du champ magnétique:

Le cas le plus simple est celui de l'image des lignes d'induction, tout en supposant qu'on a 2 circuits linéaires (unidimensionnels) où circule un courant faisant apparaître schématiquement 2 types de lignes d'induction, une embrassant le conducteur primaire (dispersion primaire) et celle embrassant les 2 conducteurs (couplage en commun).

Pour le primaire on a le flux total :

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_{c1} + \phi_{\sigma 1} \\ \text{avec} \\ \sigma_{H1} &= \frac{\phi_{\sigma 1}}{\phi_{c1}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_2 &= \phi_{c2} + \phi_{\sigma 2} \\ \sigma_{H2} &= \frac{\phi_{\sigma 2}}{\phi_{c2}} \end{aligned}$$

.../...

B) CALCUL PRATIQUE DE LA DISPERSION.

La détermination exacte de la dispersion ne peut se faire du fait qu'on rencontre de grandes difficultés. En pratique, on utilise des méthodes simples, on décompose, ainsi le flux total en 3 flux de dispersion partiels :

- 1°) Flux de dispersion d'encoche
- 2°) Flux de dispersion des têtes de dents
Flux différentiel.
- 3°) Flux de dispersion dans les bobines.

1°) Flux de dispersion d'encoche :

On a 2 cas, pour un enroulement à une couche et pour 2 couches.

a) Pour une seule couche :

En négligeant, la chute de potentiel magnétique dans le fer on a flux transversal qui est proportionnel à sa forme. Donc pour une bobine à Z_z spires correspondantes au flux transversal de l'encoche, on a l'inductance

$$L_{\sigma z} = \Psi_{(i=a)} = \sum Z_y \cdot \phi_y = 2 \cdot \mu_0 \cdot l_z \cdot Z_z^2 \cdot \lambda_{\sigma z}$$

$\lambda_{\sigma z}$: coefficient de perméance d'une encoche idéale.

Pour une phase à q encoches :

$$L_{\sigma z} = 2 \mu_0 \cdot Z_z^2 \cdot q \cdot l_z \cdot \lambda_{\sigma z}$$

$$L_{\sigma z} = 2 \mu_0 \cdot \frac{N^2}{pq} \cdot l_z \cdot \lambda_{\sigma z} \quad \text{avec}$$

$$N = Z_z \cdot pq.$$

D'où la réactance de fuite :

$$X_{\sigma_z} = 12,56 \cdot f \cdot \frac{N^2}{p} \cdot \lambda_{\sigma_z} \quad \text{avec}$$

$$\lambda_{\sigma_z} = \mu_0 \frac{l_z}{g} \cdot \lambda_{\sigma_z}$$

$l_z = l_{a-nut} + b_{nut}$: déterminé à partir de courbe en fonction du canal de ventilation λ_{σ_z} diffère pour chaque encoche.

b) Pour deux couches :

Pour ce cas là il s'agit de calculer, la perméance ou la réactance pour chaque couche, avec introduction de l'angle de déphasage entre les courants qui traversent chaque couche. Si la réactance est :

$$X_{\sigma_z} = 1,58 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot \frac{N^2}{pq} \cdot l_z \frac{1}{4}$$

La perméance sera telle que.

En pratique, on ramène l'enroulement à deux couches à une seule couche en introduisant un facteur de correction K_{CO} dépendant de la différence de pas (rapport de l'ouverture de la bobine au pas polaire δ_p). Des courbes donnent K_{CO} en fonction de $\frac{C}{\delta_r}$.

2°) Influence de l'effet pelliculaire.

Il provoque une diminution de la dispersion d'encoche, avec les barres hautes. On a l'induction qui est, au pied de l'encoche, très petite, mais grande au niveau de la fente de l'encoche (fréquence suffisamment élevée) entraînant ainsi une diminution du flux des bobines

Pour les moteurs à synchrones, l'effet pelliculaire entraîne une diminution de la perméance de fuite.

On a la relation :

$$\frac{\lambda_{\sigma zc}}{\lambda_{\sigma za}} = \frac{1}{z_s^2} \lambda \left(\frac{h}{h_{co}} \right) + \frac{z_s^2 - 1}{z_s^2} \mu \left(\frac{h}{h_{co}} \right)$$

$\lambda_{\sigma zc}$: coefficient de perméance de l'encoche pour le courant continu.

$\lambda_{\sigma za}$: coefficient de perméance de l'encoche pour le courant alternatif.

avec : $\frac{h}{h_{co}} = \alpha$: coefficient de réduction de la hauteur.

$$\lambda \left(\frac{h}{h_{co}} \right) = \frac{3(\text{sh}^2 \frac{h}{h_{co}} - \sin^2 \frac{h}{h_{co}})}{2(\text{ch}^2 \frac{h}{h_{co}} - \cos^2 \frac{h}{h_{co}})} ;$$

$$\mu \left(\frac{h}{h_{co}} \right) = \frac{1}{\frac{(\text{sh} \frac{h}{h_{co}} + \sin \frac{h}{h_{co}})}{(\text{ch} \frac{h}{h_{co}} + \cos \frac{h}{h_{co}})}}$$

z_s : nombre de barres superposées dans l'encoche.

$$\alpha = \sqrt{\frac{Q_{cu}}{Q_z} \cdot p \cdot \frac{f}{10^7}} \times 2 \pi \quad \text{avec}$$

Q_{cu} : largeur totale du cuivre

Q_z : largeur de la fente d'encoche

f : fréquence du courant dans le conducteur.

h_{co} : hauteur du conducteur.

Mais $\frac{\lambda_{\sigma_{za}}}{\lambda_{\sigma_{ze}}}$ est donné par des courbes suivant le nombre de barres dans l'encoche et suivant :

$$h \frac{\lambda_{\sigma_{za}}}{\lambda_{\sigma_{ze}}} = z_s \cdot \frac{\lambda_{\sigma_{za}}}{\lambda_{\sigma_{ze}}}$$

Si $h \frac{\lambda_{\sigma_{za}}}{\lambda_{\sigma_{ze}}}$ augmente, on a la perméance de fuite qui diminue.

3) Dispersion différentielle :

Elle concerne la dispersion des champs harmoniques la calculer, revient à décomposer en ses harmoniques la courbe de la F.M.M pour chaque harmonique et puis sommer après.

On a ainsi :

$$\text{Pour le fondamental : } \hat{F} = 0,45m \cdot l \cdot \frac{N}{p} \hat{K}_w$$

$$\text{Pour la } \nu \text{ harmonique : } \hat{F}^\nu = \frac{F}{\nu} \cdot \frac{\nu K_w}{K_w}$$

$$\text{et } \hat{B}^\nu = \mu_0 \nu \hat{F} \cdot \frac{1}{K_c \cdot K_s \cdot \delta}$$

$$\nu \hat{\phi} = \frac{2}{\pi} \cdot l_i \cdot \frac{\delta_p}{\nu} \cdot \mu_0 \nu \hat{F} \cdot \frac{1}{K_c \cdot K_s \cdot \delta}$$

D'où l'on a le flux de la bobine :

$$\psi = \sum N_y \cdot \phi_y = \hat{\phi} N \nu K_w$$

La réactance de fuite est :

$$X_{\sigma_d} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{1}{\sqrt{2} I} \cdot \sum \psi$$

$$X_{\sigma_d} = 1,58 \cdot f N^2 \left(\frac{\delta_p \cdot l_i \cdot m}{p \cdot \pi^2} \cdot \frac{1}{K_c \cdot K_s \cdot \delta} \cdot \sum \left(\frac{\nu K_w}{\nu} \right)^2 \right) 10^{-5}$$

$$= 12,56 \cdot f \cdot \frac{N^2}{p} \cdot K_\sigma$$

.../...

$\xi \left(\frac{K_w}{\nu} \right)^2$ est donné par des tableaux pour chaque valeur de q et de $B = \frac{C}{\delta_p}$

Pour le rotor en court-circuit, on utilise

$$X_{\sigma_{d2}} = 12,56 \cdot \frac{p}{2p} \cdot \lambda_{\sigma_{d2}}$$

$$\lambda_{\sigma_{d2}} = 110 \frac{Z_2}{2mip} \frac{m_1 \delta_{plj}}{\pi^2 KcKs S} \xi \left(\frac{1}{2 \frac{Z_2}{2p} \nu + 1} \right)^2$$

$$\xi \left(\frac{1}{2 \frac{Z_2}{2p} \nu + 1} \right)^2 \text{ est donné par des tableaux}$$

en fonction de $\frac{Z_2}{2p}$.

La dispersion différentielle due aux champs harmonique a surtout de l'importance dans les machines asynchrones et, triphasés à collecteur, travaillant avec faible entrefer.

Dans ce calcul, on a tenu compte de la non-uniformité de l'entrefer lors de la démonstration, en diminuant les amplitudes des harmoniques de Kc fois.

Mais en réalité sous l'influence de l'ouverture des encoches les fuites différentielles diminuent plus.

Ainsi dans notre cas, (rotor à cage d'écu-reil) et celui des rotors massifs, les fuites différentielles de l'enroulement statoriques diminuent du fait de l'amortissement des champs des harmoniques supérieurs par le rotor.

Dans le calcul, en pratique, on a différents coefficients approchés permettant de tenir compte de ces facteurs.

4°) Dispersion des têtes des dents :

Pour les grands entrefer, on doit tenir compte de la dispersion qui passe d'une tête de dent à l'autre à travers l'air on a ainsi la réactance de fuite :

$$X_{\sigma_z} = 1,58 \cdot f \cdot \frac{N^2 \cdot l_i \cdot \lambda_{\sigma_z}}{pq} \cdot 10^{-5}$$

$$\text{avec } \lambda = \mu_0 \cdot \frac{l_i \cdot \lambda_{\sigma_z}}{q}$$

5°) Dispersion des têtes de bobines :

On a la réactance :

$$X_{\sigma_b} = 12,56 \cdot f \cdot \frac{N^2 \cdot \lambda_{\sigma_b}}{p}$$

λ_{σ_b} : est effectué approximativement du fait de l'influence du fer et des conducteurs situés près des autres phases et autres enroulements et du fait du parcours des lignes de dispersion autour des têtes de bobines

Pour un enroulement à une seule couche, on a toutes les bobines qui sont réunies en une seule tête.

Pour les enroulements statoriques d'un moteur asynchrones :

$$\lambda_{\sigma_b} = \mu_0 \cdot (0,67 \cdot l_{bo} - 0,43 \cdot \delta_p)$$

Les têtes des lignes du rotor provoquent une diminution de la dispersion des têtes des bobines du stator, et limitent l'espace de formation des lignes de dispersion du stator.

Quand les anneaux de court-circuit passent très près du noyau de fer de l'induit, on utilise les formules précédentes. Quand les barres saillent hors du noyau en direction axiale, on a un affaiblissement de l'influence du champ de l'enroulement, on multiplie alors la constante par 0,9 :

$$\text{d'où } \lambda = \mu_0 (0,67 \cdot l_{b_0} - 0,43 \cdot \delta_p) \cdot 0,9$$

Pour le cas de deux couches :

Pour les moteurs à rotor en court-circuit la réactance de fuite secondaire par phase, correspondant au flux de dispersion frontale est :

$$X_{\sigma_{b_2}} = 12,56 \cdot \frac{p}{2p} \cdot \lambda \sigma_{b_2}$$

$$\text{avec } \lambda \sigma_{b_2} = \mu_0 \cdot \frac{z_2}{2m_1 \cdot p} \cdot \delta_p \cdot g_{\gamma}$$

g_{γ} : est donné par des courbes en fonction de $\frac{\delta_p}{de}$

de : distance entre l'anneau et les bobine du stator.

z_2 : nombre total de barres du rotor en court-circuit.

m_1 : nombre de phases du primaire.

Réactance de fuite totale :

Du fait de la subdivision du flux de dispersion en 3 flux partiels, on a :

$$X_{\sigma} = 12,56 \cdot \frac{N^2}{p} \cdot \frac{p}{f} \cdot (\lambda \sigma_z + \lambda \sigma_{d_2} + \lambda \sigma_b).$$

Pour le rotor en court-circuit :

$$X_{\sigma_2} = 12,56 \cdot \frac{p}{f} \cdot \frac{1}{2p} \cdot (\lambda \sigma_z + \lambda \sigma_{d_2} + \lambda \sigma_{c_2}).$$

.../...

II - PERTES.

a) Pertes dans le fer.

On a les pertes dans le fer qui sont importantes dans le cas de la marche à vide qu'en charge.

On peut distinguer ainsi :

- pertes en marche à vide.
- pertes en charge.

1°) Pertes en marche à vide:

1-1 Dans les tôles.

La qualité des tôles est jugée en fonction des pertes et est donnée par le chiffre de pertes P'_{fe} de la tôle en w/Kg à 50 Hz pour une induction max. de 1 tesla.

En vue de connaître les pertes dans la culas et dans les dents (B étant sinusoïdale) on décompose ^{Ces} $\sqrt{\text{pertes}}$ totales, du fait qu'on ne peut connaître le chiffre de pertes, en 2 composantes :

- Les pertes par hystérésis
- Les pertes par courants Foucaults.

-Les pertes par hystérésis représentent l'énergie transformée en chaleur, nécessaire à l'aimantation cyclique tournante du fer et sont indépendantes de l'épaisseur de la tôle.

RICHTER et STEINMETZ ont donné chacun une formule nécessaire pour le calcul des pertes par hystérésis.

STEINMETZ :

$$Ph = K_{fe} f \hat{B}^{1,6} \quad (W)$$

f en Hz ; \hat{B} induct. max. en tesla ;
 K_{fe} = constante valable dans le cas de \hat{B} faible.

RICHTER :

Son équation est généralement le plus utilisée :

$$\text{On a : } Ph = a \cdot f \cdot \hat{B} + b \cdot f \cdot \hat{B}^2 \quad W/Kg.$$

$$\text{Pour } \hat{B} > 1T \longrightarrow Ph = \sigma_h f \hat{B}^2 \cdot 10^{-2}$$

σ_h = constante du matériau.

Les F.E.M induites dans le fer créée par l'aimantation cyclique alternative, font qu'on a des courants provoquant des pertes parcourant de Foucault, qu'on réduit à l'aide de tôles minces isolées les unes des autres disposées en parallèles aux lignes d'inductions.

$$\text{On a : } P_{cf} = \sigma_{cf} \cdot (a_t \cdot f \cdot \hat{B})^2 \cdot 10^2$$

a_t : épaisseur de la tôle en m.

$$\sigma_{cf} = \frac{\pi^2 \cdot 10^{-6}}{6_p} \quad ; \quad p : \text{résistivité en } \Omega \cdot m$$

Ainsi la chaleur totale d'aimantation cyclique alternative donnée pour 1 Kg de fer de tôle :

$$Ph + cf = \sigma_h \cdot f \cdot \hat{B}^2 \cdot 10^{-2} + \sigma_{cf} \cdot (a_t \cdot f \cdot \hat{B})^2 \cdot 10^2$$

σ_h et σ_{cf} sont donnés par des tableaux en fonction de la qualité de la tôle utilisée.

.../.

REMARQUE :

Pour des tôles d'une certaine épaisseur, à fréquence élevée, on doit tenir compte de la réaction des courants de Foucault (effet pilliculaire) entraînant ainsi un affaiblissement du flux.

DREYFUS donne ainsi la formule des pertes par courants Foucault :

$$P_{cf} = \sigma_{cf} \cdot (a_t \cdot f \cdot \hat{B})^2 \cdot f_{cf} \cdot 10^{-2}$$

$$\text{avec } f_{cf} = \frac{3}{2} \frac{\text{Sh} \alpha - \sin \alpha}{\text{ch} \alpha - \cos \alpha} \text{ facteur de réaction}$$

$\alpha = \alpha a_t$: épaisseur réduite de tôle.

$$\alpha = 2 \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{10^7} \cdot \frac{f}{P}} \cdot m^{-1} ;$$

μ_r : perméabilité relative du fer.

P en μm .

$$\text{si } \alpha < 2 \longrightarrow f_{cf} \approx 1$$

$$\text{si } \alpha > 4 \longrightarrow f_{cf} \approx \frac{3}{2}$$

Les pertes par hystérésis subissent aussi une augmentation due à l'effet de répartition non uniforme de l'induction dans les tôles.

$$\text{On a : } P_h = \sigma_h \cdot f \cdot \hat{B}^2 \cdot f_h \cdot 10^{-2}$$

$$f_h = \frac{1}{2} \frac{\text{Sh} \alpha - \sin \alpha}{\text{ch} \alpha - \cos \alpha}$$

$$\alpha < 1,5 \longrightarrow f_h = 1$$

.../.

L'aimantation cyclique tournante se présente dans la culasse des machines électriques. On a des pertes qui sont dues au sens de rotation de l'aimantation moléculaire et de l'induit dans l'autre^{sens} qui sont différents pour chacun, on prend généralement les pertes par hystérésis pour les 2 cas. C'est à dire l'aimantation tournante alternative.

1-2 Pertes dans les dents des machines électriques :

Du fait qu'on n'a que les pertes par hystérésis qui apparaissent due à l'aimantation cyclique alternative, on a les pertes qui sont telle que :

$$Ph_z = \sigma_h \cdot \rho \cdot B_{\max}^2 \cdot 10^{-2} m_z$$

m_z : masse des dents.

Pour les machines à courant alternatif, à courbe d'induction sinusoïdale, il suffit de modifier le chiffre de pertes en fonction de l'induction et de la fréquence à partir des courbes, et de multiplier par la masse des dents.

On a : $P'_{fe} = \rho \cdot (\rho)$.

si $\rho = C^{te}$, on a : $Ph_{cf} = P'_{fe} \cdot B_{\max}^2$

B_{\max_z} = induction se reproduisant à mi-hauteur des dents.

1 - 3 Pertes dans les culasses des machines électriques.

On distingue :

-Les pertes par hystérésis dans l'équation

$$Ph_j = \sigma_h \cdot \rho \cdot B_{j\max}^2 \cdot m_j \cdot Kh_j \cdot 10^{-2}$$

.../...

m_j : masse de la culasse.

K_{hj} : facteur de correction dû à l'influence de la répartition non uniforme du flux magnétique dans la section de la culasse.

Il est donné en fonction du rapport du diamètre extérieur et intérieur.

Les pertes par courant Foucault :

$$\text{On a : } P_{cfj} = \sigma_{cf} \cdot (a_{\frac{p}{f}} \cdot B_{jmax})^2 \cdot m_j \cdot K_{cfj} \cdot 10^2$$

$K_{cfj} = f \left(\frac{D}{D_i} \right)$ ou $f \left(\frac{D}{D_e} \right)$ et tient compte de l'influence de la répartition non uniforme de l'induction dans le fer.

On a ainsi :

$$P_{h+cf} = \left(K_{hj} \cdot \sigma_h \cdot f \cdot 10^{-2} + K_{cfj} \cdot \sigma_{cf} \cdot (a_{\frac{p}{f}})^2 \cdot 10^2 \right) \cdot B_{jmax}^2 \cdot m_j$$

1-4 Pertes superficielles :

Leur existence est due au fait qu'on a dans la machine asynchrone des encoches ouvertes (stator et rotor). Pour les stator, on a des pertes superficielles produites par les encoches du rotor :

$$P_{su_1} = K_{su} \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot 60 \cdot n}{10.000} \right)^{1,5} \cdot \left(\delta_{z_2} \cdot B_{B_2} \cdot K_{c_2} \cdot \hat{B}_{Gmax} \right)^2 \cdot 10^6$$

Du fait que l'induction ne diffère qu'à peine de la forme sinusoïdale, et que l'entrefer reste constant et $B_{B_1} \cdot K_{c_2}$ constant, on a en tenant compte de la surface du stator :

$$P_{su_1} = \frac{1}{2} P_{su_1 \text{ moy}} \cdot l_{fe_1} \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{\delta_{z_2} - a_1}{\delta_{z_1}}$$

$\frac{1}{2} P_{su_1 \text{ moy}}$: pertes moyennes.

.../...

1-5 Pertes par pulsation du flux dans les dents.

La machine asynchrone ayant des encoches au stator et au rotor on a l'induction dans les dents qui varie avec la position respective de celle-ci provoquant des oscillations du flux et causant ainsi des pertes supplémentaires, dépendant du mode d'usinage des tôles, des dimensions de la tôle et de l'entrefer.

Ces pertes sont données par des courbes en fonction de $\frac{a\delta z}{\delta}$ pour le stator et le rotor.

REMARQUE :

L'usinage des tôles provoquent des pertes supplémentaires (découpage : 7 à 15% augmentation des pertes usinage 5 à 8%). Le recuit fait diminuer les pertes de 10 à 15 % il faut éviter les surfaces du paquet de tôles (polissage des encoches) car on a une augmentation des pertes par courant Foucault.

Dans la marche en charge, on a des pertes supplémentaires dans le fer produites par le courant induit aux limites de l'entrefer (pertes superficielles) et à la tête de l'enroulement (pertes frontales).

Les pertes frontales sont causées par les flux de dispersions entourant la tête des bobines. Elles dépendent du type d'exécution de connexion frontale et celle du capot des têtes de bobines. Y remédier, nécessite un travail de préparation soigné.

Eviter l'utilisation d'anneau de renforcement, de plaque de boulons en métal car on a des pertes considérables. Il faut utiliser des matériaux isolants non magnétiques pour les bandes ^{et} frettes contre les effets de la force centrifuge.

.../...

2- Pertes par frottements :

Elles comprennent :

Les pertes par ventilation et par frottement dans les parties qui peuvent être estimées du fait de la variation dans la construction et du type de ventilation.

Ces pertes sont données par des courbes en fonction de la vitesse :

$$\frac{P_{vt} + P_{ft}}{P_u} \cdot 100 = f(60 \cdot n)$$

3 - Pertes dans le cuivre.

-Pertes joules simples dans le cuivre :

$$P_J = R \cdot I^2 \text{ avec } R = 2 \rho \cdot \frac{N \cdot l_{co}}{a \cdot S_{co}}$$

R : résistance de l'enroulement.

I : courant le traversant

ρ : résistivité du matériau conducteur en $\Omega \cdot m$ dépendant de la T°

N : nombre de spires en série

l_{co} : longueur moyenne de conducteur (1 spire) en m.

a : nombre de voie, d'enroulement en //

S_{co} : section du conducteur en m^2

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

α : coefficient de T°

Pertes supplémentaires dans le cuivre :

Elle sont dûes à l'effet pelliculaire dû à la différence de tension dans le conducteur entrainant des courants parasites qui sont déphasés par rapport à la tension.

On a ainsi une augmentation de la résistance du conducteur et des pertes en cuivre.

Donc : $P_{js} = P_{ja} - P_{jcc} (K_r - 1)$

$$K_r = \frac{\text{Sh}2\eta + \sin^2\eta}{\text{Ch}2\eta - \cos^2\eta}$$

η : réduction de la hauteur du conducteur.

Si $0 \leq \eta \leq 1$ on a : $K_r = 1 + \frac{4}{45} \eta^4$

= facteur d'accroissement

$\eta > 2$ on a : $K_r = 2$

Hauteur critique :

On a K_r qui augmente avec la hauteur du conducteur jusqu'à une certaine hauteur entrainant l'apparition d'une petite résistance en courant alternatif.

Pour cela il faut éviter que l'enroulement ne dépasse la valeur critique.

La résistance additionnelle dans l'effet pelliculaire est de 33% de la résistance en courant continu.

Les pertes dues au champ principal dans l'encoche, sont celles par courant Foucault et varie très peu en charge et sont déterminée à vide.

Elles dépendent de la forme et de la valeur de la section du conducteur et de la variation de la valeur du champ dans l'encoche.

La détermination, en vérité de ces pertes se fait expérimentalement du fait que la calcul analytique pose beaucoup de problèmes (détermination difficile de certain paramètres).

Une estimation de ces pertes se fait en se basant sur des données expérimentales de machines déjà construites, à partir de courbes.

ECHAUFFEMENT --- REFROIDISSEMENT

- Notion fondamentale.
- Conductivité thermique des matériaux actifs et des isolants
- Conductivité thermique résultante de l'isolation des encoches et des têtes de bobines.
- Transmission de la chaleur par convection.

1°) Notion fondamentale.

L'augmentation de la T_{e} dans les machines électriques (de ses éléments) par rapport au milieu ambiant est due aux pertes qui sont transformées en chaleur produite dans les matériaux actifs (Cu, fer actif).

Les matériaux isolants des machines électriques, les T_{e} maximales admissibles sont prescrites par les associations électrotechniques des différents pays, garantissant ainsi une bonne conductivité thermique et une transmission efficace de la chaleur vers le milieu ambiant soit par rayonnement (carcasse) ; soit convection (transport de la chaleur au moyen de l'air en mouvement : ventilation).

On a ainsi :

θ_c : T_{e} à laquelle est chauffée le corps

θ_a : T_{e} du milieu ambiant.

θ_{sc} : T_{e} de la surface du corps.

On a :

$$(\theta_c - \theta_a) = (\theta_c - \theta_{sc}) + (\theta_{sc} - \theta_a) \text{ en } \text{°C}.$$

L'épaisseur d'isolation ne doit pas dépasser la limite imposée par la tension de la machine et la conductivité thermique ayant la plus grande valeur possible

2°) Conductivité thermique des matériaux actifs et des isolants

Le matériau conducteur (Cu ou Al) possède une conductivité thermique relativement élevée (380W/m°C et 200W/m°C respectivement°;

En isolant, par des matériaux de faible conductivité thermique par rapport à celle du fer, les tôles on réduit ainsi les pertes pwr courant Foucault. Les différent conductivités sont données par des tableaux.

3°) Conductivité thermique résultante de l'isolation des encoches et des têtes de bobines.

L'isolation de l'enroulement n'étant pas homogène (différents isolants) on a le coefficient de conductivité thermique résultant α_λ (en W/m °C) qui sera tel que, si on connaît les coefficients de conductivités thermique :

-Pour 2 matériaux :

$$\alpha_\lambda = \frac{\frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot \frac{\lambda_2}{\delta_2}}{\frac{\lambda_1}{\delta_1} + \frac{\lambda_2}{\delta_2}} \quad \text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La conductivité thermique résultante :

$$\lambda \text{ résult} = \alpha_\lambda (\delta_1 + \delta_2) \text{ en W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

δ_1 et δ_2 épaisseur respectives des 2 isolants.

Ces coefficients sont donnés par des courbes et suivant l'enrubannage (sec ou imprégné), $\alpha \lambda$ est donné suivant la classe, le type de machine.

4°) Transmission par convection.

La quantité de chaleur rayonnée en une seconde par m² de surface est donnée par la loi de STEFAN - BOLTZMANN.

$$Q_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \nu \cdot (T^4 - T_a^4) \text{ W/m}^2$$

T : T° du corps

T_a : T° ambiante.

ν : Facteur tenant compte de la nature du corps rayonnée.

$5,7 \cdot 10^{-8}$: Valeur du coefficient de rayonnement.

La surface considérée est celle qui est à l'air libre :

$$Q_s = \alpha_s \cdot (T - T_a) = \alpha_s \cdot \Delta \theta$$

Pour des T° ordinaires :

α_s : coefficient de transmission thermique par rayonnement.

5°) Transmission de la chaleur par convection.

La transmission spécifique de chaleur d'une surface est désignée par le coefficient de transmission totale de la chaleur.

Les machines complètement cuirassées à convection naturelles (pas de ventilation artificielle) la différence de T_2 se rapporte à l'enroulement statorique et non à la carcasse.

Le matériau actif n'étant pas complètement exploitée car, les pertes sont maintenues basses, il ne faut cuirasser la machine que, quand cela est nécessaire pour éviter ainsi les dégâts que risquent de subir l'enroulement par l'effet de l'influence extérieure (humidité, poussière, corps étrangers).

Les parties actives de la machine (enroulement+fer actif) sont placées, généralement au contact de l'air extérieur tout en les ventilant, augmentant ainsi le coefficient de transmission la dispersion augmentant ainsi entraîne une utilisation bonne du matériau actif :

On a :

a) Transmission de la chaleur par les têtes de bobines.

Des courbes expérimentales donnent le coefficient de transmission totale en fonction de la vitesse de l'air, le débit d'air entre les têtes de bobines en fonction de la vitesse périphérique.

- b) Transmission de la chaleur par les gaines dans les canaux radiaux de ventilation.

Des courbes analogues aux précédentes donnent ce coefficient en fonction de la vitesse de l'air dans le canal et de L/p . (L : longueur de la machine totale)

- c) Transmission de la chaleur à l'air par le paquet de tôles du stator ventilé radialement.

Le coefficient de transmission est donné par des courbes expérimentales principalement celle de RICHTER en fonction de la vitesse de ventilation.

- d) Transmission de la chaleur à l'air par les surfaces cylindriques du paquet de tôles du stator.

Il est donné par la courbe donnée par RICHTER.

- e) Transmission de la chaleur dans les canaux de ventilation et par les surfaces cylindriques ventilées.

La forme de la section de passage a peu d'influence sur le coefficient qui est donnée par des courbes, pour des surfaces ventilées cylindriques.

- 6°) Echauffement et refroidissement d'un corps homogène :

On a la quantité de chaleur pendant le temps dt qui est donné par :

$$\Phi dt = m \cdot c \cdot d(\Delta \theta) + A_{ref} \cdot \alpha_{ks} \cdot \Delta \theta dt (W).$$

Avec A_{ref} : surface de refroidissement.

α_{ks} : coefficient de transmission totale

Donc l'élévation de T_0 sera :

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_{max} \cdot (1 - e^{-t/\delta}) + \Delta \sigma_0 e^{-t/\delta} \left\{ \begin{array}{l} \sigma = \frac{mc}{A_{ref} \alpha_{ks}} \\ \Delta \sigma_{max} = \frac{\Phi}{A_{ref} \alpha_{ks}} \end{array} \right.$$

Le refroidissement de la machine électrique est d'autant plus intense que sa constante de temps est plus petite et que son état de régime est atteint.

REMARQUE :

L'épaisseur du paquet de tôles élémentaire et le jeu dû à la construction, ont un effet sur le flux thermique et sur l'échauffement.

Le jeu étant principalement entre la gaine et les parois de l'encoche.

Aperçu théorique sur la chaleur et la durée de démarrage des moteurs à rotor en court-circuit.

Dans ce cas là, on doit vérifier l'échauffement des enroulements, non seulement durant le fonctionnement normal, mais aussi durant le démarrage (quand le moteur a la tâche de vaincre les moments des couples ou des masses tournant assez grandes).

On a ainsi la chaleur qui est telle que :

$$W_{p2} = \pi^2 \cdot m \cdot D_g^2 \cdot n_s^2 \int_{gf}^{gb} \frac{dg}{g \left(1 - \frac{M_{resi}}{M}\right)}$$

D_g : diamètre de gération

M_s : vitesse de

g : glissement .

Au démarrage : $g_o = 1$; $g_f = 0$

$$W_{p2} = \frac{\pi^2}{2} \cdot m \cdot D_g^2 \cdot n_s^2 (1 - g_p^2)$$

$$\text{en général d'où } W_{p2} = \frac{\pi^2}{2} \cdot m \cdot D_g^2 \cdot n_s^2$$

Donc cette chaleur ne dépend pas de la construction du moteur (électriquement et mécaniquement).

Au freinage : $g_o = 2$; $g_p = 1$

$$\text{d'où } W_{p2} \text{ frein} = \frac{3}{2} \pi^2 \cdot m \cdot D_g^2 \cdot n_s^2 = 3W_{p2}$$

La T° d'échauffement au démarrage est de :

$$\Delta \theta = \frac{W_{p2}}{c_2 \rho_2 \cdot V_2} = \frac{W_{p2}}{c_2 \cdot m_2}$$

m_2 : masse de l'enroulement rotorique

c_2 : chaleur spécifique de l'enroulement en W/Kg $^{\circ}$ C.

ρ_2 : masse spécifique

V_2 : volume des enroulements rotoriques...

La T_{e} d'échauffement admise pour l'enroulement rotorique qui est de 200°C environ.

Pour de grandes vitesses d'entraînement de masses tournantes on utilise de l'aluminium ou du laiton.

L'exécution des enroulements en Al entraîne une diminution de l'échauffement de 78% de celui du cuivre.

Pour cela les moteurs à petites dimensions (jusqu'à 10 Kw) ont leur cage rotorique qui est normalement coulée.

L'échauffement de l'enroulement statorique qui est de , si on a des glissements trop forts, et rotor à l'arrêt (flux faible) on a le courant magnétisant qui est faible

$$D'où W_{p_1} = \int_{t_0}^{t_f} m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \cdot dt = \frac{R_1}{R_2} \int_{t_0}^{t_f} m(I_2')^2 R_2' dt$$

$$= \frac{R_1}{R_2'} W_{p_2}$$

Durée de démarrage :

Elle est déterminée à partir de l'équation

$$t_d = m \cdot \frac{Dg}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_s \int_{g_f}^{g_0} \frac{dg}{M - M_{res}}$$

La durée de démarrage étant inversement proportionnelle au moment du couple d'accélération :

$$M_{acc} = M - M_{res}$$

$$\text{Si } M_{acc} \gg \longrightarrow + \ll$$

D'où l'on a :

$$t = \frac{T}{2} \left(\frac{g^2}{2g_{dec}} + g_{dec} \ln g \right)_{g_f}^{g_0}$$

g_{dec} : glissement de décrochement

$$T = \frac{\pi \cdot m \cdot D_g \cdot n_s^2}{P_{sdec}}$$

P_{sdec} : Puissance du champ tournant au moment du couple de décrochement.

On donne en général g en fonction du $\frac{t}{T}$ et de g_{dec} à partir de courbe.

g_{dec} est donné pour $g_f = 10\%$

$g_{dec} = 40\%$.

Car on n'atteint jamais pratiquement $g=0$.

On exécute les enroulements rotoriques avec une grande résistance rotorique, pour avoir un bon démarrage et un bon freinage avec des durées brèves.

La durée minimale de freinage du décrochement est de 70%.

On a :

$$t = T \left(\frac{3}{4g_{decc}} + g_{dec} \frac{\ln 2}{2} \right)$$

2. CALCUL DE REACTANCES (suite du paragraphe B. p. 45)

La réactance de fuite du stator est déterminée par le flux magnétique ayant des lignes de champ qui embrassent seulement l'enroulement statorique .

Ce flux de fuite se divise en trois catégories:

- Dans l'encoche

- Flux différentiel dû au champ harmonique .

- Flux de fuite dans les parties frontales.

A ces trois flux correspondent trois coefficients de perméance utilisés pour le calcul approximatif des réactances .

a) PERMEANCE DE FUITE DANS L'ENCOCHE :

Du fait qu'on a un enroulement à une seule couche, la perméance de fuite dans l'encoche ne dépend seulement que des dimensions géométriques de l'encoche, car on néglige la chute de potentiel magnétique dans le fer .

$$\text{Donc : } \lambda_{\text{enco}}^2 = \int_0^h \left(\frac{z \cdot y}{h} \right)^2 dy$$

Dans le cas de l'encoche trapézoïdale :

$$\lambda_{\text{enco}} = \frac{2h_1}{3(bn_1 + bn_3)} \left(\frac{1}{3} + \frac{h_2}{bn_1} + 0,785 \right)$$

Avec $h_1 = 18 - 0,5 - 2,5 - 0,75 = 14,25 \text{ m/m}$

D'où : $\lambda_{\text{enco}} = 1,54$

b) PERMEANCE DE FUITE DIFFERENTIELLE:

Elles sont dues aux harmoniques supérieures du champ statorique et rotorique .

$$\lambda_{54} = \frac{t_2 - a_s - a_r}{16} \left(\frac{2}{5} \beta + \frac{3}{5} \right) \text{ avec } \beta = 1.$$

Les coefficients à $\frac{1}{16}$ et $\left(\frac{2}{5} \beta + \frac{3}{5} \right)$ approchés tiennent compte de la diminution

des fuites différentielles de l'enroulement statorique du fait de l'amortissement des champs des harmoniques supérieures par les rotor, ainsi que de l'ouverture des encoches.

$t_2 =$ pas dentaire rotorique $= 1,25 \text{ mm}$

$a_s =$ ouverture de l'encoche statorique $= 2,5 \text{ mm}$

$a_r =$ ouverture de l'encoche rotorique $= 1,0 \text{ mm}$

Doit : $\lambda_{54} = \frac{12,5 - 2,5 - 1,0}{16 \cdot 0,35} (0,4 \cdot 1 + 0,6) = 1,6$

c) DISPERSION EN FER ET PERTES MÉCANIQUES

Elle est telle que : $\lambda_{c1} = \frac{L_{c1}}{L_1} \cdot 0,2$.

Pour les flux de fuites embrassant le nombre total de conducteurs de l'encoche, la perméance des tubes par unité de longueur de l'encoche ou d'entrefer est déterminée par le rapport de la largeur du tube suivant la hauteur de l'encoche ou de l'entrefer à sa largeur suivant la largeur de l'encoche ou de l'entrefer :

d'où :

$$\text{pour : } q=6 ; L_{c1} = 259 \text{ mm.}$$

$$q=2 ; L_{c1} = 145 \text{ mm.}$$

$$\lambda_{c1} = 2,54 ; \quad \lambda_{c1} = 0,72 .$$

Perméance totale :

$$\Sigma \lambda_1 = \lambda_{\text{erc}} + \lambda_S + \lambda_{c1}$$

$$\text{d'où } \Sigma \lambda_1 = 5,28 ; \quad \Sigma \lambda_1' = 3,86 .$$

Les formules utilisées sont empiriques du fait de l'analyse mathématique qui est très difficile .

d) REACTANCE DE FUITE TOTALE

Elle est donnée par :

$$x_I = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{N}{100} \right)^2 \frac{L_1}{pq} \cdot \Sigma \lambda_1 \cdot 10^{-1}$$

$$x_I = 2,08 \Omega ; \quad x_I' = 13,82 \Omega$$

$$* 0,158 = \frac{2}{400}$$

A - DIMENSIONS PRINCIPALES.

Les données que nous avons sont celles d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil de 4 Kw et 1500trs/mn fabriqué par la "Société Electroprecision Roumaine".

On a les données géométriques de ce moteur qui vont nous servir dans le calcul du projet à étudier qui est celui d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil de puissance 3/1 Kw et 3000 / 1000 trs/mn. Ces données étant supposées les mêmes pour ce moteur.

On a ainsi :

D_{1i} = diamètre intérieure = 104 mn.

D_{1e} = diamètre extérieur = 170 mn.

Z_1 = nombre d'encoches au stator = 36

Z_2 = nombre d'encoches au rotor = 26

L_1 = longueur de la machine = 145 mm.

Les calculs seront faits pour les 2 puissances 3 Kw et 1 Kw.

1°) Nombre de paire de pôles :

On a la vitesse du moteur à vide qui est celle du synchronisme.

La formule suivante nous donne la relation entre la fréquence et le nombre de paire de pôles.

.../...

$$\text{On a : } 60 \frac{P}{f} = p n \longrightarrow P = \frac{60 p}{n}$$

f = étant la fréquence = 50 Hz

$$\text{d'où : } -P = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1$$

$$-P = \frac{60 \cdot 50}{2000} = 3$$

2°) Détermination du pas polaire :

Il représente la longueur de l'arc de cercle ayant le ϕD correspondant à un seul pôle.

Il est donné par la formule suivante :

$$\delta_p = \frac{\pi \cdot D_a \cdot i}{2p}$$

On aura ainsi pour chaque puissance :

$$\delta_p = \frac{\pi \cdot 104}{2 \cdot 1} = 163,3 \text{ mm ; } \rightarrow p = 1$$

$$\delta_p = \frac{\pi \cdot 104}{2 \cdot 3} = 54,5 \text{ mm. } \rightarrow p = 2$$

3°) Pas dentaire du stator :

C'est la distance entre 2 encoches successives. Il est donné par la formule suivante :

$$t_s = \frac{\pi D_a \cdot i}{Z_s}$$

Le pas dentaire ne dépendant pas du nombre de paires de pôle est le même pour les 2 puissances. Car, on a aussi le ϕ qui est le même ainsi que le nombre de dents.

.../...

4°) Dimensions de l'encoche statorique :

On dispose d'une encoche trapézoïdale du fait de son utilisation courante dans les machines asynchrones.

On a :

$$b_{n3} = \text{Grande base} = 7,5 \text{ mm}$$

$$b_{ni} = \text{Petite base} = 5 \text{ mm}$$

$$b_{iz} = \text{épaisseur de l'isolant} = 0,5 \text{ mm} \\ \text{des 2 cotés de l'encoche}$$

$$h_{enc} = \text{hauteur de l'encoche} = 18 \text{ mm.}$$

$$a_s = \text{ouverture de l'encoche} = 2,5 \text{ mm}$$

$$h_{iz} = \text{hauteur de l'isolant} = 0,25 \text{ mm}$$

isolant :

La surface de l'encoche nette sera, avec

$$S_{\text{encoche}} = \left(\frac{b_{n3} + b_{ni}}{2} - b_{iz} \right) \\ (h_{enc} - 3h_{iz} - a_s)$$

On obtient :

$$S_{\text{encoche}} = 88,5 \text{ mm}^2.$$

5°) Hauteur de la culasse statorique :

On a la relation suivante qui nous la donne

$$h_{j1} = \frac{D_{1e} - D_{1i}}{2} - h_{1\text{encoche}}.$$

.../...

C'est aussi la hauteur du dos statorique, au dessous des encoches :

$$h_{j4} = \frac{170 - 104}{2} - 13 = 15 \text{ mm.}$$

6°) Largeur d'une dent statorique :

Soit b_{ds} cette largeur de la dent :

$$b_{ds} = \frac{\pi (D_{ai} + 2h_{enc})}{Z_1} \cdot b_{n3} = 4,7 \text{ mm.}$$

7°) Choix des paramètres suivants :

- Coefficient de saturation K_s .
- Coefficient représentant la forme de la courbe d'induction α_i .
- Coefficient de réduction β de la hauteur du conducteur.
- L'entrefer : pour ce cas de machines est choisi telque : $\delta = 0,35 \text{ mm}$:

Il est petit du fait qu'on doit maintenir le facteur de puissance à une valeur proche de l'unité, et en même temps le maintient du courant magnétisant à sa plus petite valeur possible.

Elle sera limitée aussi du fait des raisons d'ordres mécanique (usure des paliers, flèche de l'arbre effort magnétique unilatéral).

On a ainsi une augmentation des fuites différentielles de dispersion et une réduction du courant de démarrage.

$$\text{On a : } \alpha_i = 0,11 ; \beta = 1,0925 ; \delta = 0,35 \text{ mm}$$

.../...

8°) Calcul du nombre de spires :

On a le nombre de spires qui est donné par les formules suivantes :

$$N_1 = \frac{V_1}{4,44 f_1 K_w \Phi}$$

$$N_1 = \frac{\pi D_1 i A_1}{2m_1 I_1}$$

C'est à dire soit à partir du calcul du flux (induction) ou à partir de la densité linéaire A_1 .

Le courant I_1 , est donné par la relation :

$$I_1 = \frac{P}{m_1 V_1 \eta \cos \phi}$$

La densité linéaire A_1 est donné en fonction du nombre de paire de pôles et du pas polaire δ_p , à partir de courbes. (Liswchitz t.II)

On a :

$$P = 1 ; \delta_p = 163,3\text{mm} ; \dots ; I_1 = 6,68 \text{ A}$$

$$p = 3 ; \delta_p = 54,5\text{mm} ; \dots ; I_1 = 2,60 \text{ A}$$

Les rendements et les facteurs de puissance étant choisis telque :

$$3 \text{ Kw} ; 3000\text{trs/mn} : \cos \phi = 0,85 ; \eta = 0,8$$

$$1 \text{ Kw} ; 1000\text{trs/mn} : \cos \phi = 0,75 ; \eta = 0,$$

.../...

D'où :

$$N_1 = 144 \text{ spires} \longrightarrow p = 1$$

$$N_1' = 342 \text{ spires} \longrightarrow p = 3$$

-Nombre d'encoches par pôle et par phase :

$$\text{On a : } q = \frac{Z}{2 \cdot p \cdot m}$$

$$q_1 = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 6$$

$$q_1' = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 2$$

-Coefficient d'enroulement k_w /

Ce coefficient est donné par des tableaux en fonction du nombre d'encoche par pôle et par phase.

$$k_{w_1} = 0,956 \text{ pour } v = 1 \text{ (harmonique fondamentale).}$$

$$k_{w_1}' = 0,966$$

Ou par calcul.

-Le choix du diamètre du conducteur

$$\phi = 0,9 \text{ mm}$$

-Diamètre du conducteur isolé

$$\phi_{is} = 0,97 \text{ mm}$$

-Section du conducteur isolé :

$$S_{co} = 0,638 \text{ mm}^2$$

Du fait qu'on a 3 bobines en parallèle, on a la section qui sera telle que : $S_c = 3 \cdot 0,638 = 1,914 \text{ mm}^2$.

.../...

-Facteur de remplissage :

-Le nombre total de conducteurs est

$$M_a = 2.3.144 = 884 \text{ pour le stator et } p = 1.$$

-Le nombre total de conducteurs pour

$$p = 3 \text{ est : } M'_a = 2.3.432 = 2592.$$

-Dans le calcul du facteur de remplissage on doit prendre le nombre de conducteurs, celui de $p = 1$. on a le nombre de conducteurs par encoche qui sera :

$$M_c = \frac{2592}{36} = 72 \text{ conducteurs.}$$

-Donc les conducteurs isolés nécessitent une section de :

$$(dis)^2 \cdot (M_c) = (0,97)^2 \cdot 72. \text{ (mm}^2\text{)}$$

-Le facteur de remplissage de l'encoche vaut :

$$\frac{p}{f} r = M_c \frac{(dis)^2}{S_{enc}} = 72 \cdot \frac{(0,97)^2}{88,5} = 0,76$$

B - PARAMETRES DU MOTEUR EN REGIME DE TRAVAIL.

Ce chapitre concerne le calcul des résistances des enroulements ainsi que ses réactances.

.../...

Le calcul ci-dessous concerne celui de la résistance et de la réactance dans le stator. Celui du rotor sera exposé par après.

1) Calcul de la résistance du stator :

a) Il faut avant tout calculer la longueur moyenne de la section qui englobe les dents du stator :

$$\text{On a : } \delta_y = \pi \cdot \frac{(D_1 i + h_{z_1})}{2 p} \cdot \beta$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_y : \text{pas polaire à une hauteur } y. \\ \beta = \frac{S_y}{S_z} \quad ; \quad S_z : \text{section de la dent.} \\ h_{z_1} = \text{hauteur de l'encoche.} \end{array} \right.$$

Comme $S_y = S_z$ donc $\beta = 1$, alors on a :

$$\delta_y = \pi \cdot \frac{(104 + 18)}{2 - 1} = 191,5 \text{ mm.}$$

Du point de vue construction, on prend ce pas polaire $\delta_y = 191,5 \text{ mm}$, du fait que c'est l'enroulement le plus sollicité par le courant.

b) Longueur réctifiée de la partie frontale du point de vue pratique :

Soit Y , ouverture de la bobine, inférieure généralement à δ_p du fait qu'il faut éliminer les harmoniques supérieurs 5 et 7 et de réduire ainsi le volume du cuivre.

.../...

On a : la longueur frontale qui sera :

$$L_f = \left(\frac{0,82 - \delta_p}{2 \cos \alpha} \right) 2 \text{ avec } \delta_p = 191,5 \text{ mm.}$$

$$L_f = \frac{0,82 \cdot \delta_p}{\cos \alpha} \text{ avec } \alpha = 50^\circ$$

$$L_f = 259 \text{ mm}$$

c) Longueur moyenne d'une spire :

$$L_{med} = 145 + 259 = 404 \text{ mm.}$$

d) Longueur totale de l'enroulement statique : la relation suivante donne cette longueur :

$$L_A = 2N_A \cdot L_{med} \cdot 10^{-3} \text{ avec } N_A = \text{Nombre de spires}$$

$$L_{med} = 404 \text{ mm.}$$

D'où

$$L_A = 349 \text{ m pour } p=3 \quad N_A = 432 \text{ spires}$$

$$L_A = 116 \text{ m pour } p=1 \quad N_A = 144 \text{ spires.}$$

e) Résistance active de l'enroulement torique : si la température ambiante est en moyenne de 15°

La résistance est :

$$r_A 15^\circ = p \frac{L_A}{a \cdot n_s \cdot S_c}$$

a = nombre de voies d'enroulement.

p = résistivité spécifique du cuivre
à $15^\circ\text{C} = 1/57 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m.}$

.../...

M_e = nombre de conducteurs élémentaires = 1

S_c = section du conducteur = $0,638 \text{ mm}^2$

$a = 3$ pour la cas de la puissance de 3 kw.

$a = 1$ pour le cas de la puissance de 1 kw.

D'où :

$$r_{15^\circ} = \frac{1}{57} \frac{116}{3 \cdot 0,638 \cdot 1} = 1,06 \Omega$$

$$r_{15^\circ} = \frac{1}{57} \frac{349}{1 \cdot 0,638 \cdot 1} = 3,6 \Omega$$

Du fait que le fonctionnement est fixé en moyenne à la température de 75° , le calcul de la résistance à 75° sera tel que :

$$r_{75^\circ} = r_{15^\circ} (1 + \alpha \Delta T)$$

$$\Delta T = 75^\circ - 15^\circ = 60^\circ$$

$$\alpha = 0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{D'où : } r_{75^\circ} = 1,24 \cdot 1,06 = 1,31 \Omega$$

$$r_{75^\circ} = 1,24 \cdot 3,6 = 4,55 \Omega$$

2/ Calcul de la Réactance : (voir à la fin de la partie théorique p. 36)

C - ENROULEMENTS ENCOCHES ET DOS ROTORIQUES

Pour les rotors en court-circuit, les encoches sont exécutés avec encoches ouvertes.

Eviter ainsi les vibrations, le nombre d'encoches rotoriques est généralement pair.

.../...

m est donné, pour les moteurs à cage ayant Z_2 barres au rotor, par la relation :

$$m = \frac{Q \cdot N \cdot K_b}{Z_2}$$

d'où :

$$I_b = I_p \cdot \frac{Q \cdot N \cdot K_b}{Z_2}$$

K_b : dépendant du rendement et de la distribution des pertes dans la machine.

On prend $K_b = 0,9$ (Richter)

Courant I_f par phase :

$$I_f = \frac{P_n \cdot 10^3}{m \cdot U_f \cdot n \cdot \cos \phi_n}$$

Avec : $P_n = 1 \text{ Kw} \rightarrow \begin{matrix} \phi_n = 0,75 \\ \cos \phi_n = 0,75 \end{matrix}$

$P_n = 3 \text{ Kw} \rightarrow \begin{matrix} \phi_n = 0,8 \\ \cos \phi_n = 0,85 \end{matrix}$

D'où le courant dans une barre :

$$\bar{I}_b = 184,10 \text{ A} ; \bar{I}_b = 197,61 \text{ A.}$$

5°) Courant dans les anneaux de court-circuit. La formule d'ARNOLD donne :

$$I_a = \frac{I_b}{2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}}$$

.../

Le courant I_a permettra la détermination de la section des anneaux de court-circuits :

$$\text{d'où : } I_a = 767,08 \text{ A ; } I_a = 274,5 \text{ A.}$$

6°) Dimensions de l'encoche du rotor :

O_r = ouverture de l'encoche = 1mm.

h_1 = 14,8mm = hauteur de l'Al dans l'encoche.

$$d_1 = 5,5\text{mm} ; d_2 = 2 \text{ mm.}$$

$$h_u = 1,05\text{mm.}$$

(Voir schéma sur tirage)

7°) Section des barres :

L'encoche a une forme indiquée sur le tirage. La section est telle que :

$$S_b = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{d_1^2}{4} + \frac{\pi \cdot d_2^2}{2 \cdot 4} + \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot h_1$$

$$\text{Avec } h_1 = h_{\text{tot}} - (d_1 + d_2 \cdot h_u) = 14,8 \text{ mm.}$$

$$\text{d'où : } S_b = 68,97 \text{ mm}^2.$$

Densité de courant :

$$j_b = \frac{I_b}{S_b} \quad \text{---} \quad j_b = \frac{184,10}{68,97} = 2,68 \text{ A/mm}^2$$

$$j_b = \frac{197,61}{68,97} = 2,86 \text{ A/mm}^2.$$

.../...

Section de l'anneau de court-circuitage :

Elle est donnée par : $S_a = a \times b$

$$a = \frac{d_2}{2} + h_1 + \frac{d_2}{2} + h_4 ; b = 15 \text{ mm.}$$

$$a = 1 + 14,8 + 2,75 + 1,06 = 19,6 \text{ mm.}$$

$$\text{d'où : } S_a = 19,6 \cdot 15 = 294 \text{ mm}^2$$

Densité de courant :

$$J_a = \frac{I_a}{S_a} = \frac{797,08}{294} = 2,65 \text{ A/mm}^2.$$

$$J_a = \frac{I_a}{S_a} = \frac{274,45}{294} = 0,95 \text{ A/mm}^2.$$

.../...

D. PARAMETRES DE TRAVAIL DU ROTOR

1 - Résistance du rotor.

Elle est déterminée par :

$$W_2 = Z_2 r_b I_b^2 + 2 \cdot Z_2 r_a I_a^2 = Z_2 I_b^2 \cdot (r_b + 2r_a \left(\frac{I_a}{I_b}\right)^2)$$

$$\text{Or : } \frac{I_a}{I_b} = \frac{1}{2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}}$$

Donc : :

$$W_2 = Z_2 I_b^2 \cdot \left(r_b + \frac{2r_a}{4 \sin^2 \left(\frac{\pi p}{Z_2} \right)} \right) = Z_2 I_b^2 r_2$$

$$\text{D'où : } r_2 = r_b + \frac{r_a}{2 \sin^2 \frac{\pi p}{Z_2}}$$

a) Calcul de r_b :

La résistance d'une barre est donnée par :

$$r_b = \rho_0 (1 + \alpha t) \frac{L_2 \cdot 10^{-3}}{S_b}$$

$$r_b = 1,24 \rho_0 \frac{L_2 \cdot 10^{-3}}{S_b}$$

$$\text{Avec : } \alpha = 0,04$$

$$\alpha t = 75^\circ - 15^\circ = 60^\circ$$

$$1,24 \rho_0 = \frac{1}{23} \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m.}$$

.../...

D'où :

$$r_b = \frac{1}{23} \cdot \frac{145 \cdot 10^{-3}}{68,97} = 9,15 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$r_b = \frac{1}{23} \cdot \frac{145 \cdot 10^{-3}}{68,97} = 9,15 \cdot 10^{-5} \Omega$$

b) Résistance de l'anneau de court-circuit :

$$r_a = \rho_0 (1 + \Delta t \alpha) \frac{\pi \cdot D_{ea} \cdot 10^{-3}}{Z_2 \cdot S_a}$$

En prenant en moyenne un diamètre D_{ea} égal à 85 mm, la résistance sera :

$$r_a = \frac{1}{24} \frac{\pi \cdot 85 \cdot 10^{-3}}{26,294} = 0,152 \cdot 10^{-5} \Omega$$

- Calcul de l'expression $A = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}$:

$$A = 2 \sin \frac{\pi \cdot 1}{26} = 0,242$$

$$A = 2 \sin \frac{\pi \cdot 3}{26} = 0,724$$

La résistance sera :

$$r_2 = 9,15 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 0,152 \cdot 10^{-5}}{(0,242)^2} = 14,39 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$r_2 = 9,15 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 0,152 \cdot 10^{-5}}{(0,724)^2} = 9,73 \cdot 10^{-5} \Omega$$

c) Coefficient de réduction :

.../...

En admettant le nombre de phases du système secondaire m_2 égal à Z_2 , le nombre de spires par rapport à une phase égal à $N_2 = \frac{1}{2}$ et le coefficient $Kw_2 = 1$ (d'enroulement) ; le coefficient² de réduction de la cage d'écuriel du système statorique sera donné par :

$$V = \frac{4m_1(N_1 Kw_1)^2}{Z_2} = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 Kw_1}{N_2 Kw_2} \right)^2$$

Avec : $m_2 = Z_2$; $Kw_1 = 0,956$; $Kw_2 = 0,966$

$$N_2 = \frac{1}{2} ; Kw_2 = 1$$

D'où

$$V = \frac{4.3(144.0,956)^2}{26} = 0,102.10^5$$

$$V = \frac{4.3(432.0,966)^2}{26} = 0,81.10^5$$

d) Résistance active de l'enroulement rotorique rapporté au stator.

$$r'_{2} = r_2 \cdot V \longrightarrow r'_2 = 14,39.10^{-5} \cdot 0,102.10^5 = 1,45 \Omega \longrightarrow 3Kw$$

$$r'_2 = 9,73.10^{-5} \cdot 0,81.10^5 = 7,90 \Omega \longrightarrow 1Kw$$

II - Calcul de la réactance rotorique.

Il faut calculer les perméances pour la dispersion dans l'encoche, la dispersion différentielle, la dispersion dans les parties frontales.

.../...

a) Perméance pour la dispersion d'encoche :

$$\lambda_{e2} = 0,623 + \frac{2 h_1}{3(d_1+d_2)} + \frac{h_u}{ar}$$

$$ar = 1 \text{ mm}$$

$$h_u = 1,05 \text{ mm}$$

$$h_1 = 14,8 \text{ mm}$$

$$d_1 = 5,5 \text{ mm}$$

$$d_2 = 2 \text{ mm.}$$

D'où :

$$\lambda_{e2} = 0,62 + \frac{2 \cdot 14,8}{3(5,5+2)} + \frac{1,05}{1} = 2,97$$

b) Perméance de dispersion différentielle :

C'est l'influence du stator sur le rotor,

donc :

$$\lambda_{s2} = \frac{t_1 - a_s - a_r}{16 \cdot s}$$

$$\lambda_{s2} = \frac{9,08 - 2,5 - 1}{16 \cdot 0,35} = 0,996$$

c) Perméance de fuite dans les parties frontales :

$$\lambda_{f2} = \frac{2,3 \cdot Da}{Z_2 L_2 A^2} \cdot \log \frac{4,7 Da}{a + 2 b}$$

Avec : Da = diamètre de l'anneau de court-circuit.

a et b = dimensions de l'anneau de court-circuit.

.../...

$$\lambda_{f2} = \frac{2,3.85}{26.145(0,242)^2} \log \frac{4,7.85}{19,6 + 2.15} = 0,45$$

$$\lambda_{f2} = \frac{2,3.85}{26.145(0,724)^2} \log \frac{4,7.85}{19,6 + 2.15} = 0,05$$

d) Péremance totale de la cage rotorique :

$$\Sigma \lambda_2 = \lambda_{e2} + \lambda_{s2} + \lambda_{f2}$$

$$\text{D'où: } \Sigma \lambda_2 = 2,97 + 0,996 + 0,45 = 4,416$$

$$\Sigma \lambda_2 = 2,97 + 0,996 + 0,05 = 4,016$$

e) Réactance de l'enroulement rotorique :

Pour le rotor en court-circuit, la réactance est donnée par :

$$X_2 = 4 \pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \frac{L}{2p} \Sigma \lambda_2$$

D'où :

$$X_2 = 1,26.50.1,26 \cdot \frac{145}{2.1} 4,416.10^{-9}$$

$$X_2 = 0,79.50.10^{-9} \cdot 145.4,416$$

$$X_2 = 25,2.10^{-5} \Omega$$

$$X_2 = 23.10^{-5} \Omega$$

NOTA:

La réactance a été prise pour la valeur du nombre de paire de pôles la plus petite, $p = 1$ entraînant la valeur de la réactance qui sera plus grande et qui sera la plus influente,

f) Réactance de l'enroulement rotorique rapporté au stator :

$$X'_2 = V \cdot X_2 \longrightarrow X'_2 = 2,57 \, \Omega$$

$$X'_2 = 18,6 \, \Omega$$

g) Inclinaison de l'encoche rotorique par rapport à l'encoche statorique :

La diminution des bruits provenant des causes magnétiques des couples parasites surgissant au démarrage, nécessite l'inclinaison des encoches rotoriques d'un angle égal au pas de l'encoche du stator.

Le démarrage sera satisfaisant du fait que le courant de démarrage est diminué. La dispersion différentielle va augmenter.

Donc :

$$\gamma_{e2} = \frac{360 \cdot P}{Z_1} = \frac{360 \cdot 2}{36} = 20^\circ$$

20° angle électrique; c'est l'angle moyen qu'on peut choisir pour le cas des 2 puissances.

h) Calcul du coefficient 1/E :

Il donne le rapport de la tension des dispersions à celle de la tension aux bornes. Il résulte de ceci que la tension relative de dispersion est telle que :

$$\frac{1}{\xi} = \frac{X_1 \cdot I_{\mu}}{U_1}$$

Donc :

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{70,6} = 0,0142$$

$$\text{car : } \frac{1}{\xi} = \frac{2,08 \cdot 1,5}{220}$$

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{2,23} = 0,45$$

$$\text{car : } \frac{1}{\xi} = \frac{0,71 \cdot 13,82}{2,23}$$

$$\text{Avec : } I_{\mu} = 1,5 \text{ A} \longrightarrow 3 \text{ Kw}$$

$$I_{\mu} = 0,71 \text{ A} \longrightarrow 1 \text{ Kw}$$

de HEYLAND.

$\frac{1}{\xi}$ étant le coefficient de dispersion

ξ et γ_{e2} .

Des tableaux donnent ∇_{ck} en fonction de

$$\nabla_{ck} = 1,274 \quad ; \quad \nabla_{ck} = 1,07$$

Ces tableaux sont donnés par RICHTER.

E - CALCUL DU CIRCUIT MAGNETIQUE

Le circuit magnétique permet de canaliser les lignes d'induction suivant un tube permettant ainsi d'avoir une augmentation de l'induction.

Sa constitution est faite par l'entrefer, les dents statoriques, du dos statorique, des dents rotoriques et du dos rotorique.

Le calcul du circuit magnétique permet d'avoir la force magnéto-motrice (F.M.M) nécessaire à l'obtention d'un flux magnétique dans l'entrefer induisant une (F.E.M) dans l'enroulement du rotor.

Pratiquement, le calcul de la F.M.M pour chaque circuit se fait séparément, c'est après calcul qu'il faut faire la somme de ces F.M.M.

1 - Tension magnétique dans l'entrefer :

$$F_{\delta} = 2 \frac{B_{\delta}}{\mu_0} K_c \delta$$

B_{δ} = induction dans l'entrefer en Tesla

K_c = facteur de carter

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m.}$$

Du fait que la perméance des tubes n'est pas constante, car le rotor et le stator sont munis d'encoche sur leur périphérie, l'entrefer n'est plus constant.

La concentration des lignes d'induction (ou du champ) est plus grande au regard des dents qu'au regard des encoches, donc l'induction dans le fer augmente.

Le nouvel entrefer sera tel que :

$$\delta' = Kc \cdot \delta.$$

Le stator et le rotor possède chacun un coefficient de carter Kc.

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot B_{\delta} \cdot Kc \cdot \delta \cdot 10^{-6} \text{ A.}$$

a) Calcul de Kc pour le stator et rotor.

Il est donné par la formule :

$$Kc_1 = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \cdot \delta}$$

$$\text{Avec : } \gamma_1 = \frac{\left(\frac{a_s}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_s}{\delta}} ; \gamma_2 = \frac{\left(\frac{a_r}{\delta}\right)}{5 + \frac{a_r}{\delta}}$$

t = pas dentaire en mm.

δ = entrefer en mm.

a_s = 2,5 mm.

δ = 0,35 mm

a_s = ouverture de l'encoche du stator.

Pour le stator :

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{2,5}{0,35}\right)^2}{5 + \frac{2,5}{0,35}} = 4,4$$

D'où : si $t_1 = 9,08$ mm.

$$Kc_1 = \frac{9,08}{9,08 - 4,4 \cdot 0,35} = 1,24$$

Pour le rotor :

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{1}{0,35}\right)^2}{5 + \left(\frac{1}{0,35}\right)} = 1,03$$

a_r = ouverture de l'encoche du rotor

$$a_r = 1 \text{ mm}$$

$$\delta = 0,35 \text{ mm}$$

$$t_2 = 12,5 \text{ mm.}$$

D'où si $t_2 = 12,5$ mm

$$Kc_2 = \frac{12,5}{12,5 - 1,03 \cdot 0,35} = 1,04$$

Avec approximation suffisante, le facteur de carter pour la machine sera :

$$Kc = Kc_1 \cdot Kc_2 = 1,24 \cdot 1,04 = 1,29$$

En choisissant B_g dans l'entrefer en fonction du nombre de paires de pôles, la valeur de F_s sera :

$$\text{Pour } p = 1 \quad B_g = 0,6050 \text{ T}$$

$$\text{pour } p = 3 \quad B_g = 0,4120 \text{ T}$$

.../...

D'où =

$$F_G = 0,6050 \cdot 1,6 \cdot 1,24 \cdot 0,35 \cdot 10^3 = 341 \text{ A}$$

$$F_G = 0,4120 \cdot 1,6 \cdot 1,04 \cdot 0,35 \cdot 10^3 = 250 \text{ A.}$$

II - Tension magnétique dans les dents du rotor :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} \cdot 10^{-1}$$

H_{z1} = champ magnétique dans les dents

h_{z1} = hauteur de la dent du rotor.

a) Calcul de flux dans le stator :

Du fait qu'on a une machine à moyenne puissance, la F.P.M est donnée approximativement :

$$E_1 = 0,97 U_1$$

U_1 = en volts

$$E_1 = 4 \cdot f \cdot K_b \cdot k_w \cdot N_1$$

Le facteur de bobinage est pris tel que :

$$k_b = 1,0925$$

$$N_1 = 144 \quad ; \quad f = 50\text{Hz} \quad ; \quad k_w = 0,956$$

.../...

$$\phi = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$$

Donc l'induction dans l'entrefer est de :

$$B_g = \frac{\phi}{\delta_p L} = \frac{1,02 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6}{0,71 \cdot 163,3 \cdot 145} = 0,6050 \text{ Tesla}$$

coefficient tenant compte de l'aplatissement de la courbe d'induction.

b) Pour le rotor :

$N_2 = 432$, le flux sera :

$$\phi = \frac{0,97 \cdot U_1}{4 \cdot f \cdot K_b \cdot K_w \cdot N_2}$$

$$U = 220 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$K_b = 1,0925$$

$$K_w = 0,966$$

$$N_1 = 432 \text{ spires.}$$

$$\text{Donc : } \phi = 0,231 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$$

$$\text{et } B_g = 0,6050 \text{ Tesla.}$$

Induction dans la dent statorique :

$$B_{z1} = \frac{B_g \cdot t_1}{d_{z1} \cdot k_f}$$

.../...

k_f facteur de remplissage du fait du foisonnement du fer. Pour des tôles d'épaisseur 0,5 mm le choix se porte sur 0,95.

D'où :

$$B_{z1} = \frac{0,605 \cdot 9,08}{4,6 \cdot 0,95} = 1,35 \text{ Tesla}$$

$$B_{z1} = \frac{0,412 \cdot 9,08}{4,6 \cdot 0,95} = 0,815 \text{ Tesla.}$$

La connaissance de B_z donne H_z à partir de diagramme de $B_z = f(H_z)$.

$$\text{Donc } H_{z1} = 6,7 \text{ A/cm} ; H_z = 1,28 \text{ A/cm.}$$

$$\text{D'où : } F_{z1} = 18 \cdot 2 \cdot 6,7 \cdot 10^{-1} = 24,2 \text{ A}$$

$$F_{z1} = 2 \cdot 18 \cdot 1,28 \cdot 10^{-1} = 4,6 \text{ A}$$

III - Tension magnétique dans les dents rotoriques.

Elle est donnée par :

$$F_z = 2 h_{z2} - H_{z2} 10^{-1}$$

Induction dans la dent rotorique :

$$B_{z2} = \frac{B_{z1} t_2}{B_{z1} 0,95}$$

$$\text{D'où : } B_{z2} = \frac{0,605 \cdot 12,5}{6,1 \cdot 0,95} = 1,3 \text{ Tesla}$$

$$B_{z2} = 0,89 \text{ Tesla}$$

f (H₂).

A partir de la courbe d'aimantation B =

$$H_{z2} = 6,3 \text{ A/cm}$$

$$H_{z2} = 1,43 \text{ A/cm.}$$

$$\text{ET : } F_{z2} = 2 \cdot 19,6 \cdot 6,3 \cdot 10^{-1} = 24,60 \text{ A}$$

$$F_{z2} = 2 \cdot 19,6 \cdot 1,43 \cdot 10^{-1} = 5,60 \text{ A.}$$

IV - Tension magnétique dans le dos sta-
torique :

La relation suivante donne :

$$F_{j1} = H_{j1} \cdot L_{j1} \cdot 10^{-1}$$

Déterminer H_{j1} entraîne la détermination

de B_{j1} /

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2L_{j1} \cdot L \cdot 0,95}$$

Avec L_{j1} : longueur du dos rotorique.

D'où :

$$B_{j1} = \frac{1,02 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 19 \cdot 145 \cdot 0,95} = 1,95 \text{ Tesla}$$

$$B_{j1} = \frac{0,231 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 15 \cdot 145 \cdot 0,95} = 0,58 \text{ Tesla.}$$

Il tient compte du fait que l'induction ne reste pas constante sur toute la longueur du dos.

Elle atteint la valeur maximum dans la section du milieu du dos et décroît quand nous nous éloignons de cette section.

L_{j1} ; longueur moyenne du dos statorique.

$$H_{z1} = 210 \text{ A/m} \quad ; \quad H_{z1} = 1,20 \text{ A/cm}$$

$$\frac{S}{S_0} = 0,25 \quad ; \quad \frac{S}{S_0} = 0,5$$

h_{j1} peut être calculer tel que :

$$h_{j1} = \frac{D_{1e} \cdot D_{1i}}{Z} - h_{e1}$$

$$= \frac{170 \cdot 104}{2} - 18 = 15 \text{ mm}$$

$$L_{j1} = \frac{\pi (D_{1e} - h_{j1})}{2p}$$

$$L_{j1} = \frac{3,14 (170 - 15)}{2 \cdot 1} = 242 \text{ mm}$$

Donc :

$$F_{j1} = 0,25 \cdot 210 \cdot 242 \cdot 10^{-1} = 1258 \text{ A}$$

$$F_{j1} = 0,5 \cdot 1,2 \cdot 242 \cdot 10^{-1} = 4,80 \text{ A}$$

V - Tension magnétique dans le dos du rotor.

$$F_{j2} = \frac{S}{S_0} H_{j2} \cdot L_{j2} \cdot 10^{-1}$$

Calcul de l'induction dans le dos

rotorique :

$$B_{J2} = \frac{\phi \cdot 10^{-2} \cdot 10^6}{2h_{J2} \cdot L \cdot 0,95}$$

Calcul de h_{J2} :

$$h_{J2} = \frac{D_{2e} - D_{zi} + \frac{1}{2} D_{zi}}{2} - h_{e2}$$

$$h_{J2} = \frac{D_{2e} - D_{zi} + 1/3 D_{zi}}{2} - h_{e2}$$

Donc :

$$h_{J2} = \frac{104 - 32 + 32/2}{2} - 19,6 = 24,4 \text{ mm}$$

$$h_{J2} = \frac{104 - 32 + 32/3}{2} - 19,6 = 21,7 \text{ mm}$$

Calcul de L_{J2} :

$$L_{J2} = \frac{\pi (D_{zi} + h_{J2})}{2p}$$

$$L_{J2} = \frac{\pi (32 + 24,4)}{2 \cdot 1} = 88,5 \text{ mm}$$

$$L_{J2} = \frac{\pi (32 + 21,7)}{2 \cdot 3} = 28,2 \text{ mm}$$

L'induction B_{J2} sera donnée par :

$$B_{J2} = \frac{1,02 \cdot 10^4}{2 \cdot 24,4 \cdot 145 \cdot 0,95} = 1,50 \text{ teslas}$$

$$B_{J2} = \frac{0,231 \cdot 10^4}{2 \cdot 21,7 \cdot 145 \cdot 0,95} = 0,385$$

.../...

Donc :

$$\text{Pour } \left. \begin{array}{l} g_{11} \\ g_{22} \end{array} \right\} = 0,6 \quad ; \quad H_z = 8$$

$$\left. \begin{array}{l} g_{12} \\ g_{21} \end{array} \right\} = 0,52 \quad ; \quad H_z = 1,1$$

$$\text{ET : } F_{J2} = 0,6 \cdot 8 \cdot 88,5 \cdot 10^{-1} = 42,6 \text{ A}$$

$$F_{J2} = 0,52 \cdot 1,1 \cdot 282,2 \cdot 10^{-1} = 1,56 \text{ A}$$

VI - Coefficients de saturation des dents.

Les machines à exécution normale ont la courbe du champ magnétique dans l'entrefer qui diffère d'une sinusoïde, présentant un aplatissement à cause de la saturation des portions en acier du circuit magnétique.

Cette saturation est mise en évidence par les coefficients de saturation K_s calculés par la relation :

$$K_s = \frac{F_g + F_{z1} + F_{z2}}{F_g}$$

$$\text{D'où } K_s = \frac{341 + 24,2 + 24,6}{341} = 1,14$$

$$K_s = \frac{250 + 4,6 + 5,6}{250} = 1,04$$

VII - Tension magnéto-motrice :

$$F_{\text{cir}} = F_g + F_{z1} + F_{z2} + F_{J1} + F_{J2}$$

$$F_{\text{cir}} = 341 + 24,2 + 24,6 + 125,6 + 42,6 = 558,2 \text{ A}$$

$$F_{\text{cir}} = 250 + 4,6 + 5,6 + 4,8 + 1,56 = 266,5 \text{ A}$$

.../...

VIII - Courant magnétisant :

Pour un circuit, comportant une paire de pôles, la valeur donnée de la F.M.M d'un enroulement à m phase est telle que :

$$I_m = \frac{P \cdot F_{circ}}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot Kw}$$

$$I_m = \frac{1.558,2}{0,93 \cdot 144 \cdot 0,956} = 1,5 \text{ A}$$

$$I_m = \frac{3.266,5}{0,9 \cdot 3432 \cdot 0,966} = 0,71 \text{ A}$$

Les paramètres de travail de la machine (telque : courant de marche à vide, pertes à vides, rendement et puissance absorbée) dépendant du courant magnétisant.

Pour cela, dans le cas des machines normales, la valeur du courant de magnétisation ne doit pas dépasser 50 à 60% du courant nominal.

IX - Coefficient de saturation total.

$$K_s = \frac{F_{circ}}{F_\delta}$$

$$D'où : K_s = \frac{558,2}{341} = 1,64$$

$$K_s = \frac{266,5}{250} = 1,06$$

.../...

F- PERTES EN FER ET PERTES MECANQUES

1a) Poids du dos statorique

$G_{jI} = \rho_{Fe} \cdot jI \cdot L_I \cdot f_{IF} \cdot L_{jI} \cdot 2p \cdot 10^{-6}$ Il est donné par la relation

L_I = longueur de la machine
 f_{IF} coefficient de remplissage du bobinage = 0,95
 ρ_{Fe} = densité du fer.
 L_{jI} = longueur périphérique du stator.

D'où : $G_{jI} = 7,8 \cdot 15 \cdot 145 \cdot 0,95 \cdot 242,5(2;1)10^{-6} = 7,85 \text{ kg.}$
 $G_{jI} = 7,8 \cdot 15 \cdot 145 \cdot 0,95 \cdot 81,5(2;3)10^{-6} = 7,85 \text{ kg.}$

2a) Poids des dents statoriques

$G_{zI} = \rho_{Fe} \cdot h_{zI} \cdot b_{zI} \cdot Z_I \cdot f_{IF} \cdot L_I \cdot 10^{-6}$
 $G_{zI} = 7,8 \cdot 18 \cdot 4,6 \cdot 36 \cdot 0,95 \cdot 145 \cdot 10^{-6} = 3,6 \text{ kg.}$
 b_{zI} = largeur de la dent.

3a) Pertes de base dans le fer des ~~dos~~ statoriques

$P_{jI} = k_{sj} \cdot p_{jI} \cdot G_{jI}$
 p_{jI} = pertes spécifiques = $k \cdot B^2$
 k_{sj} = pour les tôles dynamo = 1,5
 k_{sj} = pour les moteurs à synchrones du fait de l'augmentation des pertes dues à l'usage.

d'où : $p_{jI} = 2,6 \cdot 1,95^2 = 9,9 \text{ W/Kg}$; $p_{jI} = 2,6 \cdot 0,58^2 = 0,86 \text{ W/Kg}$
 $P_{jI} = 1,5 \cdot 9,9 \cdot 7,85 = 116,2 \text{ W}$; $P_{jI} = 1,5 \cdot 0,86 \cdot 7,85 = 10,05$

4a) Pertes de base dans le fer des dents statoriques.

$P_{zI} = k_{sz} \cdot p_{zI} \cdot G_{zI}$; G_{zI} ; $k_{sz} = 1,8$ Pour les moteurs asynchrones
 $p_{zI} = 2,6 \cdot 0,605^2 = 0,94 \text{ W/Kg}$; $p_{zI} = 2,6 \cdot 0,412^2 = 0,44 \text{ W/Kg}$
 $P_{zI} = 1,8 \cdot 0,94 \cdot 3,2 = 5,4 \text{ W}$; $P_{zI} = 1,8 \cdot 0,44 \cdot 3,2 = 2,53 \text{ W}$

5a) Pertes superficielles dans les dents statoriques.

Elles sont données : $P_{supI} = 2p \cdot \tau \cdot (t_I - a_s) \cdot L_I \cdot p_{supI} \cdot 10^{-6} / t_I$

$p_{supI} = \frac{I}{2} \cdot k_o \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{10^4} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{B_e \cdot t_2}{10^4} \right)^2$ Pertes spécifiques superficielles

Pour les tôles d'épaisseur 0,5mm et de qualité : $k_o = 2,5$

$B_o = \rho_o \cdot k_c \cdot B_s$

$\beta_o =$ Amplitudes des oscillations dentaires

$\beta_o =$ est donné par courbe de la fig.17 en fonction du rapport : a_r/s $a_r/s = 1/35 = 2,86$ d'où $\beta_o = 0,22$
 $k_c = 1,29$

$B_o = 0,22 \cdot 1,29 \cdot 0,6050 = 0,1718 \text{ T}$; $B_o = 0,22 \cdot 1,29 \cdot 0,4120 = 0,1170 \text{ T}$

$P_{sup1} = 0,5 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{26 \cdot 3000}{10000}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1718 \cdot 12,5}{10000}\right)^2 = 63,2 \text{ W/m}^2$

$P_{sup1} = 0,5 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{26 \cdot 1000}{10000}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1170 \cdot 12,5}{10000}\right)^2 = 17 \text{ W/m}^2$

6a) Pertes superficielles dans les dents du rotor .

$P_{sup2} = 2p \cdot z \cdot (t_2 - a_r) \cdot L \cdot p_{sup2} \cdot 10^{-6} / t_2$

$B_o = \beta_o \cdot k_c \cdot B_s$ et $\beta_o = f(a_r/s) = 0,38$ pour $a_r/s = \frac{2,5}{0,35} = 7,15$

d'où $B_o = 0,38 \cdot 1,29 \cdot 0,6050 = 0,2944 \text{ T}$; $B_o = 0,38 \cdot 1,29 \cdot 0,4120 = 0,2014 \text{ T}$

or $p_{sup2} = 0,5 \cdot k_o \cdot \left(\frac{z \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{B_o \cdot t_1}{10000}\right)^2$

d'où $p_{sup2} = 2,5 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{36 \cdot 3000}{10000}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{2944 \cdot 9,08}{10000}\right)^2 = 314 \text{ W}$

$p_{sup2} = 2,5 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1000}{10000}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{2014 \cdot 9,08}{10000}\right)^2 = 28,2 \text{ W}$

d'où finalement :

$P_{sup2} = 2 \cdot 1 \cdot 163,3 \cdot \left(\frac{12,5 - 1}{12,5}\right) \cdot 145 \cdot 314 \cdot 10^{-6} = 14,06 \text{ W}$

$P_{sup2} = 2 \cdot 3 \cdot 54,5 \cdot \left(\frac{12,5 - 1}{12,5}\right) \cdot 145 \cdot 28,2 \cdot 10^{-6} = 1,23 \text{ W}$

7a) Pertes par pulsations dans les dents du stator .

Elles sont données par l'expression suivante:

$P_{puls1} = 0,14 \cdot \left(\frac{z \cdot n}{10000}\right)^2 \cdot \left(\frac{B_{puls1}}{1000}\right)^2 \cdot G_{z1}$

Amplitude de la pulsation de l'induction : $B_{puls1} = \frac{\gamma_r \cdot B}{2t_1} \cdot \frac{B}{z1m}$

Calcul de γ_r : $\gamma_r = (a_r/s)^2 / (5 + a_r/s) = (1/0,35)^2 / (5 + 1/0,35) = 1,04$

donc $B_{puls1} = \frac{1,04 \cdot 0,35}{2 \cdot 9,08} \cdot 13500 = 268 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

$B_{puls1} = \frac{1,04 \cdot 0,35}{2 \cdot 9,08} \cdot 8150 = 164 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

d'où :

$$P_{\text{puls}_1} = 0,14 \cdot \left(\frac{26 \cdot 1000}{10000} \cdot \frac{268}{1000} \right)^2 \cdot 3,2 = 1,97 \text{ W}$$

$$P_{\text{puls}_1} = 0,14 \cdot \left(\frac{26 \cdot 1000}{10000} \cdot \frac{164}{1000} \right)^2 \cdot 3,2 = 0,085 \text{ W}$$

82) Pertes par pulsation dans les dents du rotor

$$P_{\text{puls}} = 0,14 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \cdot \frac{B_{\text{puls}}}{1000} \right)^2 \cdot G_{Z2}$$

$$s = (a_s / s)^2 / (5 + a_s / s) = (2,5 / 0,35)^2 / (5 + 2,5 / 0,35) = 4,2$$

- poids de la denture rotorique:

$$G_{Z2} = \rho_{\text{Fe}} \cdot h_{Z2} \cdot b_{Z2} \cdot L_1 \cdot f_{IF} \cdot 10^{-6} \text{ avec } b_{Z2} = b_{\text{dr}} = 6,1 \text{ mm}$$

$$= 7,8 \cdot 6,19 \cdot 0,6 \cdot 6,1 \cdot 145 \cdot 0,95 \cdot 10^{-6} = 3,25 \text{ Kg}$$

$$B_{\text{puls}_2} = \frac{\delta_s \cdot s}{2 \tau_2} \cdot B_{Z2} \text{ d'où } B_{\text{puls}_2} = \frac{4,2 \cdot 0,35}{2 \cdot 12,5} \cdot 13000 = 273,5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

$$B_{\text{puls}_2} = \frac{4,2 \cdot 0,35}{2 \cdot 12,5} \cdot 2900 = 529,5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

d'où

$$P_{\text{puls}_2} = 0,14 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1000}{10000} \cdot \frac{773,5}{1000} \right)^2 \cdot 3,25 = 31,18 \text{ W}$$

$$P_{\text{puls}_2} = 0,14 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1000}{10000} \cdot \frac{529,5}{1000} \right)^2 \cdot 3,25 = 1,62 \text{ W}$$

92) Pertes dans le fer

a) Pertes de base:

$$P_{\text{FeB}} = P_{s..} + P_{Z1}$$

$$P_{FeB} = 116,2 + 5,4 = 121,6 \text{ W}$$

$$P_{FeB} = 10,05 + 2,53 = 12,58 \text{ W}$$

b) Pertes supplémentaires

$$P_{Fes} = P_{sup1} + P_{sup2} + P_{puls1} + P_{puls2}$$

$$-P_{Fes} = 2,15 + 14,06 + 1,97 + 31,18 = 49,6 \text{ W}$$

$$-P_{Fes} = 0,56 + 1,23 + 0,085 + 1,62 = 3,495 \text{ W}$$

c) Pertes mécaniques

Les pertes par frottement et par ventilation sont données en fonction des dimensions de la machine (diamètre) et du type de ventilation.

Du fait qu'elles ne peuvent être calculées par des formules elles sont estimées être entre 1% et 3,7% de la puissance nominale.

$$P_{méc.} = 109 \text{ W} \quad ; \quad P_{méc.} = 20 \text{ W}$$

12) Réactance de magnétisation

Elle est donnée par la relation

$$x_m = \frac{U_f}{I}$$

tout en négligeant la résistance r_m de magnétisation par rapport à la réactance x_m

d'où :

$$x_m = \frac{220}{1,5} = 146 \Omega$$

$$x_m = \frac{220}{0,71} = 310 \Omega$$

Coefficient de réactance C_I est tel que :

$$C_I = 1 + \frac{x_I}{x_m} \quad \text{Avec } x_I = 2,08 \Omega ; x_m = 146 \Omega$$

$$x_I = 13,82 \Omega ; x_m = 310 \Omega$$

$$d'où : C_I = 1 + \frac{2,08}{146} = 1,014$$

$$C_I = 1 + \frac{13,82}{310} = 1,045$$

La correction des réactances et des résistances est telle que

a) $C_I \cdot x_I = 1,014 \cdot 2,08 = 2,11 \Omega$

b) $C_I \cdot x_I = 1,045 \cdot 13,82 = 14,45 \Omega$

$$C_I^2 \cdot x_I^2 = (1,014)^2 \cdot 2,57 = 2,65 \Omega$$

$$C_I^2 \cdot x_I^2 = (1,045)^2 \cdot 18,6 = 20,30 \Omega$$

$$C_I \cdot r_I = (1,014)^2 \cdot 1,31 = 1,33 \Omega$$

$$C_I \cdot r_I = (1,045) \cdot 4,55 = 4,75 \Omega$$

$$C_I^2 \cdot r_I^2 = (1,014)^2 \cdot 1,49 = 1,49 \Omega$$

$$C_I^2 \cdot r_I^2 = (1,045)^2 \cdot 7,9 = 8,65 \Omega$$

D'où la réactance X'_k , et la résistance r'_k qui peuvent être

tel que : $X'_k = C_I X_I + C_I^2 X_I^2$

$$r'_k = C_I r_I + C_I^2 r_I^2$$

Donc : $X'_k = 2,11 + 2,65 = 4,76 \Omega$

$$X'_k = 14,45 + 20,3 = 34,75 \Omega$$

$$r'_k = 1,33 + 1,49 = 2,82 \Omega$$

$$r'_k = 4,75 + 8,65 = 13,40 \Omega$$

La résistance magnétisante est déterminée par

$$r_m = \frac{P_{FeB}}{m \cdot I^2}$$

P_{FeB} = Perte de base

$$r_m = 121,6 / 3 \cdot 1,5^2 = 18 \Omega$$

$$r_m = 12,58 / 3 \cdot 0,71^2 = 8,3 \Omega$$

2) Pertes Joules dans l'enroulement du stator, pour la marche

à vide :

$$P_{j0} = m \cdot I_0^2 \cdot R_I \quad 15 \Omega$$

Avec $I_0 = 1 \mu$

d'où

$$P_{j0} = 3 \cdot (1,5)^2 \cdot 106 = 7,15 \text{ W}$$

$$P_{j0} = 3 \cdot (0,71)^2 \cdot 3,64 = 5,5 \text{ W}$$

3e/ Pertes électriques et de bases dans le fer du stator pour la marche à vide:

$$P'_0 = P_{j0} + P_{FeB}$$

D'où: $P'_0 = 7,15 + 121,6 = 128,75 \text{ W}$

$$P'_0 = 5,5 + 12,58 = 18,08 \text{ W}$$

4e/ Courant de marche à vide et $\cos \phi_0$:

a/ Pertes totales de marche à vide:

$$P_0 = P'_0 + P_{FeB} + P_{mec}$$

$$P_0 = 128,75 + 49,36 + 109 = 287,11 \text{ W}$$

$$P_0 = 18,08 + 3,5 + 20 = 41,58 \text{ W}$$

b/ Courant à vide watté:

$$I_{ow} = P_0 / m \cdot U_I$$

$$I_{ow} = 287,1 / 3.220 = 0,435 \text{ A}$$

$$I_{ow} = 41,58 / 3.220 = 0,063 \text{ A}$$

c/ Courant à vide I_0 :

La relation : $I_0 = \sqrt{I^2 + I_w^2}$ donne

$$I_0 = \sqrt{1,5^2 + 0,435^2} = 1,56 \text{ A}$$

$$I_0 = \sqrt{0,71^2 + 0,063^2} = 0,72 \text{ A}$$

d/ Diamètre du diagramme du cercle:

Il est donné par la relation:

$$D = \frac{U_I}{x'_k + r_I^2/x_m} \neq \frac{U_I}{x'_k}$$

Vu que r_I^2 / x_m est généralement petit par rapport à x'_k et n'a pas d'influence sur le diamètre du cercle.

D'où: $D = \frac{220}{4,76} = 46 \text{ A}$

$D = \frac{220}{34,75} = 6,3 \text{ A}$

e/ Echelle des courants:

- Pour un mm, $I = 0,152 \text{ A}$. D'où: $E_I = 0,152 \text{ A/mm}$

- Pour un mm, $I = 0,021 \text{ A}$. D'où: $E_I = 0,021 \text{ A/mm}$

f/ Diagramme du cercle en mm:

$\frac{D}{E_I} = \frac{46}{0,15} = 300 \text{ mm}$; $\frac{D}{E_I} = \frac{6,3}{0,021} = 300 \text{ mm}$

g/ Calcul de l'angle de pertes pour la construction du diamètre:

$$\text{tg} \alpha_I = \frac{r_m \cdot x_I + r_I \cdot x_m}{r_m (r_I + r_m) + x_m (x_I + x_m)}$$

d'où:

$$\text{tg} \alpha_I = \frac{-18,2,08 + 1,31.146}{18.19,31 + 146.148,1} = 0,007$$

$$\text{tg} \alpha_I = \frac{-8,3.13,82 + 4,55.310}{8,3.12,85 + 310.323,8} = 0,0128$$

h/ Droite des couples de rotation:

$$\text{tg} \alpha_{(g=\infty)} = \frac{C_I \cdot r_I}{x'_k} = \frac{1,33}{4,76} = 0,28$$

$$\text{tg} \alpha_{(g=\infty)} = \frac{4,75}{34,75} = 0,137$$

i/ Droite des ^{puissances} ~~puissances~~ mécaniques:

$$\text{tg } \alpha_{(g=I)} = \frac{r'_k}{x'_k}$$

$$\text{tg } \alpha_{(g=I)} = \frac{2,82}{4,76} = 0,592$$

$$\text{tg } \alpha_{(g=I)} = \frac{8,3}{34,75} = 0,240$$

j/ Echelle des puissances:

$$E_p = 3 \cdot U_I \cdot E_I$$

$$E_p = 3 \cdot 220 \cdot 0,152 = 100 \text{ W/mm} \quad \text{et} \quad E_p = 3 \cdot 220 \cdot 0,021 = 13,86 \text{ W/mm}$$

5º/ Construction du diagramme du cercle:

-La mesure sur l'abscisse est donnée par:

$$O_I O_2 = \frac{I_o}{E_I} \quad (\text{mm})$$

d'où: $O_I O_2 = \frac{1,52}{0,152} = 9,86 \text{ mm}$

$$O_I O_2 = \frac{0,71}{0,021} = 34 \text{ mm}$$

- Sur la perpendiculaire à l'axe des abscisse, au-dessus du point O₂, prendre la mesure :

$$O_2 A'_o = \frac{P'_o}{E_p} \quad (\text{mm}) \quad (P'_o = P_{jo} + P_{FeB})$$

$$O_2 A'_o = \frac{128,75}{100} = 1,28 \text{ mm} \quad O_2 A'_o = \frac{18,08}{13,88} = 1,3 \text{ mm}$$

- Du point A'_0 , construire la parallèle à l'axe des abscisses et prendre sur celle-ci un segment tel que: $A'_0B = 100$ mm pour les deux cas de puissance.
- Perpendiculairement à l'axe des abscisses, construire le segment BR tel que: $BR = 2.100.tg\alpha$

d'où: $BR = 2.100.0,007 = 1,400$ mm
 $BR = 2.100.0,0128 = 2,562$ mm

- Par les points A'_0 et R, tracer la droite sur laquelle il faut mesurer le diamètre du cercle:

$A'_0D = 300$ mm ; $A'_0D = 300$ mm

Tracer le demi-cercle ayant ce diamètre.

- Par le point R, tracer la droite RF perpendiculairement au diamètre A'_0D .

- Sur ce segment RF, mesurer :

$RF' = 100.tg\alpha_{(g=\infty)}$
 $RF' = 100.0,28 = 28$ mm ; $RF' = 100.0,137 = 13,7$ mm
 $RF'' = 100.tg\alpha_{(g=1)}$
 $RF'' = 100.0,592 = 59,2$ mm ; $RF'' = 100.0,24 = 24$ mm

- Par les points A'_0, F', F'' , construire les droites passant par les points $A_{(g=\infty)}$ et $A_{(g=1)}$ appartenant au cercle.

$A'_0A_{(g=\infty)}$ = droite des couples électromagnétiques.
 $A'_0A_{(g=1)}$ = droite des puissances mécaniques, développées par le moteur.

Parallèlement à la ligne des couples A'_0A ($g=00$), construire la tangente au cercle passant par le point A_m , et perpendiculairement au diamètre A'_0D , tracer le segment $A'_m A_m$ dont le moment max. de rotation est obtenu, sans tenir compte du refoulement du courant et de la saturation)

$$A'_m A_m = 114 \text{ mm} \quad ; \quad A'_m A_m = 130 \text{ mm}$$

-Avec un rayon de 100mm, de centre O_1 , construire le cercle pour la détermination du cos

-Perpendiculairement à l'axe des abscisses, mesurer le segment :

$$O_2 A_0 = \frac{P_0}{E_p}$$

$$O_2 A_0 = 1,28 \text{ mm}$$

$$O_2 A_0 = 1,30 \text{ mm}$$

-Pour la détermination des grandeurs du régime normal prendre arbitrairement sur la droite des puissances mécaniques A'_0A ($g=1$) le point P. Et de ce point, élever la perpendiculaire à A'_0D sur laquelle il faut disposer le segment :

$$PP' = \frac{P_n + P_{mec} + P_{Fes} + P_{sup}}{E_p}$$

$$P \cdot P' = \frac{3000 + 109 + 15 + 49,26}{100} = 31,73 \text{ mm}$$

$$PP' = \frac{1000 + 20 + 3,5 + 5,0}{13,8} = 74,5 \text{ mm}$$

-Le point A correspondant approximativement au régime nominal est obtenu en menant par le point P' une droite parallèle à A'_0A ($g=1$). Ainsi le courant du stator pourra être déterminé :

$$I_x = 0, A \cdot E$$

$$\cos \phi = \frac{0,1K}{100}$$

$$\cos \phi = \frac{92}{100} = 0,92 ; \quad \cos \phi = \frac{82}{100} = 0,82$$

-Le courant I_2 sera tel que :

$$I_2' = A_0' A \cdot E_I$$

$$I_2' = 36 \cdot 0,152 = 5,5 \text{ A}$$

$$I_2' = 83 \cdot 0,021 = 1,75 \text{ A}$$

H-VALEURS NOMINALES -RAPPORT C_{max}/C_n

1/ Puissance absorbée :

$$P_* = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos$$

d'où $P_1 = 3 \cdot 220 \cdot 6,2 \cdot 0,92 = 3747 \text{ W}$

$$P_* = 3 \cdot 220 \cdot 2,1 \cdot 0,82 = 1136 \text{ W}$$

2/PERTES joules dans l'enroulement du stator :

$$P_{j1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1$$

$$P_{j1} = 3 \cdot 6,2^2 \cdot 1,31 = 151 \text{ W} ; P_{j1} = 3 \cdot 2,1^2 \cdot 4,55 = 60,2 \text{ W}$$

3/ Pertes joules dans la cage rotorique :

$$P_{j2} = 3 \cdot I_2^2 \cdot r'_2$$

$$P_{j2} = 3 \cdot 5,5^2 \cdot 1,45 = 131,6 \text{ W} ; P_{j2} = 3 \cdot 1,75^2 \cdot 7,8 = 71,6 \text{ W}$$

4/ Pertes supplémentaires :

Les pertes supplémentaires sont considérées comme étant 5% de la puissance absorbée .

$$\text{donc : } P_{\text{supl}} = 0,05 \cdot P_1$$

$$P_{\text{supl}} = 15 \text{ W} ; P_{\text{supl}} = 5 \text{ W}$$

5/ Pertes totales :

$$\Sigma P = P_{j1} + P_{j2} + P_{\text{supl}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{mec}}$$

$$\Sigma P = 151 + 131,6 + 15 + 171 + 109 = 577 \text{ W}$$

$$\Sigma P = 60,2 + 71,6 + 15 + 16,1 + 20 = 163 \text{ W}$$

6/ RENDEMENT :

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{577}{3747} = 0,85 ; \eta = 1 - \frac{163}{1136} = 0,86$$

7/ Puissance secondaire ;

$$P_2 = P_1 - \sum P$$

$$P_2 = 3747 - 577 = 3170 \text{ W} \quad P_2 = 1136 - 163 = 973 \text{ W}$$

8/ Puissance électromagnétique en charge nominale :

$$P_{elem} = P_{1n} - (P_{j1} + P_{FeB})$$

$$P_{ele.m} = 3747 - 272,6 = 3474,4 \text{ W}$$

$$P_{ele.m} = 1136 - 72,8 = 1063,2 \text{ W}$$

9/ Glissement nominal :

$$g_n = \frac{P_{j2}}{P_{ele.M}}$$

$$g_n = \frac{131,6}{3474,4} = 0,0378$$

$$g_n = \frac{71,6}{1063,2} = 0,067$$

10/ Capacité de surcharge mécanique :

$$\frac{C_{max}}{C_n} = \frac{A_m A_m}{A A}$$

$$\frac{C_{max}}{C_n} = \frac{114}{35} = 3,25$$

$$\frac{C_{max}}{C_n} = \frac{130}{77} = 1,75$$

Il faut remarquer que le rapport C_{max}/C_n s'inscrit dans les limites admises dans les normes.

I - CARACTERISTIQUES DE DEMARRAGE

a) PARAMETRES DU MOTEUR TENANT COMPTE DU REFOULEMENT DU COURANT ($\epsilon=1$)1) coefficient ϵ pour la cage en aluminium : ρ = densité de l'aluminium = $\frac{1}{27}$

Dimensions géométriques du rotor :

$$\begin{aligned} a_r &= 1 \text{ m/m} & d_1 &= 5,5 \text{ m/m} & h_r &= 14,8 \text{ m/m} & a &= 18,05 \text{ m/m} \\ h_4 &= 1,05 \text{ m/m} & d_2 &= 2 \text{ m/m} & & & & \end{aligned}$$

$$\epsilon = 2\pi \sqrt{\frac{a}{a_r} \frac{a_1}{a_2} \frac{I}{I_0} \frac{1}{7}} = 0,67 \sqrt{3} \cdot 10^{-1}$$

$$\epsilon = 0,67 \cdot 18,05 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-1} = 2,08$$

Les coefficients entrant dans le calcul du rapport de résistance k_r sont donnés par les courbes de la fig. 3.57

$$\epsilon(\frac{\epsilon}{2}) = 2$$

$$\epsilon'(\frac{\epsilon}{2}) = 0,72$$

2) HAUTEUR FICTIVE DE L'ENCOCHE DU ROTOR :

$$h_r = a / \epsilon(\frac{\epsilon}{2}) = 18,05 / 2 = 9,02 \text{ mm} ; h_x = a \cdot \epsilon'(\frac{\epsilon}{2}) = 18,05 \cdot 0,72 = 13 \text{ mm}$$

3) SECTION RÉDUITE DE LA BARRE DU ROTOR :

$$S_{h_r} = \pi \frac{d^2}{8} \left[1 + \frac{d_1 + b}{2} \frac{r}{r} \left(h_r - \frac{d}{2} \right) \right] = \frac{3,14 \cdot 5,5^2}{8} + \frac{5,5 + 3,9}{2} \cdot \frac{2,9}{2} ; (9,02 - 5,5/2) = 43,7 \text{ mm}^2$$

$$\text{avec } b_r = d_1 - \frac{d_1 - d_2}{h_1} \cdot 2 \cdot (h_r - \frac{d}{2}) = 5,5 - \frac{5,5 - 2}{14,8} \cdot 2 \cdot (9,02 - 5,5/2) = 3,9 \text{ mm}$$

4) AUGMENTATION DE LA RESISTANCE DU ROTOR :

$$\Delta r_{2\epsilon} = r_s \frac{L_1}{L_2} \left(\frac{S_c}{S_{hr}} - 1 \right) \quad \text{Avec } L_1 = L_2 = L = 145 \text{ mm}$$

$$\Delta r_{2\epsilon} = 9,15 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{145}{145} \left(\frac{68,97}{43,7} - 1 \right) = 5,2 \cdot 10^{-5} \Omega$$

5) RESISTANCE ACTIVE du ROTOR :

$$r_{2\epsilon} = r_2 + \Delta r_2$$

$$r_{2\epsilon} = (14,39 + 5,2) \cdot 10^{-5} = 19,59 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$r_{2\epsilon} = 9,73 \cdot 10^{-5} + 5,2 \cdot 10^{-5} = 14,93 \cdot 10^{-5} \Omega$$

6) COEFFICIENT DE FUITE DE L'ENCOCHE DU ROTOR :

$$\lambda_{2x\epsilon} = 0,62 + \frac{2h_x - (d_1 + d_2)}{3(d_1 + b_x)} + \frac{h_4}{a}$$

$$b_x = d_1 - \frac{d_1 - d_2}{h_1} \cdot (h_x - \frac{d_1 - d_2}{2}) = 5,5 - \frac{5,5 - 2}{14,8} \cdot (13 - \frac{5,5 - 2}{2}) = 3,32 \text{ mm}$$

$$\lambda_{2x\epsilon} = 0,62 + \frac{2,13 - (5,5 + 2)}{3(5,5 + 3,32)} + \frac{1,05}{1} = 2,37$$

7) COEFFICIENT DE FUITE TOTAL : $\lambda_{2\phi} = \lambda_{2x\phi} + \lambda_{\theta 2} + \lambda_{c2}$

$\Sigma \lambda_{2\phi} = 2,37 + 0,996 + 0,45 = 3,816$
 $\Sigma \lambda_{2\phi} = 2,37 + 0,996 + 0,05 = 3,416$

8) REACTANCE INDUCTIVE DE FUITE DU ROTOR : $x_{2\phi} = x_2 \cdot \frac{\Sigma \lambda_{2\phi}}{\Sigma \lambda_2}$

$x_{2\phi} = 25,2 \cdot 10^{-5} \cdot 3,816 / 4,416 = 224 \cdot 10^{-6} \Omega$
 $x_{2\phi} = 23,0 \cdot 10^{-5} \cdot 3,416 / 4,016 = 196 \cdot 10^{-6} \Omega$

9) REACTANCE INDUCTIVE TENANT COMPTE DE L'INCLINAISON :

$x_{2\phi} = U_{ck} \cdot x_2$
 $x_{2\phi} = 1,274 \cdot 224 \cdot 10^{-6} = 285 \cdot 10^{-6} \Omega$
 $x_{2\phi} = 1,07 \cdot 196 \cdot 10^{-6} = 210 \cdot 10^{-6} \Omega$

10) RESISTANCES DU ROTOR RAPPORTE AU STATOR :

$r_{2\phi} = 0,102 \cdot 10^{-5} \cdot 19,59 \cdot 10^{-5} = 2 \Omega$
 $r_{2\phi} = 0,18 \cdot 10^{-5} \cdot 1,3 \cdot 10^{-5} = 0,270 \Omega$

11) RESISTANCE DE COURT CIRCUIT (g=1)

$r_{k\phi} = r_I + r_{2\phi}$
 $r_{k\phi} = 1,31 + 2,00 = 3,31 \Omega$
 $r_{k\phi} = 45,5 + 2,70 = 48,2 \Omega$

12) REACTANCE DE COURT CIRCUIT (g=1)

$x_{k\phi} = x_I + x_{2\phi} \cdot v$
 $x_{k\phi} = 2,08 + 2560 \cdot 10^{-6} \cdot 0,81 \cdot 10 = 4,66 \Omega$
 $x_{k\phi} = 13,82 + 2100 \cdot 10^{-6} \cdot 0,81 \cdot 10 = 30,62 \Omega$

13) IMPEDANCE DE COURT CIRCUIT :

$Z_{k\phi} = \sqrt{r_{k\phi}^2 + x_{k\phi}^2}$
 $Z_{k\phi} = \sqrt{(3,31)^2 + (4,66)^2} = 5,72 \Omega$
 $Z_{k\phi} = \sqrt{(48,2)^2 + (30,62)^2} = 58,5 \Omega$

b) PARAMETRES DU ROTOR TENANT COMPTE DU REFOULEMENT DU COURANT ET DE LA SATURATION .

1) COURANT DE COURT CIRCUIT SANS LA SATURATION :

$I_k = U_I / Z_{k\phi}$
 $I_k = 220 / 5,72 = 38,40 \text{ A}$
 $I_k = 220 / 58,5 = 3,76 \text{ A}$

2) COURANT DE COURT CIRCUIT AVEC LA SATURATION :

$$I_{ks} = K \cdot I_k$$

Dans le cas d'une encoche semi fermee au rotor et au stator
K_s est tel que : K_s = 1,25; 1,4

En adoptant K_s = 1,25, Il vient :

$$I_{ks} = 1,1,25 \cdot 38,74 = 48,5A \quad I_{ks} = 1,25 \cdot 3,76 = 4,60A$$

3) Fmm moyenne correspondant à une encoche du stator :

$$F = 0,7 \cdot (I_{ks} / a_1) \cdot U_n \cdot (k_\beta + k_s + k_{w1} \cdot Z_1 / Z_2)$$

k_β etant fonction de β : β = 1, k_β = 1,01

$$d'où : F_{mm} = 0,7 \cdot 4,2 \cdot 72 \cdot (1,01 + 1 \cdot 0,966 \cdot 36 / 26) = 493 A$$

Avec N_{c/enco} = 72 CONDUCTEURS/ENCOCHE; a₁ = 3
N_{c/enco} = 72 CONDUCTEURS/ENCOCHE; a₁ = 1

4) COEFFICIENT C_n :

$$C_n = 0,64 + 2,5 \sqrt{8 / (t_1 + t_2)}$$

$$C_n = 0,64 + 2,5 \sqrt{0,35 / (9,08 + 12,5)} = 0,96$$

5) INDUCTION FICTIVE DANS L'ENTREFER :

$$B_{0S} = F_{mm} \cdot 10 / 1,6 \cdot S \cdot C_n$$

$$B_{0S} = 1944 \cdot 10 / 1,6 \cdot 0,35 \cdot 0,96 = 36400 T$$

$$B_{0S} = 439 \cdot 10 / 1,6 \cdot 0,35 \cdot 0,96 = 9200 T$$

6) Le coefficient x_s est donne par des courbes en fonction de B_{0S} : x_s = 0,64 ; x_s = 0,94

7) COEFFICIENT C₁ :

$$C_1 = (t_1 - a_s) (1 - x_s)$$

$$C_1 = (9,08 - 2,5) (1 - 0,64) = 2,37$$

$$C_1 = (9,08 - 2,5) (1 - 0,94) = 0,395$$

8) DIMINUTION DU COEFFICIENT DE FUI TE DE L'ENCOCHE :

$$\Delta \lambda_{Ig} = (h_4 + 0,58h_3) \cdot (C_I / C_I + I,5a_s) \cdot I/a_s$$

$$\Delta \lambda_{Ig} = (1,05 + 0,58 \cdot 2,75) \cdot (2,37 / 0,395 + 1,5 \cdot 2,5) = 0,364$$

$$\Delta \lambda_{Dg} = (1,05 + 0,58 \cdot 2,75) \cdot (0,395 / 0,395 + 1,5 \cdot 2,5) = 0,095$$

9) COEFFICIENT DE FUI TE DE L'ENCOCHE DU ~~STATOR~~ STATOR :

$$\lambda_{nIs} = \lambda_{nIz} - \Delta \lambda_{Is}$$

$$\lambda_{nIs} = 1,54 - 0,364 = 1,176 \quad ; \quad \lambda_{nIs} = 1,54 - 0,095 = 1,445$$

10) COEFFICIENT DE FUI TE DIFFERENTIEL :

$$\lambda_{sIs} = \lambda_s \cdot x_s$$

$$\lambda_{sIs} = 1,6 \cdot 0,64 = 1,025 \quad ; \quad \lambda_{sIs} = 1,6 \cdot 0,94 = 1,50$$

11) COEFFICIENT TOTAL DE FUI TE DU STATOR :

$$\Sigma \lambda_{Is} = \lambda_{nIs} + \lambda_{sIs} + \lambda_{cI}$$

$$\Sigma \lambda_{Is} = 1,176 + 1,025 + 2,14 = 4,341 \quad ; \quad \Sigma \lambda_{Is} = 1,445 + 1,50 + 0,72 = 3,665$$

12) REACTANCE INDUCTIVE DU STATOR EN TENANT COMPTES FUITES DUES AU CHAMP DE FUI TE :

$$X_{IS} = X_I \cdot (\lambda_{Ig} / \Sigma \lambda_I)$$

$$X_{IS} = 2,08 \cdot (4,341 / 5,28) = 1,71 \quad ; \quad X_{IS} = 13,82 \cdot (3,665 / 3,86) = 12,60$$

13) COEFFICIENT C₂ :

$$C_2 = (t_2 \cdot a_r) (1 - x_s)$$

$$C_2 = (12,5 - 1) (1 - 0,64) = 4,15 \quad ; \quad C_2 = (12,5 - 1) (1 - 0,94) = 0,69$$

c) DIMINUTION DU COEFFICIENT DE FUI TE DE L'ENCOCHE DU ROTOR :

1) POUR LES ENCOCHES SEMI FERMEES :

$$\Delta \lambda_{2S} = (h_4 / a_r) \cdot (C_2 / C_2 + a_r)$$

$$\Delta \lambda_{2g} = (1,05) \cdot (4,15 / 5,15) = 0,85 \quad ; \quad \Delta \lambda_{2g} = (1,05 / 1) (0,69 / 1,69) = 0,42$$

2) COEFFICIENT DES PERTES DE L'ENCOCHE DU ROTOR TENANT COMPTE DU REFOUETEMENT ET DE LA SATURATION

$$\lambda_{n2S} = \lambda_{n2g} - \Delta \lambda_{2g}$$

$$\lambda_{n2S} = 2,37 - 0,85 = 1,52 \quad ; \quad \lambda_{n2g} = 2,37 - 0,42 = 1,95$$

3) COEFFICIENT DE PERTES DIFFERENTIEL :

$$\lambda_{s2s} = \lambda_{s2} \cdot x_s$$

$$\lambda_{s2s} = 0,996 \cdot 0,64 = 0,636 ; \lambda_{s2s} = 0,996 \cdot 0,94 = 0,935$$

4) COEFFICIENT TOTAL DE PERTES:

$$\sum \lambda_{2\varphi s} = \lambda_{n\varphi s} + \lambda_{s2s} + \lambda_{c2}$$

$$\sum \lambda_{2\varphi s} = 1,52 + 0,636 + 0,45 = 2,606 ; \sum \lambda_{2\varphi s} = 1,95 + 0,935 + 0,05 = 2,935$$

5) REACTANCE INDUCTIVE DU ROTOR TENANT COMPTE DU REFOULEMENT ET DE LA SATURATION :

$$x'_{2\varphi s} = x'_2 \cdot (\sum \lambda_{2\varphi s} / \sum \lambda_2)$$

$$x'_{2\varphi s} = 2,57 \cdot (2,606 / 4,416) = 1,51 ; x'_{2\varphi s} = 18,6 \cdot (2,935 / 4,016) = 13,6$$

d) PARAMETRES DE COURT-CIRCUIT TENANT COMPTE DU REFOULEMENT ET DE LA SATURATION :

1) RESISTANCE :

$$r_{k\varphi s} = r_1 + r'_{2\varphi s}$$

$$r_{k\varphi s} = 1,31 + 2 = 3,31 \Omega ; r_{k\varphi s} = 45,5 + 12,09 = 57,59 \Omega$$

2) REACTANCE :

$$x_{k\varphi s} = x_{1s} + x'_{2\varphi s}$$

$$x_{k\varphi s} = 1,71 + 1,51 = 3,22 \Omega ; x_{k\varphi s} = 12,6 + 13,6 = 26,2 \Omega$$

3) IMPEDANCE :

$$z_{k\varphi s} = \sqrt{r_{k\varphi s}^2 + x_{k\varphi s}^2}$$

$$z_{k\varphi s} = \sqrt{3,31^2 + 3,22^2} = 4,6 \Omega ; z_{k\varphi s} = \sqrt{57,59^2 + 26,2^2} = 63 \Omega$$

4) COURANT DE COURT-CIRCUIT :

$$I_{ks} = U_1 / z_{k\varphi s}$$

$$I_{ks} = 220 / 4,6 = 48 \text{ A} ; I_{ks} = 220 / 63 = 3,5 \text{ A}$$

e) COURANT DE DEMARRAGE : g=1

1) REACTANCE MUTUELLE EN COURT-CIRCUIT :

$$x_{12k} = x_{12} \cdot F_{CIRC} / F_s$$

$$x_{12k} = 146.558,2 / 341 = 240 \Omega ; x_{12k} = 310.266,5 / 250 = 330 \Omega$$

2/ Coefficient $C_{2\text{Fs}}$:

$$C_{2\text{Fs}} = 1 + x'_{2\text{Fs}} / x'_{12k}$$

$$C_{2\text{Fs}} = 1 + 1,51 / 240 = 1,006 ; \quad C_{2\text{Fs}} = 1 + 13,6 / 330 = 1,041$$

3/ Coefficients :

$$A' = 0$$

$$B' = 1$$

$$C' = -g(x'_{2\text{Fs}} + x_{1s}) ; \quad D' = g r_1 + r'_{2\text{F}} ; \quad F' = g / C_{2\text{Fs}}$$

d'où : * $C' = -1(1,51 + 1,71) = -3,22\Omega$; $C' = -1(13,6 + 12,6) = -26,2\Omega$

* $D' = 1,31 + 2 = 3,31\Omega$; $D' = 4,55 + 2,7 = 7,25\Omega$

* $F' = 1 / 1,006 = 0,995$; $F' = 1 / 1,041 = 0,96$

4/ Courant de Démarrage statorique:

$$I_1 = U_g / \sqrt{C'^2 + D'^2}$$

$$I_1 = 220 \cdot 1 / \sqrt{3,22^2 + 3,31^2} = 47A$$

$$I_1 = 220 \cdot 1 / \sqrt{26,2^2 + 7,25^2} = 8,7A$$

5/ Courant de Démarrage rotorique

$$I'_{2p} = (1 / C_{2\text{Fs}}) \cdot I_1$$

$$I'_{2p} = 47 / 1,006 = 46,8A ; \quad I'_2 = 8,7 / 1,041 = 8,35A$$

6/ Rapport des Courants de Démarrage et nominal: I_p / I_n

$$I_p = I_1 = 47A ; \quad \bar{I}_p = \bar{I}_1 = 8,7A$$

$$I_n = 6,2A ; \quad \bar{I}_n = 2,7A$$

d'où $I_p / I_n = 47 / 6,2 = 7,5$; $\bar{I}_p / \bar{I}_n = 8,7 / 2,7 = 4,14$

7) Rapport des Couples de démarrage et nominal:

$$C_p / C_n = (I'_{2p} / I'_{2n})^2 \cdot (r'_{2\text{F}} / r'_2) \cdot g_n / g$$

$$C_p / C_n = (47 / 5,5)^2 \cdot (2 / 1,45) \cdot 0,0378 = 3,6$$

$$C_p / C_n = (8,7 / 1,75)^2 \cdot (2,7 / 7,9) \cdot 0,067 = 0,55$$

CARACTERISTIQUES DE DEMARRAGE
pour 1kW -1000trs/mm

ξ	0	0,25	0,5	0,75	1	ξ_{max}	ξ_n
$I_1(A)$	0,714	6,1	6,615	6,74	6,80	4,66	2,1
$\frac{C}{C_n}$	0/77	97/77	58/77	41,5/77	30/77	130/77	77/77
$\frac{C}{C_n}$	0	1,26	0,75	0,54	0,39	1,70	1
$I_2(A)$	0	5,48	5,9	6,05	6,11	4,14	1,76

CHARACTERISTIQUES DE TRAVAIL
pour 1kW -1000TRS/MN

P_2 (W)	0	250	500	750	1000	1250	1500
I_I (A)	0,714	0,84	1,176	1,61	2,10	2,68	3,55
I_2 (A)	0	0,4	0,84	1,28	1,75	2,33	3,15
$\cos \phi$	0,5	0,51	0,72	0,79	0,82	-	-
P_I (W)	27,6	296,7	579	855,6	1145,4	1463	1835
P_2/P_n	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
η	0	0,84	0,865	0,876	0,86	0,85	0,81
g	0	0,01	0,016	0,025	0,035	0,046	0,065
n trs/mn	1000	990	984	975	965	954	935

CARACTERISTIQUES DE DEMARRAGE
pour 3kW - 3000 trs/mn

ε	0	ε_n	0,25	ε_{max}	0,5	0,75	1
$I_1(A)$	1,36	6,2	25,5	28,5	34,6	38,4	40,4
$\frac{C}{C_n}$	0/35	35/35	10/35	14/35	104/35	85/35	70/35
$\frac{C}{C_n}$	0	1	3,14	3,25	2,97	2,43	2
$I_2(A)$	0	5,5	24,4	27,36	33	37	39

CARACTERISTIQUES DE TRAVAIL
pour 3kW - 3000trs/mn

$P_2 (W)$	0	750	1500	2250	3000	3750	4500
$I_I (A)$	1,36	2,13	3,11	4,5	6,2	7,5	9
$I_2 (A)$	0	1,21	2,6	4	5,5	6,7	8,4
$\cos \varphi$	0,123	0,66	0,84	0,9	0,92	0,935	0,940
$P_I (W)$	190	1000	1800	2700	3550	4400	5500
P_2/P_n	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
η	0	0,75	0,835	0,865	0,845	0,833	0,82
g	0	0,008	0,016	0,024	0,033	0,045	0,058
n trs/mn	3000	2976	2952	2928	2890	2865	2826

J. DETERMINATION DE L'ACCROISSEMENT DE TEMPERATURE

Il faut distinguer :

- La chute de temperature dans l'isolement statorique
- L'accroissement de la temperature de la surface exterieure du stator par rapport a la temperature de l'air de refroidissement :

I) CHUTE DE TEMPERATURE DANS L'ISOLEMENT STATORIQUE :

$$\theta_i = \frac{A_s \cdot \Delta S \cdot t_s \cdot S_i}{4,25 \cdot \pi \cdot D_e}$$

-Nombre d'amperes fil par encoche :

$$A_s = I_{In} \cdot N_{cond/enc} / a \cdot S_c$$

$$A_s = (7,5 \cdot 72) / 3,0,638 = 563A/cm \quad A_s = (2,7 \cdot 72) / 0,638 = 304A/cm$$

DENSITE DE Courant ΔS :

$$\Delta S = I_{In} / a \cdot S_c$$

$$\Delta S = 7,5 / 3,0,638 = 3,92 A/mm^2 \quad \Delta S = 2,7 \cdot 0,638 = 4,22A/mm^2$$

-Epaisseur de l' isolant :

$$S_i = g_i + g_{ic} / 2$$

$$S_i = 0,25 + 0,05 / 2 = 0,275mm$$

-Perimetre/

$$\pi \cdot D_e = 3,14 \cdot 170 = 535mm$$

-Longueur totale pour les 36 encoches:

$$t_s = b \cdot n^2 \cdot Z_I$$

$$t_s = 7,7 \cdot 36 = 277mm \quad t_s = 277mm$$

-Temperature θ_i :

$$\theta_i = \frac{563 \cdot 3,92 \cdot 277 \cdot 0,275}{4,25 \cdot (535)} = 73,5^\circ$$

$$\theta_i = \frac{304 \cdot 4,22 \cdot 277 \cdot 0,275}{425 \cdot 535} = 43^\circ$$

2) ACCROISSEMENT DE LA TEMPERATURE DE LA SURFACE EXTERIEURE DU STATOR PAR RAPPORT A LA TEMPERATURE DE L'AIR DE REFROIDISSEMENT. :

$$a_s = \frac{P_{Fes} + 0,5P_{sup}}{\pi \cdot D_{Ie} \cdot L_I} + \frac{\rho_f \cdot A_s \cdot s}{100} + \frac{D_{Ii}}{D_{Ie}}$$

$$a_s = \frac{49,4 + 0,5 \cdot 15}{\pi \cdot 170 \cdot 145} + \frac{(1/57) \cdot 563 \cdot 3,92}{100} + \frac{104}{170} = 0,24$$

$$a_s = \frac{3,5 \cdot 0,5 \cdot 5}{\pi \cdot 170 \cdot 145} + \frac{(1/57) \cdot 304 \cdot 4,22}{100} + \frac{104}{170} = 0,138$$

-Vitesse de l'air :

$$V = \frac{D_i \cdot f \cdot 2\pi}{2p}$$

$$V = \frac{164 \cdot 50 \cdot 2}{2 \cdot 1} = 16,3 \text{ m/s} ; \quad V = \frac{104 \cdot 50 \cdot 2\pi}{2 \cdot 3} = 5,45 \text{ m/s}$$

- Coefficient d'emission dans l'air :

$$\alpha_{vs} = \alpha(0,1 \cdot V + 1) \quad \alpha = 3,3 \cdot 10^{-3}$$

$$\alpha_{vs} = 3,3 \cdot 10^{-3} (2,63) = 8,7 \cdot 10^{-3}$$

$$\alpha_{vs} = 3,3 \cdot 10^{-3} (1,545) = 5,1 \cdot 10^{-3}$$

- Temperature d'echauffement :

$$\theta_x = a_s / \alpha_{vs} \quad \theta_x = 0,24 / 8,7 \cdot 10^{-3} = 27,6^\circ$$

$$\theta_x = 0,138 / 5,1 \cdot 10^{-3} = 27,1^\circ$$

- L'echauffement moyen de l'enroulement du stator est tel que :

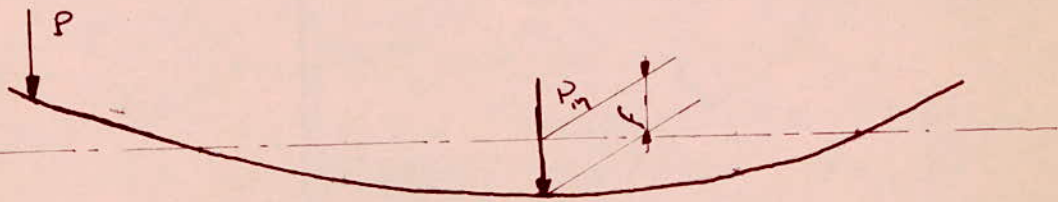
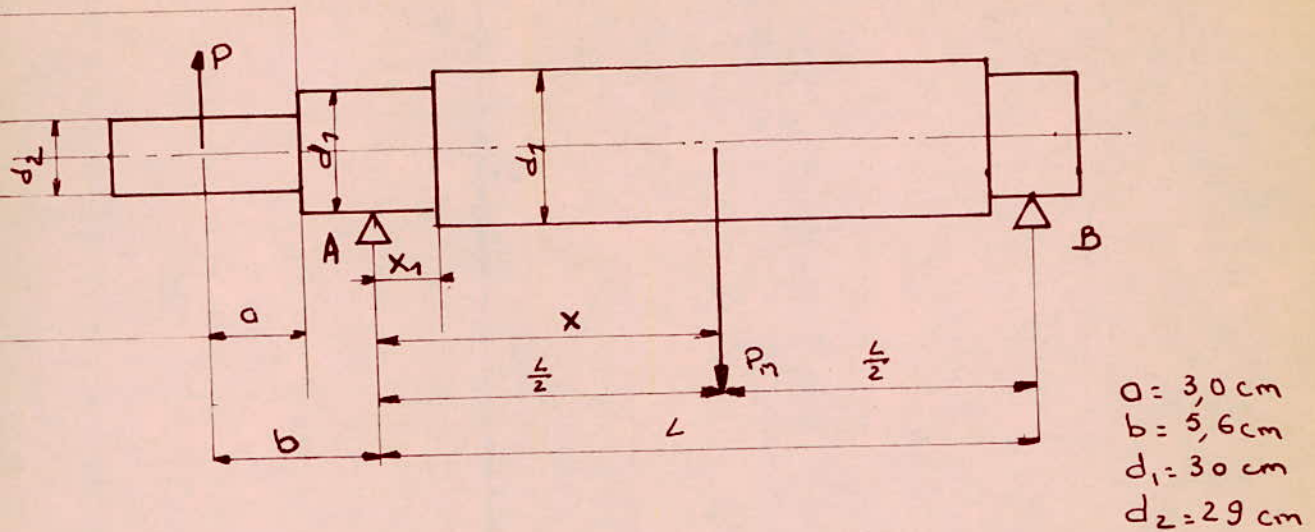
$$\theta_s = \theta_i + \theta_x$$

$$\theta_s = 73,5 + 27,6 = 101,1^\circ \quad 120^\circ$$

$$\theta_s = 43 + 27,1 = 70,1^\circ \quad 120^\circ$$

La temperature ainsi calculée est comprise dans les limites imposées par la classe d'isolation E c'est à dire 120° .

Dessin de l'arbre; avec les forces qui s'y exercent:



a/ Données Fondamentales.

1. Puissance Nominale sur l'arbre du moteur électrique.
2. Vitesse Nominale de Rotation
3. Poids du rotor
4. Poids de la roue de Transmission
5. Diamètre de la roue de Transmission
6. Diamètre extérieur du rotor
7. Longueur du Fer du rotor
8. Entrefer du rotor
9. Tableau avec les données de l'arbre

d cm	$I = \frac{\pi}{64} d^4$	x cm	x_1 cm	x_2^3 cm ³	x_1^3 cm ³	$x^3 - x_1^3$ cm ³	x^2 cm ²	x_1^2 cm ²	$x^2 - x_1^2$ cm ²
3,2	5,03	9,05	0,95	740	0,859	739,14	82,00	0,901	81,099
$S_1 = \frac{x^3 - x_1^3}{I} = \frac{739,14}{5,03} = 146,9 \text{ 1/cm}$							$S_0 = \frac{x^2 - x_1^2}{I} = \frac{81,099}{5,03} = 16,08 \text{ 1/cm}$		

$$\checkmark \text{ Il est donné tel que : } M_{Tp} = 97500 \cdot \frac{P_n}{n} = 97500 \cdot \frac{3}{3000}$$

$$\text{d'où } M_{Tp} = 97,5 \text{ Kgf/cm.}$$

11. Force de Transmission correspondant à la puissance nominale soit p cette force de Transmission.

$$\text{donc : } p = C \cdot \frac{2 M_{Tp}}{D_{r.T}} = 1,8 \cdot \frac{2 \cdot 97,5}{47,6} = 8,84 \text{ Kgf.}$$

Avec : $C = 1,8$ pour les Transmissions à courroie Trapézoïdale.

b/ Flèche et vitesse critique de l'arbre et de la roue de Transmission.

1. Flèche de l'arbre au milieu du rotor dû à son poids:

Elle est donnée par:

$$f_{pe} = \frac{G_{rot} \cdot S_1}{G \cdot E} = \frac{9,35 \cdot 146,9}{6 \cdot 2,1 \cdot 10^6} = 0,000109 \text{ cm}$$

avec pour l'acier $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$

2. Flèche de l'arbre au milieu du rotor due à l'extension de la courroie dans une direction horizontale correspondante à la puissance nominale du moteur électrique.

$$f_{pe} = \frac{p \cdot b \cdot S_0}{4 E} = \frac{8,84 \cdot 56 \cdot 16,08}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^6} = 0,000946 \text{ cm}$$

3. Excentricité initiale calculée pour le rotor:

$$e_0 = k \cdot \delta + f_{pe} = 0,15 \cdot 0,035 + 0,000946 = 0,00609 \text{ cm}$$

k : coefficient tenant compte de la réduction de l'entrefer due à cette flèche.

$$k = 0,1 \text{ pour } \delta \geq 0,5 \text{ mm}$$

$$k = 0,15 \text{ pour } \delta < 0,5 \text{ mm}$$

4. Force initiale d'attraction magnétique unilatérale:

$$\text{Elle est telle que : } F_m = 2 \cdot D_i \cdot L \cdot \frac{e_0}{\delta} \quad \left\{ \begin{array}{l} D_i = 10,4 \text{ cm} \\ e_0 = 0,00609 \text{ cm} \\ \delta = 0,35 \text{ mm.} \end{array} \right.$$

$$\text{d'où } F_m = 2 \cdot 10,4 \cdot 14,5 \cdot \frac{0,00609}{0,035} = \underline{\underline{46,5 \text{ Kgf.}}}$$

5. Flèche correspondant à la force d'attraction magnétique unilatérale.

$$f_0 = f_{pe} \cdot \frac{F_m}{G_{rot}} = 0,000109 \cdot \frac{46,5}{9,35} = 0,00054 \text{ cm.}$$

Procédé Technologique pour le Sous ensemble du Rotor.

Pour pouvoir déterminer le procédé technologique et pour choisir l'outillage le plus approprié ou le plus adéquat on considère, 2 hypothèses de fabrication:

- 1/ Production en petite série, approximativement 5000 moteurs/an
- 2/ Production en grande série, approximativement 40.000 moteurs/an.

En partant de ces 2 hypothèses, se fait la détermination de la technologie et le nombre d'outillage pour chaque cas à part tenant compte simultanément de l'économie de l'approvisionnement en matériaux.

Pour la Production Petite Série

Nbre d'opération	Nom du Repère Nom de l'opération	Nom de la machine utilisée	Temp		Nombre de machine nécessaire
			par mot. en mn	par série en h	
0	1	2	3	4	5
I. Ligne de tôle					
1.	Découpage en bande	cisaille		100	0,17
2.	Matrigage du centre et encoche rotorique	Presse avec excentrique	8,5	708	1,18
3.	Matrigage encoche stator et découpage	"	16,2	1350	2,25
II Ligne d'arbre					
1.	Découpage	scille	1,12	93	0,15
2.	Egalisation	Tour //	3,00	166	0,27
3.	Centrage	"	0,9	75	0,12
4.	Travail autour de l'ébauche de la partie de la roue de Transmission	"	1,92	160	0,27
5.	Travail autour de l'ébauche pour le ventilateur	"	1,81	151	0,25
6.	Fraisage à la mortaisage du coin	Fraiseuse universel	1,00	84	0,14
7.	Randalinasation	Presse. excentr.	1,00	84	0,14
III. Ligne de Cage					
1.	Pesage du paquet	Bascule	0,6	50	-
2.	Emballage sur manchon		1,90	50	-

N° de l'opération	N° de Repère Nom de l'opération	Nom de la machine utilisée	Temps		Nombre de machine nécessaire
			Par mot. en mn	par série en h	
0	1	2	3	4	5
3°	Pressage du paquet sur manchon	Presse Hydraulique	1,5	125	0,21
			2,90	241	0,41
4°	Coulage	Mach. de sous pression			
<u>IV</u> Ligne du rotor					
1.	Pressage de l'axe dans la cage	Presse Hydraul.	1,15	96	0,15
2.	Travail autour pour le finissage de la roue de Transmission	Tour parall.	1,80	150	0,25
3.	Travail autour pour le finissage de la partie du ventilateur	"	1,60	133	0,22
4.	Travail autour de l'ébauche du paquet	"	1,65	137	0,22
5.	Travail autour du finissage du paquet	"	1,8	150	0,25
6°	Rectification de la partie de la roue de transmission	Rectificuse	1,6	133	0,22
7.	Rectification de la partie du ventilateur	"	0,9	75	0,12
8.	Equilibrage	Machined'équilibrer	2,7	225	0,37
Temps nécessaire pour un rotor			45,03 mn		

Pour la détermination du nombre de machine, il a été considéré le travail en 3 couches, temps total 600 h/mois.

Machines nécessaires :

- * Cisaille 1 pièce
- * Scie mécanique 1 pièce
- * Presse excentrique 4 pièces.
- * Presse hydraulique 1 pièce.
- * Machine de coulage sous - pression 1 pièce.
- * Tour parallèle 2 pièces
- * Fraiseuse universelle 1 pièces
- * Rectificuse 1 pièce
- * Machine d'équilibrage 1 pièce

Il a été considéré l'application des technologies modernes suivantes:

1. Utilisation d'un agrégat de fraisage de la tête de l'arbre et l'exécution des trous de centrage
2. Usinage de l'arbre un tour à ébauche programme
3. Usinage complet de l'arbre, incluant la rectification
4. Élimination de la fixation de l'arbre, dans la cage à l'aide des grenets; l'introduction de l'arbre dans la cage est chauffé et puis refroidi.
5. Utilisation de la tôle et matrigage sur des matrices à 4 pas, en exécutant d'un seul coup autant la tôle du stator que du rotor.
Le système permet le rassemblement des tôles sur une machine.
6. Machine spéciale pour l'empaquetage des tôles du rotor et introduction du mandrin dans l'intention du coulage.

L'application de ces technologies diminue le temps nécessaire pour l'exécution d'un rotor de 45,93 mn à 27,15 mn.

N° de l'opération	N° du Repère Nom de l'opération	Nom de la machine utilisée	Temps		Nombre de machines.								
			Par mot en mn	Par série en h									
1	I. Ligne de tôle	Presse avec Avance Automatique	4,5	3000	5								
	1. Matrigage de la tôle du rotor et stator en 4 pas												
	II Ligne d'arbre					scie	1,12	747	1,25				
	1. Découpage à la longueur.												
	2. Fraisage à la longueur et l'exécution des trous de centrage									Fraiseuse et Centreuse	1,7	1135	1,89
	3. Ébauche autour									Tour à ébauche programme	2,1	1400	2,33
4. Rectification pour les roulements de la partie de transmission de la roue.	Rectifieuse	1,6	1065	1,77									
5. Idem pour la partie ventilateur.	⋮	0,9	600	1									
6.	Fraisage à la mortaise du coin.	Fraise universelle	2,38	1580	2,63								

N° de l'opération	Nom de l'opération N° du Repère	Machine utilisée	Temps		Nombre de machine. nécessaires.
			par mat enm	par série en h.	
<u>III</u> Ligne de cage					
1.	Empaquetage	Empaqueuse	2,7	1800	3
2.	Coulage de la cage	Couleuse sous pression	2,6	1730	2,9
<u>IV</u> Ligne du rotor					
1.	Echauffement de la cage et pressage sur l'arbre. Refroidissement	Machine spéciale	1,4	934	1,55
2.	Ebauchage des paquets	Tour //	1,65	1030	1,72
3.	Finissage du paquet	"	1,8	1200	2
4.	Equilibrage	Équilibreuse	2,7	1800	3
Temps nécessaire pour un rotor :			27,15	minutes	

De cette présentation de ce procédé technologique pour les 4 lignes spécifiques (lignes de tôle, d'arbre, de cage, du rotor) la conclusion qui s'en tire : il ne faut commencer les machines que seulement sur la ligne des rotors. et que toutes les machines sont judicieusement chargées, il peut être organisée une fabrication par ligne de fabrication, les 3 lignes étant convergentes dans la ligne des rotors.

Machines Nécessaires:

1. Ligne de Tôle :
 - * Presse à avants automatique
2. Ligne d'arbre :
 - Scie mécanique
 - Fraisuse et centreuse
 - Tour à bande programme
 - Fraisuse universelle
 - Rectifieuse.
3. Ligne de cage:
 - * Empaqueuse
 - * Couleuse sous - pression
 - * Machine spéciale pour l'échauffement
 - * " " " " le Refroidissement
 - * Tour //
 - * Équilibreuse

Protection de la Machine Electrique.

Calculée

Les types normaux de protection ont à la base:

- ✓ Protection contre le toucher et la pénétration de corps étrangers.
- ✓ Protection contre la pénétration des liquides.

a/ Protection contre le toucher et le corps étranger:

Elle a conduit l'élimination de la possibilité du toucher avec les outils, et la pénétration de corps étrangers avec des dimensions, plus grandes que 1mm.

La Carcasse de la machine ne doit pas avoir des ouvertures en admettant des interstices au maximum de 1mm, (entrée des cables aux bornes, et passage de l'arbre).

b/ Protection contre la pénétration des liquides:

Elle est appliquée en principe aux machines montées sur les lieux exposés aux précipitations atmosphériques.

Il a été tenu compte de ce paramètre, lors de l'assemblage des 2 couvercles avec la carcasse, entre lesquels il faut exécuté un seuil assurant une étanchéité parfaite.

Pour le cable de raccordement de la boîte à bornes, l'étanchéité est réalisée par l'intermédiaire d'un bossage prévu.

Les distances d'isolement entre les vis de forme et le couvercle sont adoptées conformément aux Normes pour les tensions allant jusqu'à 500V.

Règles de la Sécurité de Travail

concernant la mise à la terre des Machines Electriques

1. La Carcasse de la machine a été munie d'une borne pour la connexion de mise à la terre.
2. La boîte à bornes est munie d'une borne pour la protection au neutre du réseau.
3. Les vis et les rondelles composantes des bornes ont été protégées contre la corrosion, la Plaque signalétique étant en acier inox.
4. Les bobinages sont doublement imprégnés et reçoivent une application d'une couche de vernis.

Règle de protection contre le toucher des Pièces en mouvement.

Conformément aux Normes, toutes les pièces en mouvement, à l'exception de l'extrémité libre de l'arbre utilisé pour le couplage mécanique, doivent être munies d'un système de protection durant le fonctionnement.

Pour la transmission du couple moteur par la machine, l'extrémité de l'arbre a été munie d'un espace pour une clavette, les 2 étant assemblés forcément.

La Protection thermique est faite généralement sur demande. (protection thermique incorporé au bobinage).

Conduite du calcul du prix de revient de la machine

Il a été donné ici un aperçu bref sur le déroulement du calcul du prix de revient de la machine sans les détails de prix des éléments la constituant .

Le prix de revient de la machine permet d'indiquer économiquement, à partir des prix des différents éléments constituant la machine ,des différents aspects économiques de l'activité de l'entreprise :

la valeur ,le coût réel de la machine dû au processus de production pour son élaboration .

Ce prix de revient étant global ,du fait qu'il ne peut être établi pour chaque produit à part , du fait aussi de la méconnaissance des dépenses planifiées et effectuées par lieu de production .

L'idée faite sur la conduite du calcul du prix de revient par produit en toute logique se résume tel que :

- Prix du matériau direct
- Salaire direct
- Régie de fabrication
- Régie d'entreprise
- Investissement réservé pour les nouvelles techniques

Le prix global de la machine ,suivant les modalités de production se composera tel que :

- Dépenses directes réparties directement par produit (salaires directs ,prix des matériaux utilisés)
- Dépenses indirectes (Régie de fabrication ,Régie d'entreprise) .

Donc le prix de revient de la machine , en résumé, comprendra:

Soit: $-P_{R.T.U}$ = Prix de revient total à l'usine

$P_{R.T.U}$ = Prix des matériaux + Salaires directs + Régie de fabrication + Régie d'entreprise
 $-P_{RC}$ = Prix de revient commercial

P_{RC} = $P_{R.T.U}$ + Investissements (techniques nouvelles)
 $-B$ = Bénéfice à réaliser sur la machine

d'où le prix de revient global $P_{R.G.M.E}$ de la machine électrique :

$$P_{R.G.M.E} = P_{R.T.U} + I_{inv.} + B$$

- CONCLUSION-

Je termine cette étude sur la construction de la machine asynchrone , en précisant que l'étude sur le prix de revient n'a pas été traitée profondément ,sur la base des prix des divers éléments car il m'a été dans l'impossibilité de les avoir malgré quelques contacts effectués auprès de certaines Sociétés ,spécialisées dans la construction des moteurs electriques etrestés sans reponse . Aussi ai-je donné un aperçu bref sur la façon du deroulement de ce calcul.



- B I B L I O G R A P H I E -
=====

- I- "Calcul des machines électriques" - M.LIWSCHITZ et
L. MARET (Tomes 1 et 2).
- II- " Enroulements des machines asynchrones ",RICHTER .
- III- " Construction des bobinages électriques " C. CLEMENT.
- IV- " Manuel de bobinage des moteurs électriques "
- F. RASKOP -
- V- " Machines électriques " M.KOSTENKO et L.PIOTROVSKY
- VI- " Memento d'électrotechnique " A.CURCHOD et L.VELLARD
- VII- " Revue SIEMENS " . 1967
- VIII- " Revue JEUMONT-SCHNEIDER " . 1975
- IX- " ^{Technique} ~~Revue~~ de l'ingénieur". T.I
- X- "Cours manuscrit de"Construction des machines électriques"
de M^r Carol SAAL.

Diagramme du Cercle pour 1kW, 1000 r/min

$A_1 A_2 (g=1)$ Droite des Puissances

$A_1 A_2 (g=1)$ Droite des Couple électromagnétiques

E_1 = échelle de Courant = 0,231 A/mm

E_2 = échelle de Puissance = 0,13,8 W/mm

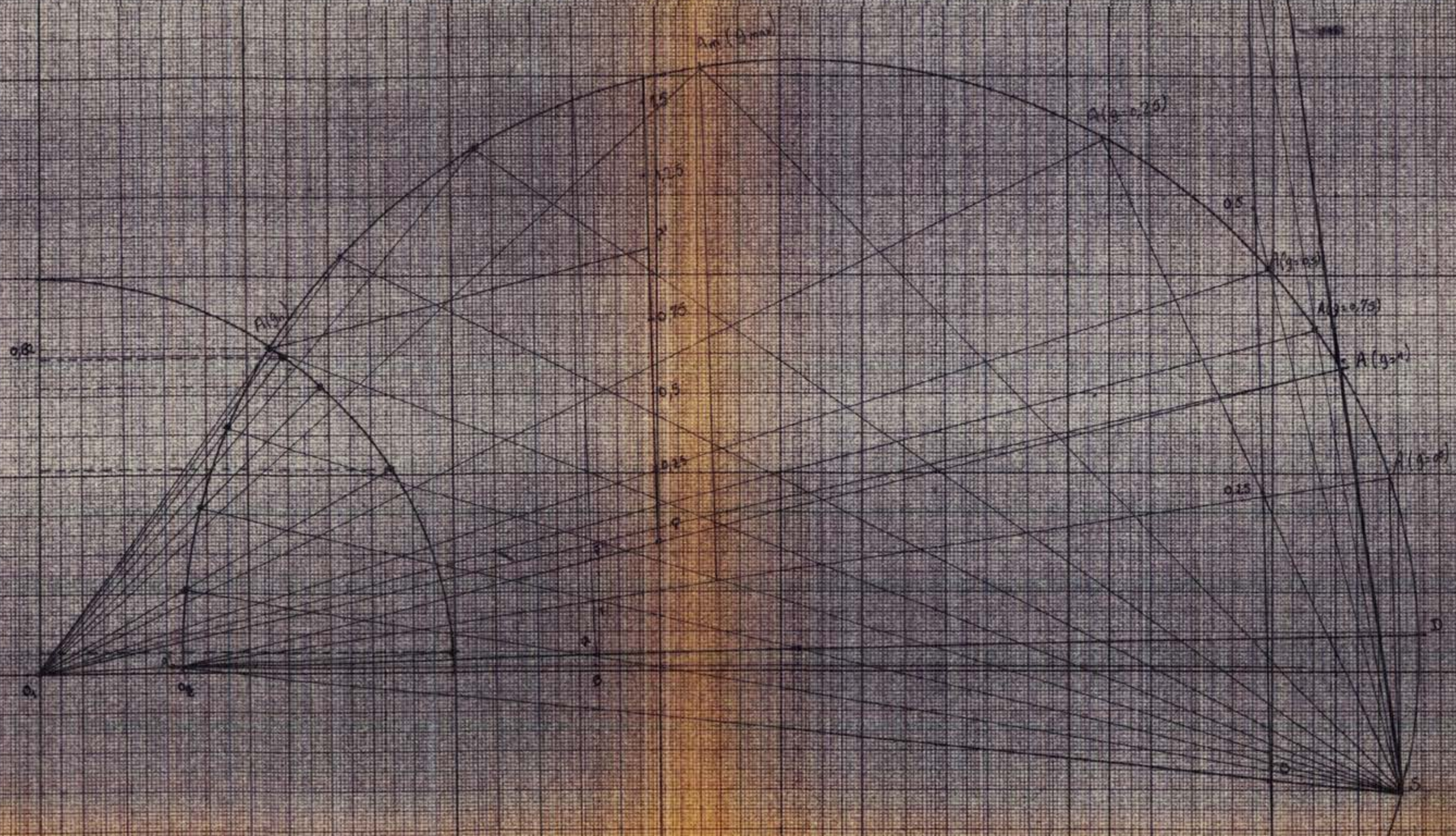


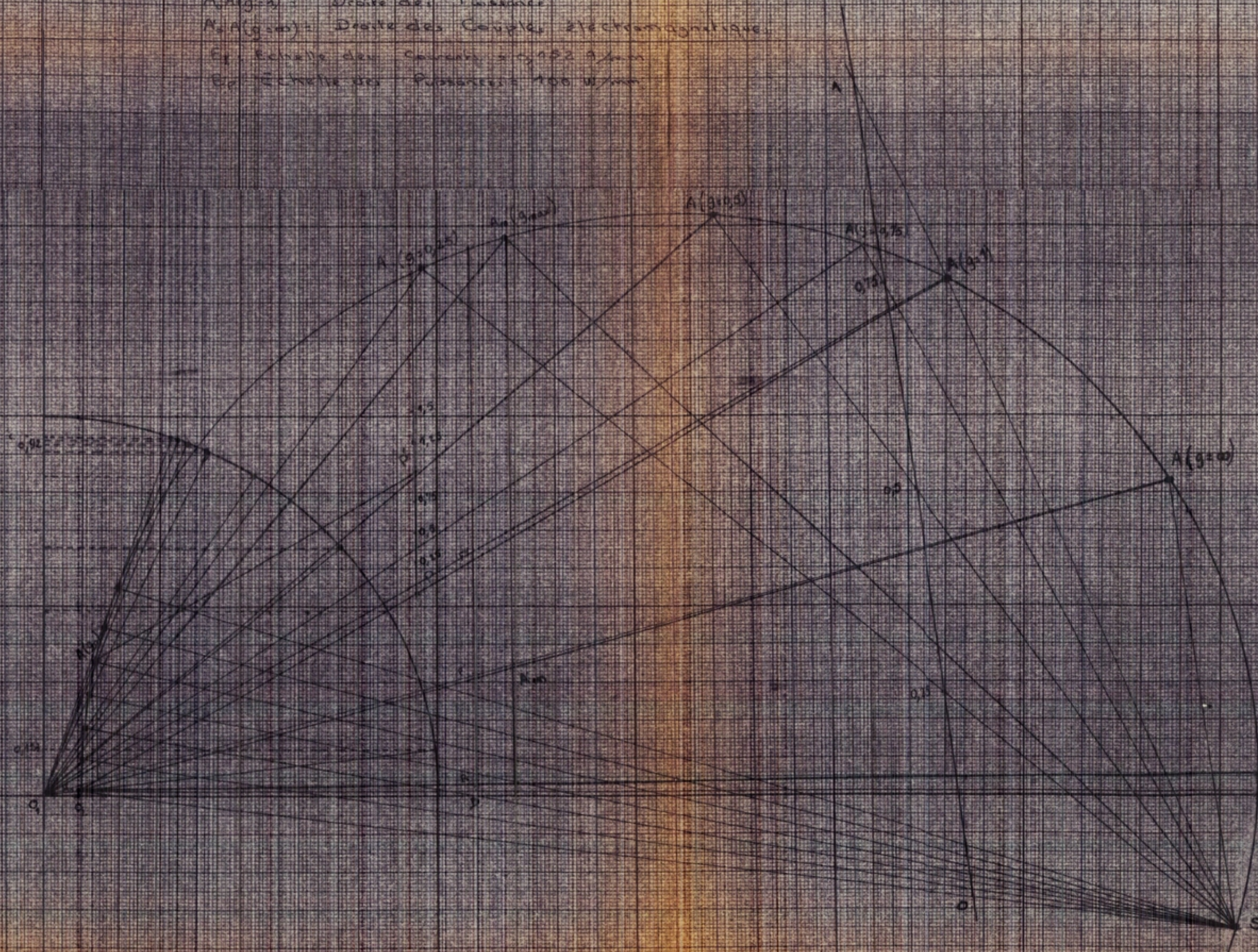
Diagramme du Cercle pour 3kw 3000tr/min

$A(A(g \rightarrow a))$: Droite des Puissances

$A_s A(g \rightarrow \infty)$: Droite des Couple électromagnétique

E_p : Echelle des Courants = 1000 A/mm

E_p : Echelle des Puissances = 100 W/mm



Courbes $\bar{I}_r \frac{E}{C_n}$ en
 fonction de α
 pour 3 km , 3000 kg/cm^2

$\bar{I}_r \frac{E}{C_n}$

40

3

30

20

10

0

1

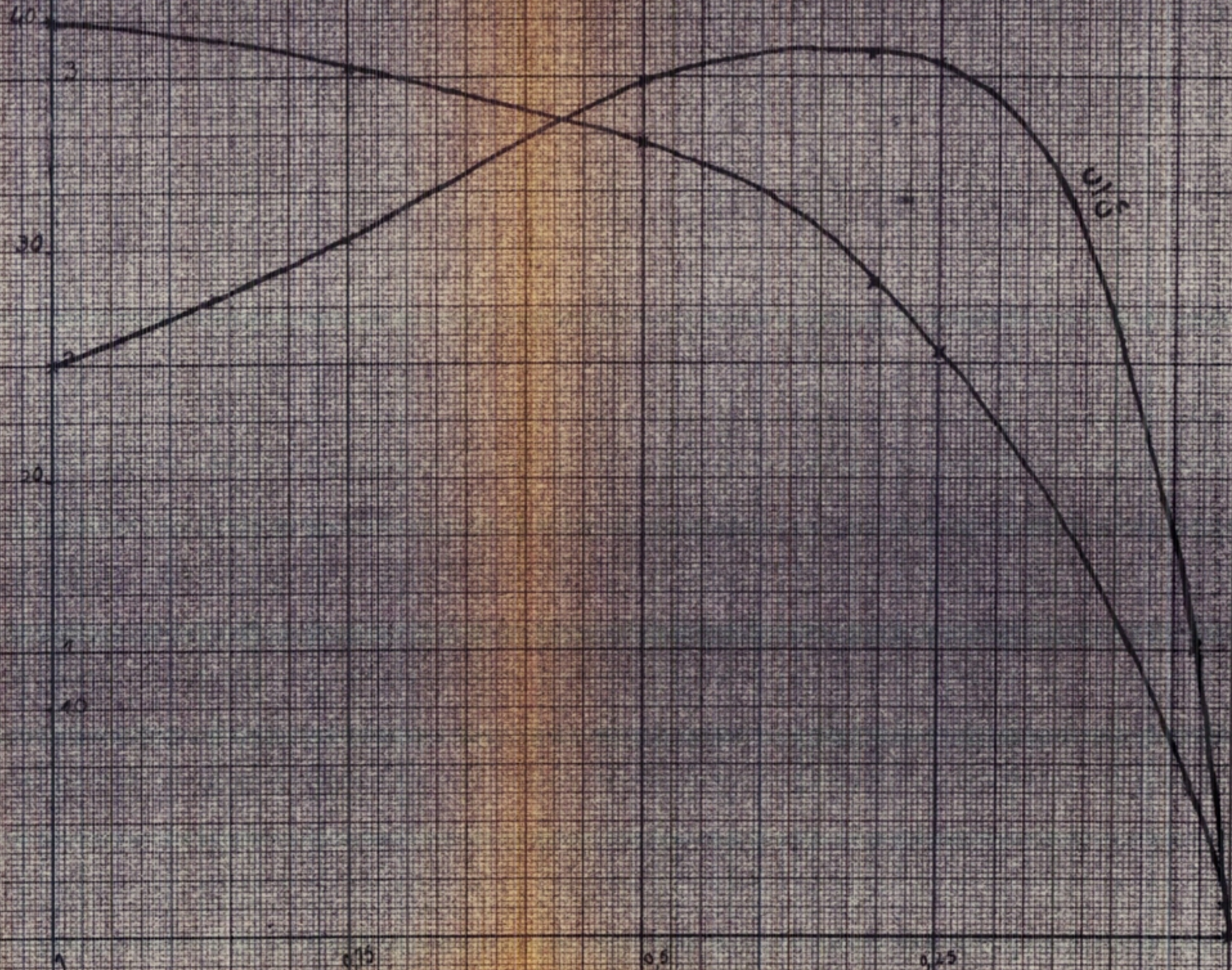
0.15

0.5

0.25

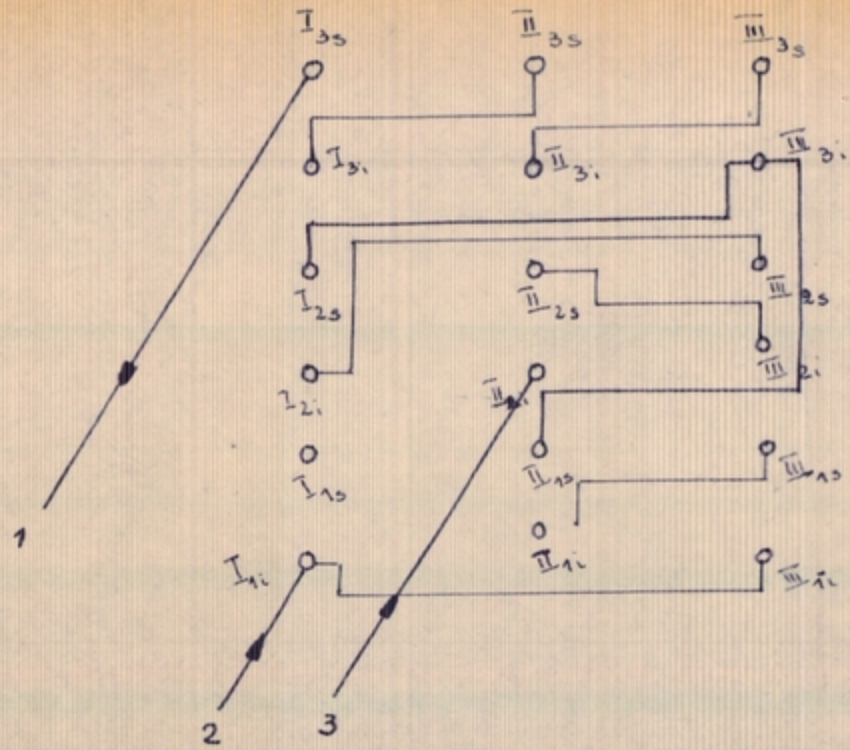
0

0



SCHEMA de CONNEXION de la BORNE

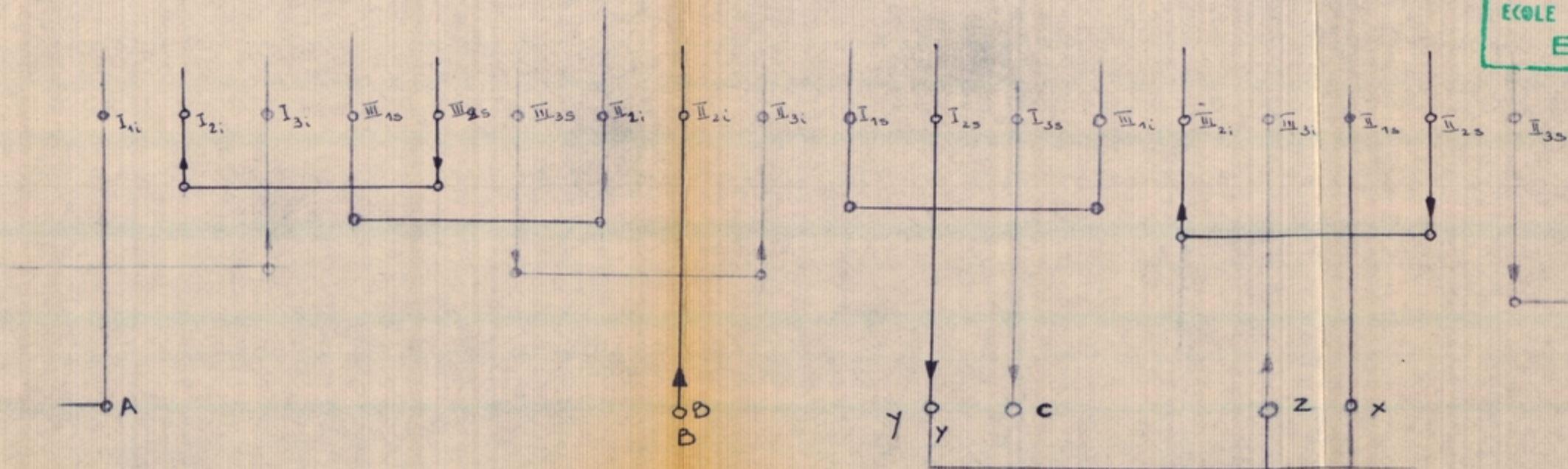
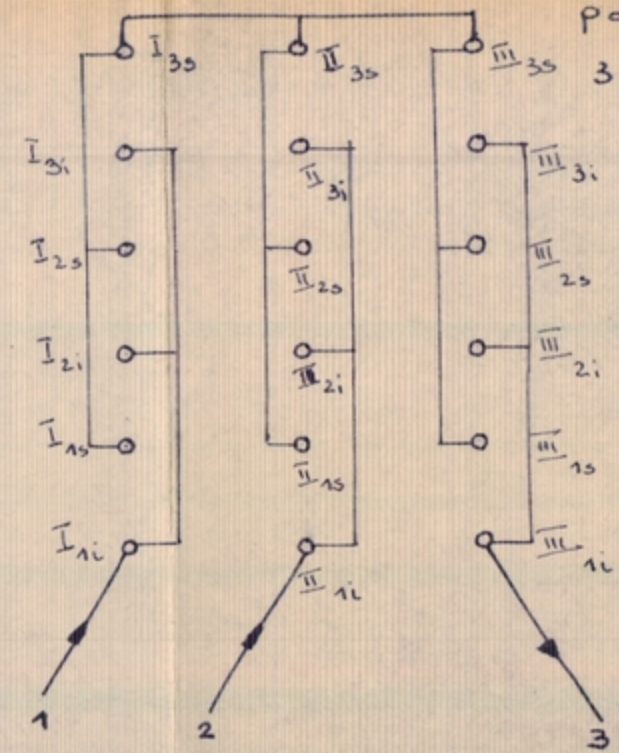
Montage (Y) étoile
pour $2p=6$
1 Kw. 1000trs/mn



SCHEMA de CONNEXION de la BORNE

Montage étoile (Y)

pour $2p=2$
3 Kw. 3000trs/mn



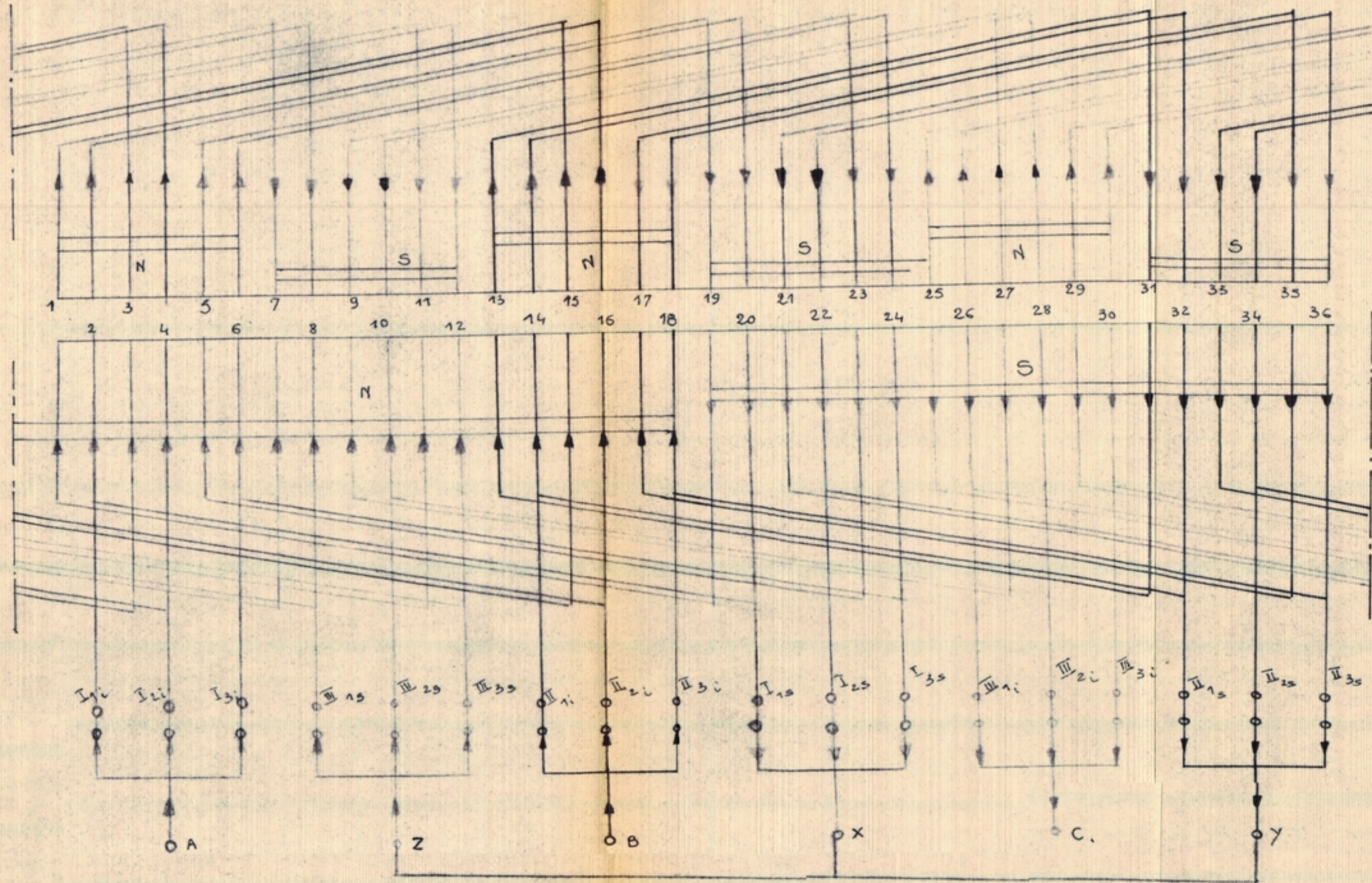
امسدة الوطنى للعلوم الهندسية
المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

Connexion pour
la vitesse de
1000trs/mn

Paramètres de
l'enroulement:
 $y=6$
 $q=2$
 $2_1=36$
 $2p=6$





Connection pour
 la vitesse de 3000tr/mn

Paramètres de
 l'enroulement:

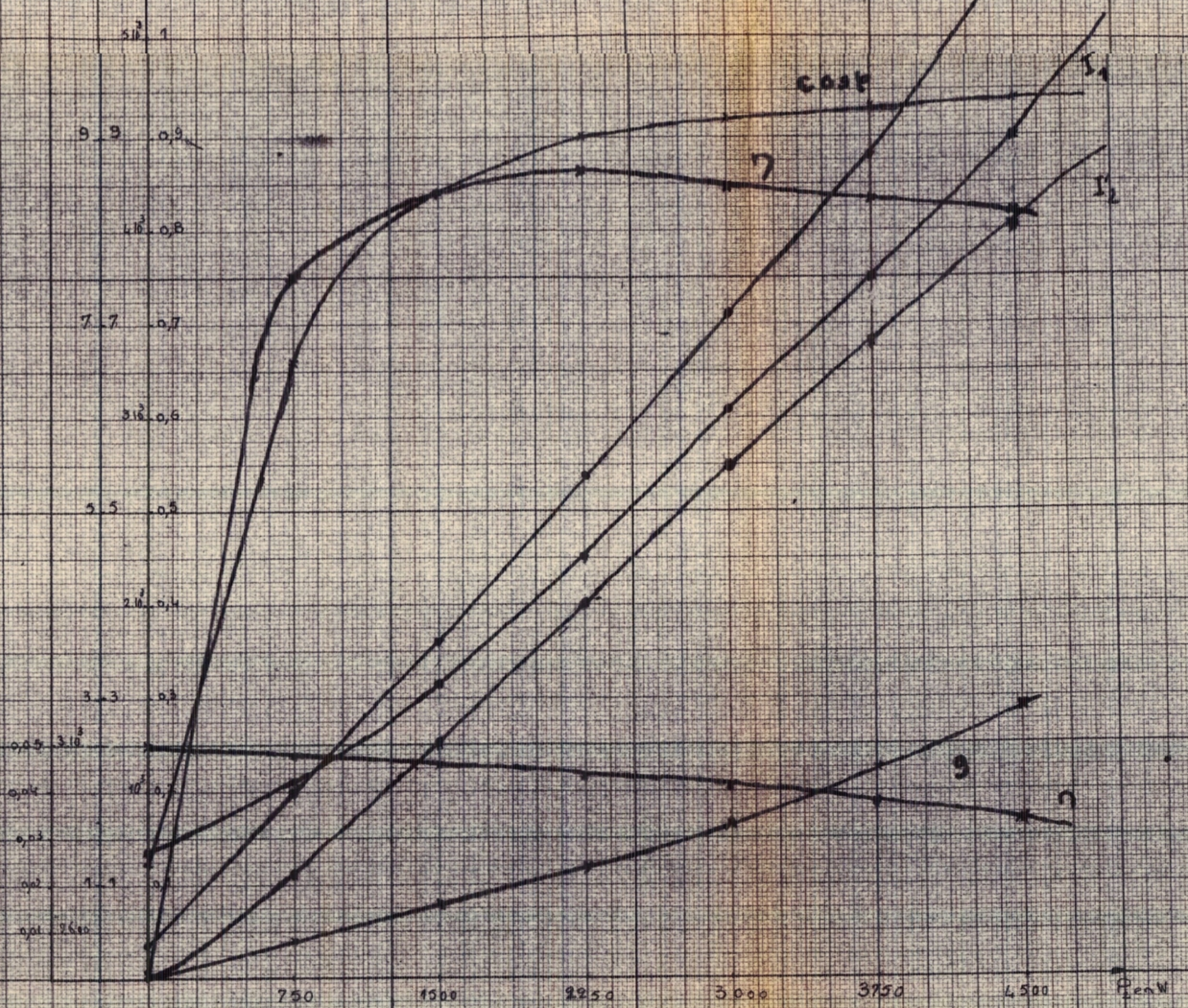
- $y = 18$
- $q = 6$
- $Z_1 = 36$
- $2p = 6$



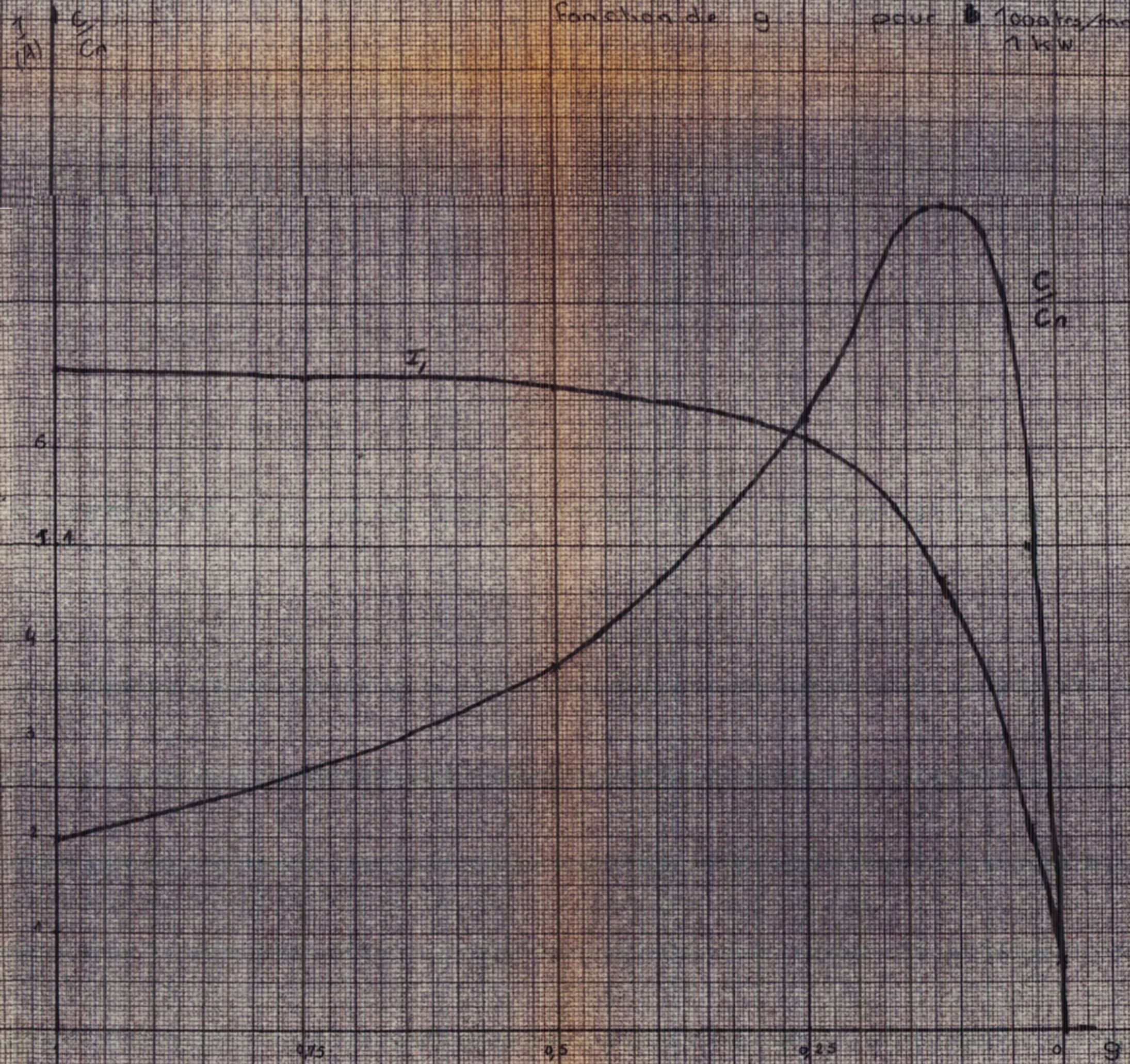
Courbes $T_1, T_2, P_1, \eta, \cos \phi, g, n$
 en fonction de P_2

Pour 3kW 3000 tr/min

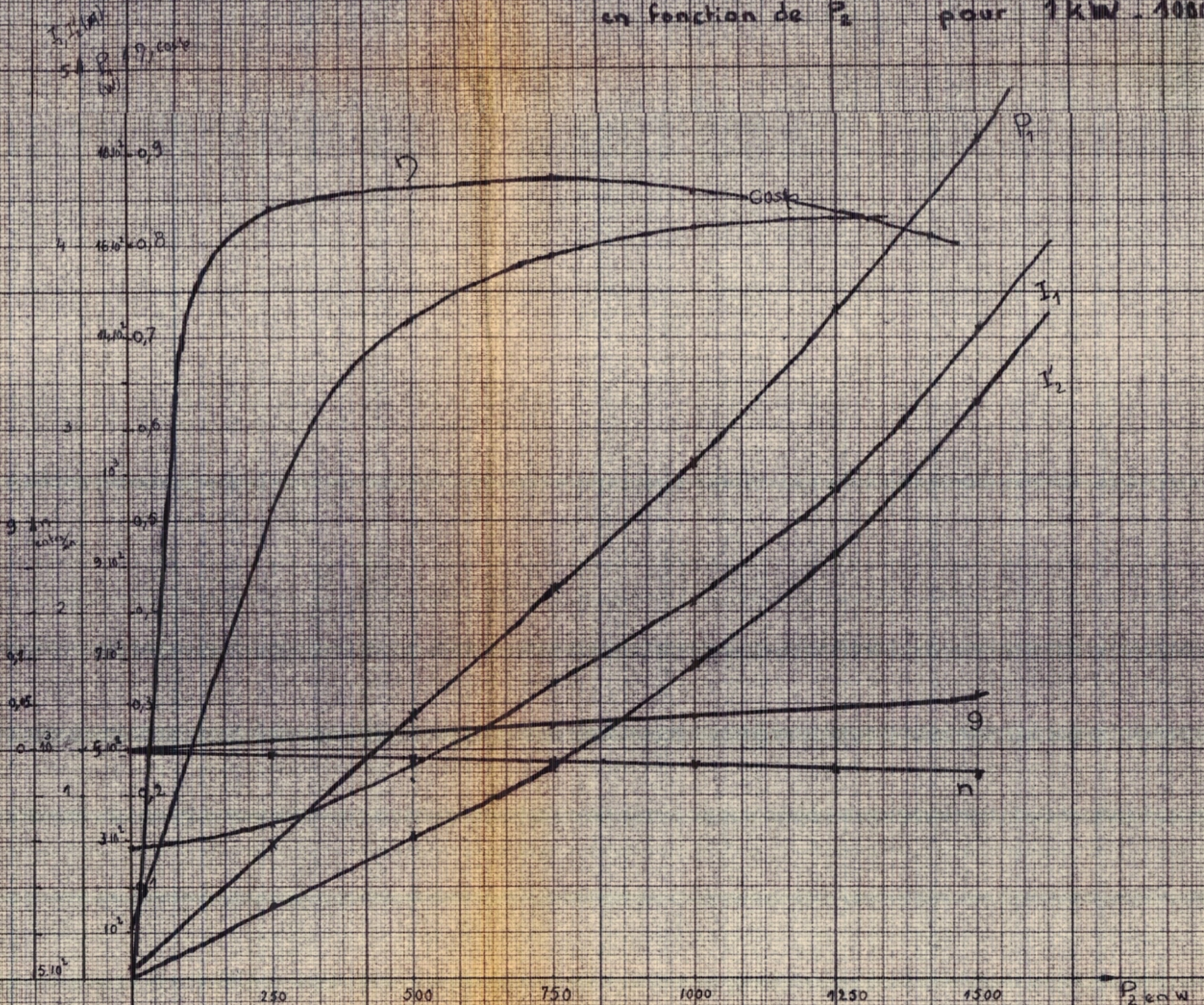
g η $\cos \phi$
 10^3 10^3 10^3



Courbes l_1 , $\frac{C_p}{C_n}$ en
 fonction de g pour \bullet 1000 kg/m³
 1 kW

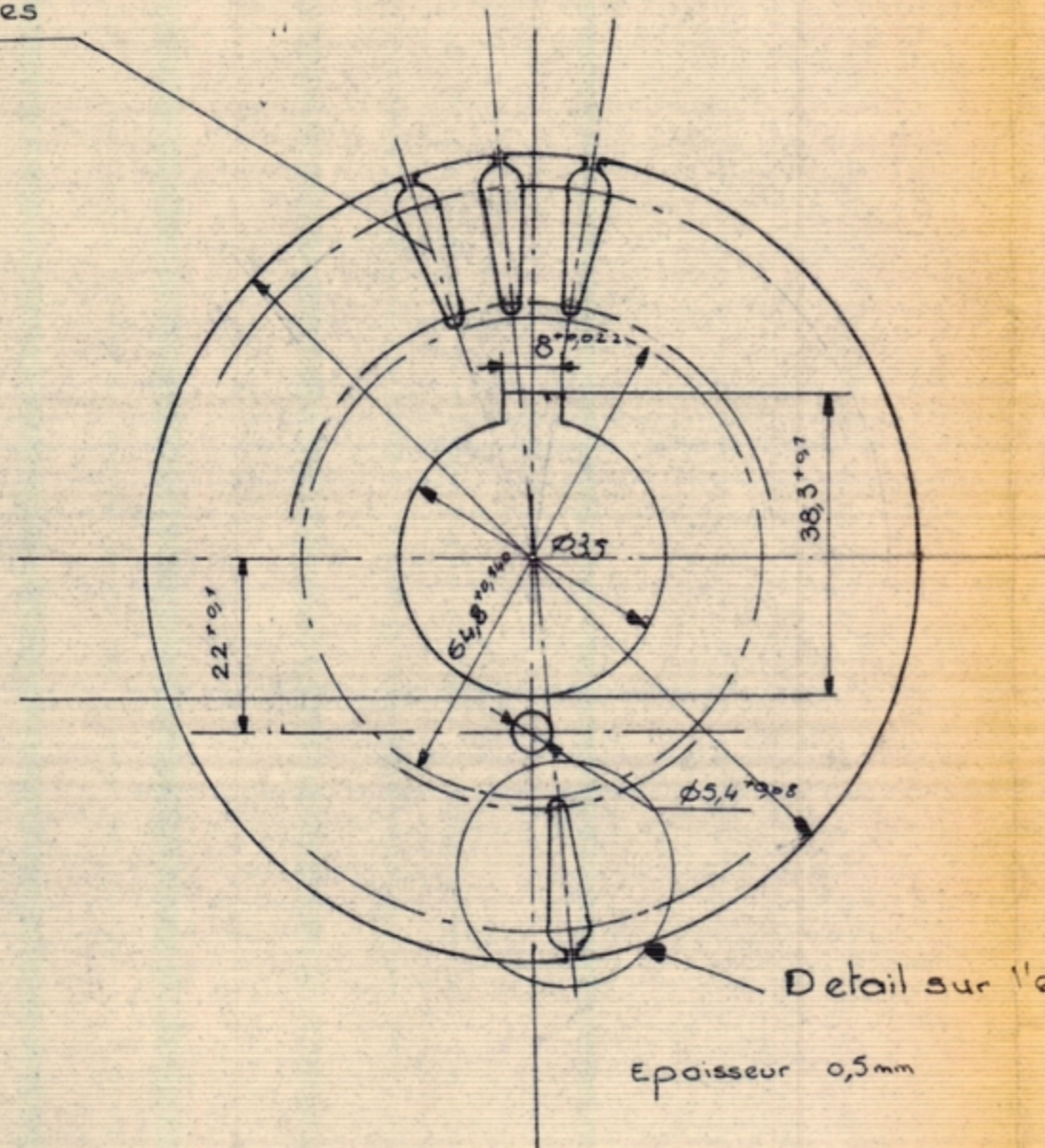


Courbes; I_1 , I_2 , P_1 , η , $\cos\phi$, g ; n
 en fonction de P_2 pour 1 kW - 3000 tr/min

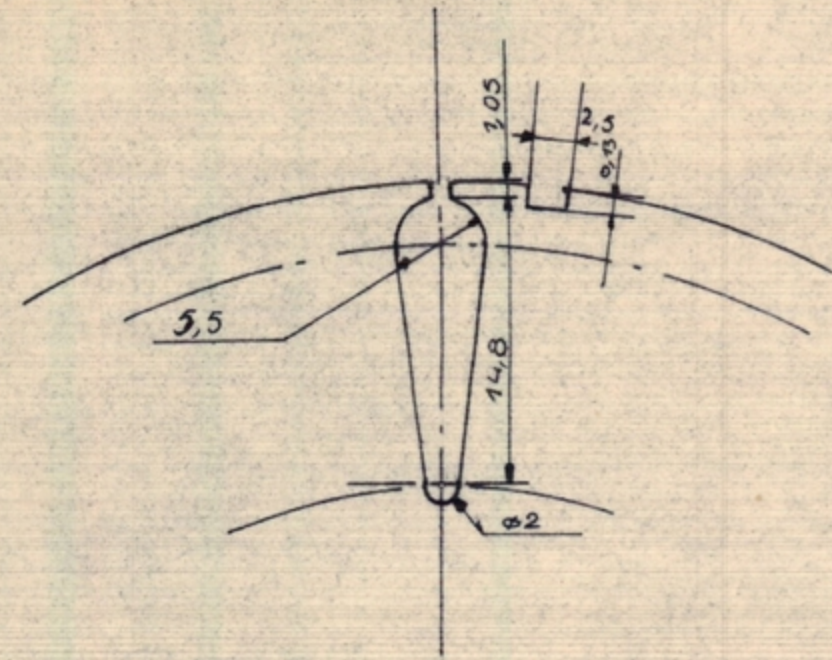


Détail sur une encoche

26 encoches



Echelle 1.



Echelle 2



Ecole Nationale Polytechnique

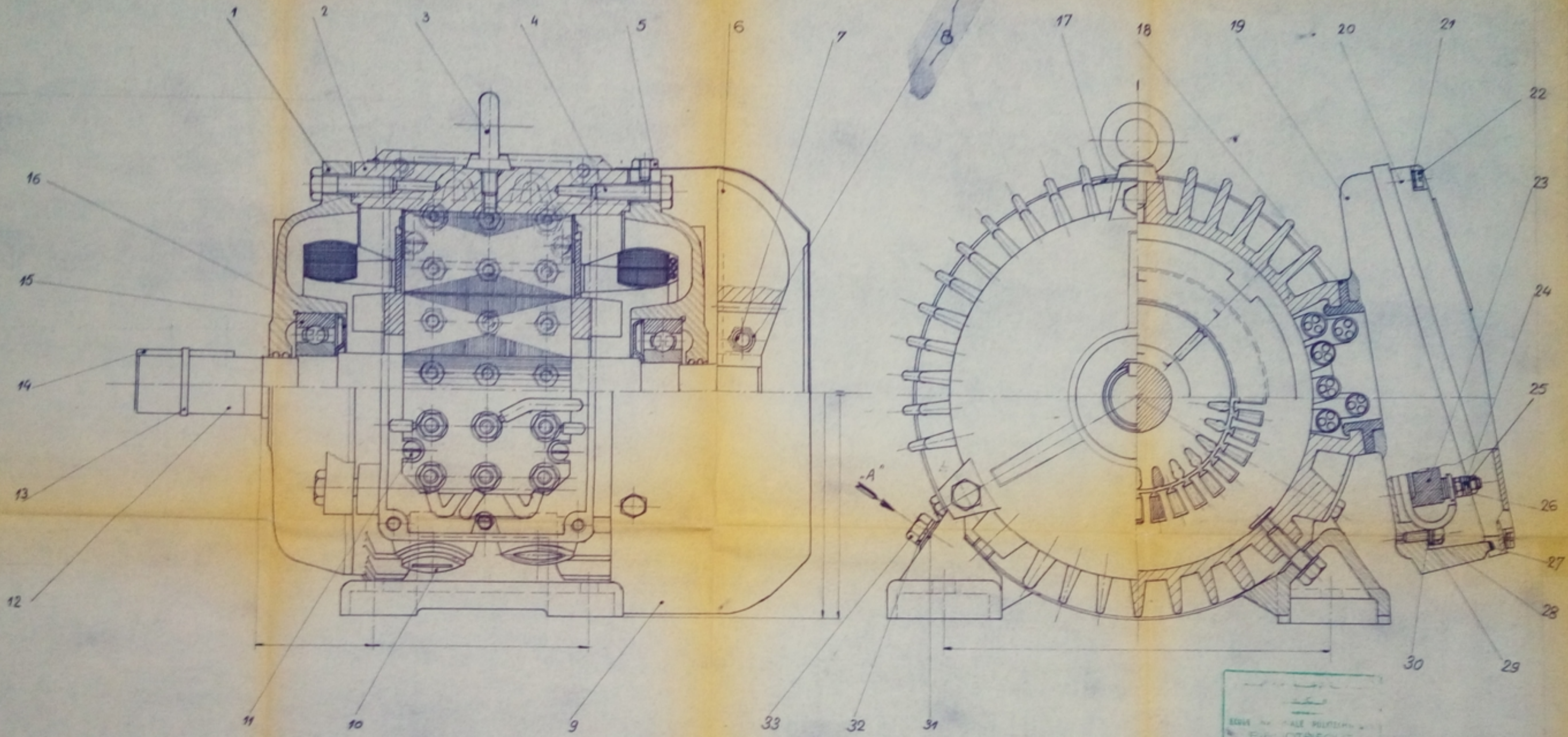
Proposé par M^r SAAL
D.Ing.

Moteur Asynchrone Triphasé

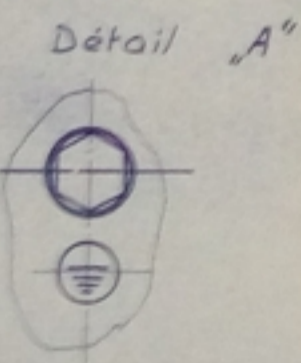
Dessiné par: ZEKKOUR

3/1 Kw 3000/1000 trs/min

Tôle du Rotor



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
EN OTREBUKÉ



16	Rondelle élastique		2	Acier		
15	Roulement		2			
14	Closette Ø8x45	E 27.651	1	Acier	Ø40x50	
13	Rondelle de butée		1	Acier	Ø30x2	
12	Axe du Rotor		1			
11	Vis C 15x40	E 27.344	4	Acier	Ø9x49	
10	Trou Filaté		1			
9	Enveloppe du Rotor		1	Alumin.		
8	Rondelle A 116	E 27.642	1	Acier	40x40	
7	Vis H 116x25	E 27.342	1	Acier	40x35	
6	Ventilateur		1	Alumin.	Tourné	
5	Vis H 115x6	E 27.342	3	Acier	9x45	
4	Vis H 118x30	E 27.342	6	Acier	14x40	
3	Anneau de Suspension		1	Acier	Forgé	
2	Ensemble Courant		1			
1	Flaque d'entraînement		2	Fente	Tourné	
Rep	Designation	N° de la Norme	Qté	Matériau	Observation	

33	Vis H 118x45	E 27.342	1	Acier	14x25	
32	Rondelle de fixation 118	E 27.642	1			
31	Centrage support 118		1			
30	Centrage support 118		2			
29	Rondelle fendue 116	E 27.642	1			
28	Vis H 116x45	E 27.342	4	Acier	40x25	
27	Garniture pour bague à bague		1	Volcanisé		
26	Rondelle fendue 114	E 27.642	18			
25	Rondelle fendue 116	E 27.642	36	Acier	7.8	
24	Centrage support 114		36			
23	Détail pour la bague à bague		1			
22	Vis E 115x25	E 27.344	4	Acier	Ø9x34	
21	Rondelle de fixation 115	E 27.642	4			
20	Couvercle pour la bague à bague		1	Fente	Tourné	
19	Bague à bague		1	Fente	Tourné	
18	Garniture sphérique pour bague à bague		1	Tourné		
17	Clou Chaîné		1	Volcanisé		
Rep	Designation	N° de la Norme	Qté	Matériau	Observation	

École Nationale Polytechnique
 Moteur Asynchrone Triphasé
 3/1 Kw - 3000/1500 Tr/min
 Ensemble Général.
 30.08.75