

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ALGER

4/79

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

100

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE



Projet de Fin d'Etudes

Construction d'un Moteur Asynchrone à Rotor Bobine



PROPOSE PAR :

Mr KRIVONITCHENKO
Professeur à l'E.N.P.A.

ETUDIE PAR :

A. BOUZID
M. GUERZIZ

PROMOTION JUIN 1979

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Construction d'un Moteur Asynchrone à Rotor Bobine



PROPOSE PAR :

Mr KRIVONITCHENKO
Professeur à l'E.N.P.A.

ETUDIE PAR :

A. BOUZID
M. GUERZIZ

PROMOTION JUIN 1979

- Dédicaces -

Je dédie ce modeste ouvrage
A mon père, ma mère
A mes frères et sœurs
Mohamed

A mes parents
Aïssa

- Remerciements -

Nous tenons à remercier tout particulièrement
M^r KRIVONITCHENKO professeur à l'E.N.P. et promoteur
de ce sujet, qui a mis à notre disposition son savoir
et son expérience pour l'accomplissement de ce modeste travail.
A tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à notre
formation, nous adressons un cordial remerciement.

TABLE des MATIERES

liste des symboles -----	6
Introduction -----	9
Cahier de charge -----	11
CHAPITRE I : Calcul électromagnétique -----	12
1.1. généralités -----	13
1.2. dimensions principales de la machine -----	13
1.3. Calcul des enroulements -----	20
1.4. Calcul du circuit magnétique -----	39
1.5. Constante de PETROV -----	46
1.6. répartition spatiale de la force magnétomotrice -----	48
CHAPITRE II : Calcul des paramètres du moteur -----	52
2.1. calcul des résistances -----	53
2.2. Calcul des réactances -----	57
CHAPITRE III: pertes et rendement -----	63
3.1. calcul des pertes -----	64
3.2. rendement de la machine -----	70
CHAPITRE IV: caractéristiques de travail -----	71
4.1. diagramme du cercle -----	72
4.2. caractéristiques de travail -----	77
CHAPITRE V : Calcul thermique -----	79
5.1. calcul de l'échauffement -----	80
5.2. calcul de la ventilation -----	84

CHAPITRE VI : Calcul mécanique	91
6.1. technologie des arbres	92
6.2. but	92
6.3. Calcul mécanique de l'arbre	93
6.4. attraction magnétique	97
6.5. Fléchissement résultant de l'arbre	99
6.6. vitesse critique de rotation	99
6.7. calcul de l'arbre à la solidité	100
CHAPITRE VII : Calcul des résistances additionnelles	104
7.1. Généralités	105
7.2. démarrage des moteurs bobinés à bague	105
7.3. Calcul des résistances additionnelles	107
7.4. Commande électrique	112
Conclusion	113
Bibliographie	114

liste des symboles

A_1 : densité linéaire du courant du stator

A_2 : densité linéaire du courant du rotor

b_{z1} : largeur de la dent du stator

b_{z2} : largeur de la dent du rotor

br_{ot} : ouverture de l'encoche du rotor

ben_{c1} : ouverture de l'encoche du stator

B_{j1} : induction magnétique dans le joug du stator

B_{j2} : induction magnétique dans le joug du rotor

B_{z1} : induction magnétique dans les dents du stator

B_{z2} : induction magnétique dans les dents du rotor

B_{δ} : induction magnétique dans l'entrefer

d_{axe} : diamètre de l'arbre

D_i : diamètre interne du stator

D_{ext1} : diamètre extérieur du stator

D_{ext2} : diamètre extérieur du rotor

f : fréquence des courants

F_{ac1} : f.m.m. dans le joug du stator

F_{ac2} : f.m.m. dans le joug du rotor

F_{cir} : f.m.m. du circuit magnétique

F_{z1} : f.m.m. dans les dents du stator

F_{z2} : f.m.m. dans les dents du rotor

F_{δ} : f.m.m. dans l'entrefer

h_{j1} : hauteur du joug du stator

h_{j2} : hauteur du joug du rotor

g_n : glissement nominal

C_A : constante d'ARNOLD

K_A : coefficient d'Esson

I_{AN} : courant nominal par phase du stator

I_2 : courant rotorique

j_1 : densité de courant

K_S : coefficient de CARTER

K_r : coefficient de remplissage

K_{rac} : coefficient de raccourcissement du pas d'enroulement

K_z : coefficient de saturation des dents

l_f : longueur de la partie frontale des bobines

m : nombre de phases

N_e : nombre de conducteurs élémentaires

N_A : nombre de tours de la phase

P : nombre de paires de pôles

P_2 : puissance utile du moteur

P_1 : puissance absorbée

P_{c1} : pertes cuivre du stator

P_{c2} : pertes cuivre du rotor

P_s : pertes superficielles

P_{puls} : pertes pulsatoires

q : nombre d'encoches par pôle et par phase

P_0 : pertes à vide

E_2 : f.e.m du rotor

X : réactances

- r : résistances
- Q_v : débit d'air de ventilation
- D_{v1} : diamètre intérieur du ventilateur
- D_{v2} : diamètre extérieur du ventilateur
- u : vitesses linéaires
- a_1 : nombre de voies d'enroulement au stator
- a_2 : nombre de voies d'enroulement au rotor
- G_{j1} : masse de la culasse du stator
- G_{j2} : masse de la culasse du rotor
- G_{z1} : masse des dents du stator
- G_{z2} : masse des dents du rotor
- Z : nombres d'encoches
- q'_1 : section des conducteurs au stator
- q'_2 : section des barres au rotor
- δ : entrefer
- λ : facteur géométrique ; conductivité thermique
- λ_e : coefficient de dispersion d'encoches
- λ_f : coefficient de dispersion frontale
- λ_{diff} : coefficient de dispersion différentielle
- τ : pas polaire
- θ : température
- η : rendement
- γ : masse volumique
- U_1 : tension par phase du stator
- Z : résistances aérodynamiques

Introduction

Problèmes particuliers à la construction des machines électriques :

En plus des problèmes de l'économie et de la rentabilité, toute machine électrique doit remplir trois conditions principales pour que son fonctionnement général soit satisfaisant.

- Résistance aux contraintes thermiques :

Pour différentes raisons (pertes par effet joule, par contact et joint, par hystérésis, par courant de FOUCAULT...) les machines électriques s'échauffent. Il en résulte un certain nombre d'inconvénients du point de vue du fonctionnement et de la durée de vie de la machine.

- Résistance aux contraintes diélectriques :

Sous l'action des champs électriques souvent importants qui règnent dans les machines, les isolants subissent un échauffement, une diminution de leurs qualités diélectriques, un vieillissement prématuré qui se termine par une détérioration définitive, quelque fois par un claquage et un court-circuit.

- Résistance aux efforts électrodynamiques :

Les efforts résultants du passage du courant normal sont généralement sans effet nuisibles, il n'en est pas de même dans le cas des surintensités résultantes soit d'une charge, soit surtout d'un court-circuit, dans ce cas, les forces électrodynamiques proportionnelles au carré de l'intensité peuvent être très importantes.

L'objet de notre étude est la construction d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné à bagues de moyenne puissance qui est utilisé fréquemment pour divers usages (entraînement de pompes,

de machines-outils, de compresseurs, de concasseurs et broyeurs....)

Le plan de notre étude s'établit comme suit :

CHAPITRE I: dimensionnement et calcul électromagnétique de la machine

CHAPITRE II: Calcul des paramètres du moteur

CHAPITRE III: détermination des pertes et rendement

CHAPITRE IV: Etude des caractéristiques de travail

CHAPITRE V: Calcul thermique

CHAPITRE VI: Calcul mécanique

CHAPITRE VII: Calcul des résistances additionnelles

Cahier de Charge

Sujet : Construction d'un moteur asynchrone à rotor bobiné

Puissance nominale : $P_N = 250 \text{ kW}$

Tensions nominales : $U_N = 380/660 \text{ V}$

Vitesse de synchronisme : $n = 1000 \text{ tr/mn}$

Nombre de phases : $m = 3$

Fréquence nominale : $f = 50 \text{ Hz}$

Facteur de puissance nominale : $\cos \varphi_N = 0,89$

Rendement nominal : $\eta_N = 92,5\%$

Classe d'isolation : B_1

Version : Protégée.

CHAPITRE I

Dimensionnement et Calcul electromagnetique

1.1 Généralités:

Les moteurs asynchrones polyphasés se distinguent par la construction du rotor qui détermine la forme de la courbe du couple moteur en fonction de la vitesse; On a deux grandes classes:

- Moteur à rotor bobiné dont on peut faire varier la résistance du circuit rotorique grâce aux résistances additionnelles.

- Moteur à rotor à cage en court-circuit.

Notre travail consiste en l'étude de moteurs à rotor bobiné qui se classent en deux grandes catégories:

- moteurs à bagues

- moteurs à démarreur centrifuge.

Notre choix est fixé sur l'étude d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné, à bagues; Le rotor possède généralement trois bagues montées sur l'arbre auxquelles sont connectées les trois extrémités de l'enroulement. Des balais assurent la liaison entre les bagues et le rhéostat de démarrage placé à l'extérieur du moteur. Ce rhéostat est mis en court-circuit dès que le moteur a atteint sa vitesse. Les balais peuvent être à contact permanent ou relevables (avec court-circuitage des bagues).

1.2 Dimensions principales de la machine:

Ces dimensions seront déterminées à partir du cahier de charge et en se basant sur l'expérience de construction des machines électriques.

- Nombre de paires de pôles du stator: p

Il est donné à partir de la formule de la vitesse de synchronisme:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \implies p = \frac{60 \cdot f_1}{n_s} = \frac{60 \cdot 50}{1000}$$

$$p = 3$$

12.2 Courant nominal de la phase du stator :

Il est donné par la relation :

$$I_{Mn} = \frac{P_M}{\eta_M \cdot U_M \cdot \eta_M \cdot \cos \phi_M}$$

$$I_{Mn} = \frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,925 \cdot 0,89} = 266,38 \text{ A}$$

On prend : $I_{Mn} = 267 \text{ A}$

12.3 Puissance conventionnelle (apparente) :

C'est la puissance utilisée pour le calcul

$$P'_M = K_E \cdot \frac{P_M}{\eta_M \cdot \cos \phi_M}$$

où : K_E est un coefficient qui tient compte de la chute de tension dans l'enroulement du stator, il est donné par la courbe (1)

pour $p=3$, $K_E = 0,967$

donc :
$$P'_M = 0,967 \cdot \frac{250}{0,89 \cdot 0,925}$$

$$P'_M = 293,6 \text{ KVA}$$

12.4 Diamètre interne du stator :

Il dépend de la puissance apparente, il se détermine selon la courbe (2), donnée par expérience :

pour $P'_M = 293,6 \text{ KVA}$, $D_1 = 47 \text{ cm}$.

12.5 Diamètre externe du stator :

On peut préalablement l'estimer suivant les valeurs données par l'expérience de la construction des machines et qui sont contenues dans la tab-

2p	2	4	6	8 ÷ 10
D _{ext}	(1,85 ÷ 1,95) D _i	(1,56 ÷ 1,68) D _i	(1,41 ÷ 1,44) D _i	(1,34 ÷ 1,39) D _i

dans notre cas : 2p = 6 , D_{ext} = (1,41 ÷ 1,44) D_i

On prend D_{ext} = 1,44 D_i

$$D_{ext} = 66 \text{ cm}$$

La construction des machines électriques se fait selon des valeurs normalisées du diamètre externe. Ces valeurs sont mentionnées dans le tableau suivant :

Encombrement	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D _{ext} [mm]	93	153	180	208	248	291	343	393	458	590	740	850

On prend le diamètre normalisé : D_{ext} = 740 mm

donc on a un encombrement égal à 11

12.6 Choix de l'induction d'entrefer B_s et de la charge linéaire A_l :

Ce choix se fait suivant la valeur du pes poleaire τ qui est donnée par

la relation :

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_i}{2p} = \frac{\pi \cdot 47}{6}$$

$$\tau = 24,6 \text{ cm}$$

D'après la courbe (3) on a : B_s = 7812 Gauss

$$A_l = 437 \text{ A/cm}$$

12.7 Longueur de la machine :

Pour la détermination de cette grandeur, on doit d'abord trouver

la valeur de la constante d'ARNOLD :

$$C_A = \frac{D^2 \cdot I_s \cdot n_s}{P_m} = \frac{5,1 \cdot 10^{11}}{\alpha_g \cdot K_p \cdot A_s \cdot B_g \cdot K_{d1}}$$

ou :

A_s : charge linéaire de courant du stator, caractérise la sollicitation électrique des matériaux actifs de la machine

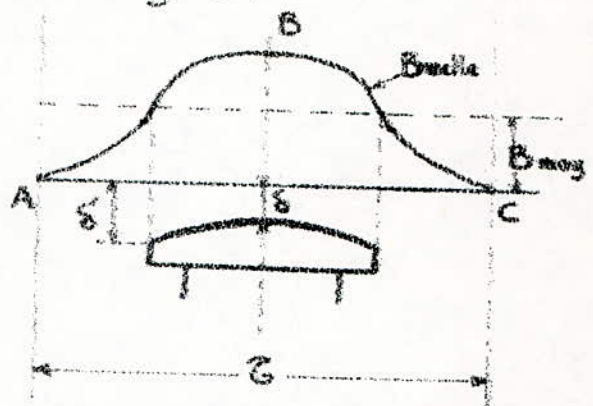
B_g : induction magnétique dans l'entrefer qui caractérise les sollicitations magnétiques.

K_p : facteur de forme du champ magnétique dans l'entrefer, il est défini comme étant le rapport de la valeur efficace de l'induction dans l'entrefer à sa valeur moyenne :

$$K_p = \frac{B_{eff}}{B_{moy}}$$

Il est fonction du facteur de saturation K_z

A partir de la courbe (4), on obtient pour $K_z = 1,3$, $K_p = 1,09$



répartition de l'induction dans l'entrefer au-dessus d'un pas polaire.

α_g : facteur de couverture idéale du pôle, il est fonction du facteur de saturation K_z ; la courbe (4) nous donne :

$$\alpha_g = 0,715$$

K_b : facteur de bobinage qui tient compte de la répartition du bobinage et des raccourcissements éventuels de pas d'enroulement

Il se calcule d'après la formule :

$$K_b = K_{d1} \cdot K_{d2}$$

avec : K_{d1} : coefficient de distribution

$$K_{d1} = \frac{\sin(q \cdot \frac{\pi}{2})}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2}}$$

K_{ry} : coefficient de raccourcissement

$$K_{ry} = \sin\left(v \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{y}{\tau}\right)$$

avec : y : pas d'enroulement raccourci

τ : pas polaire

q : nombre d'encoches par pôle et par phase

v : rang de l'harmonique considéré ; Dans l'entrefer, la forme de champ magnétique n'est pas tout à fait sinusoïdale, la décomposition en série de Fourier nous donne un harmonique fondamental ($v=1$) et des harmoniques de rang supérieur ($v>1$) qui entraînent des pertes supplémentaires - pour l'enroulement triphasé, la f.e.m des harmoniques de rang 3 et ses multiples coïncident en phase, donc les harmoniques multiples de 3 n'existent pas dans la f.e.m composée.

- pour diminuer les harmoniques de rang 5^e et 7^e, on utilise le raccourcissement du pas d'enroulement égal à $(0,18 \div 0,16)$ et $\beta = (0,82 \div 0,84)$

$$\alpha = \frac{2\pi p}{Z_1} : \text{angle électrique entre deux encoches successives}$$

Z_1 : nombre total d'encoches du stator

la valeur de K_{Bp} est choisie préalablement :

$$K_{Bp} = 0,926$$

la constante d'ARNOLD aura pour valeur :

$$C_A = \frac{5,1 \cdot 10^{10}}{0,715 \cdot 103 \cdot 0,926 \cdot 437 \cdot 7812}$$

$$C_A = 247.596,437 \quad \frac{\text{cm}^3}{\text{Kw} \cdot \text{mm}}$$

le facteur de distribution ou d'ESSON est :

$$K_A = \frac{1}{C_A} = 242,32 \quad \text{KJ/m}^3$$

l'analyse de la constante d'ARNOLD et du facteur d'ESSON nous renseigne sur l'utilisation des matériaux actifs de la machine, on peut écrire :

$$C_A = \frac{D_s^2 \cdot l_s}{P_N \cdot \frac{1}{n}} = \frac{60}{2\pi} \frac{D_s^2 \cdot l_s}{P_N}$$

$$\text{où : } P_N = \frac{P_{16}}{\Omega_0} = \frac{60}{2\pi} \frac{P_{16}}{n}$$

A partir de ces relations, on peut dire que la constante d'ARNOLD estime les dépenses de volume d'acier ($D_s^2 \cdot l_s$) par unité de couple, ainsi que le volume de la machine par unité de puissance $\left(\frac{D_s^2 \cdot l_s}{P_{16}}\right)$

donc, la longueur de la machine sera :

$$l_s = \frac{6,1 \cdot 10^{16} \cdot P_N}{\alpha_s \cdot k_A \cdot k_p \cdot A_r \cdot B_d \cdot D_s^2 \cdot n} = \frac{6,1 \cdot 10^{16} \cdot 293,6}{0,715 \cdot 0,926 \cdot 1,09 \cdot 437 \cdot 7812 \cdot 10^3 \cdot 47^2}$$

$$l_s = 33 \text{ cm}$$

4.2.8 Longueur réelle du stator :

la longueur réelle du stator est différente de la longueur de l'entrefer ; ceci est dû à la présence de canaux de ventilation.

Pour les machines protégées de moyenne et grande puissance, le système de refroidissement doit être radial : la position des canaux de refroidissement est radiale par rapport à l'axe de la machine.

la largeur de ces canaux étant de 10 mm et les paquets de tôles ont une épaisseur de 4 à 5 cm, on choisit la largeur du paquet de tôles égale à 6 cm et on obtient 5 canaux de refroidissement

$$\text{d'où : } l_1 = l_s + n \cdot b$$

$$l_1 = 33 + 5 \cdot 1 = 38 \text{ cm}$$

avec: n_r : nombre de canaux de refroidissement

b_r : largeur d'un canal

1.2.9 Facteur géométrique de la machine:

Il décrit d'une manière générale la géométrie de la machine.

Les valeurs de λ recommandées doivent être dans le domaine hachuré de la courbe (5): $\lambda = f(p)$

- si λ est petit, le refroidissement est meilleur et le montage des enroulements est plus facile

- si λ est grand, la machine aura un grand diamètre par rapport à la longueur et cela conduit à une consommation très grande de cuivre

le meilleur choix de λ doit être basé sur les critères économiques

Ce facteur est défini par le rapport de la longueur de l'entrefer au pas polaire:

$$\lambda = \frac{l_g}{\delta} = \frac{33}{24,6} \quad \lambda = 1,34$$

la courbe (5) nous montre que pour $p=3$, la valeur de λ est comprise dans l'intervalle hachuré.

1.2.10. Valeur de l'entrefer:

Il existe plusieurs formules pour la détermination de l'entrefer des machines électriques. Du point de vue électrique, il y a intérêt à réduire l'entrefer autant que possible, seules des considérations d'ordre mécanique limitent la valeur minimum admissible.

On a les résultats expérimentaux suivants pour la valeur de δ :

- pour les petites puissances: $\delta = (0,25 \div 0,3) \text{ mm}$

- pour les moyennes puissances: $\delta = (0,6 \div 1) \text{ mm}$

- pour les grandes puissances: $\delta = (2 \div 3) \text{ mm}$

pour la détermination de δ , on utilise la formule suivante:

$$\delta = 3 \left(4 + 0,7 \sqrt{2 \cdot \frac{L_0}{\tau}} \right) \cdot 10^{-3} \quad [\text{cm}]$$

cette relation est applicable pour les machines de moyenne puissance, elle ne dépend que des dimensions géométriques de la machine

$$\delta = 3 \cdot \left(4 + 0,7 \sqrt{4 \cdot 7,33} \right) \cdot 10^{-3} = 0,95 \text{ mm}$$

On prend: $\delta = 1 \text{ mm}$

la valeur de δ est donnée par la courbe (6): $\delta = f(D_1)$

4.3 Calcul des enroulements

A. STATOR:

Le stator des machines de petites et moyennes puissances est exécuté avec des encoches semi-ouvertes dans le cas de la basse tension. Le type d'enroulement préféré est celui à deux couches, car comparé à l'enroulement à une couche, il présente l'avantage de pouvoir être exécuté comme un enroulement à pas partiel (raccourci). De ce fait, les facteurs d'enroulements des harmoniques de rang supérieur sont fortement diminués. Un autre avantage de cet enroulement est la faible hauteur radiale de la tête d'enroulement qui limite les pertes additionnelles dans l'espace frontal.

1.3.1 Les enroulements sont caractérisés par:

- le nombre de phases
- le mode de l'emplacement des enroulements dans les encoches selon les couches (1 ou 2 couches)
- l'indépendance du pas d'enroulement (enroulement à pas total ou raccourci)

- le nombre d'encoches par pôle et par phase " q_p " peut être entier ou fractionnaire
- le mode de réalisation des bobines : enroulements en barres ou en fils

Les enroulements doivent vérifier :

- la symétrie et l'équilibre (tensions simples égales et déphasés dans le temps de $2\pi/3$)
- les résistances et les inductances de toutes les phases doivent être égales.
- l'allure des courbes des f.e.m composées doit être sinusoïdale

Dans notre étude, on opte pour des enroulements imbriqués, à deux couches, à pas racourci et à " q_p " entier, exécutés dans des encoches semi-couvertes, car ils présentent les avantages suivants :

- Simplicité d'exécution (sur gabarit)
- Amélioration de la f.e.m et du champ magnétique
- Élimination de l'irrégularité de la marche de la machine (" q_p " entier)

le calcul des enroulements est basé sur la connaissance des paramètres suivants :

- le nombre de paires de pôles : $p = 3$ (1.2.1)
- le nombre de branches parallèles : " a_p "

pour l'enroulement à deux couches, $a_p = 1 \div 2p$

On choisit : $a_p = 3$

- le nombre d'encoches par pôle et par phase : " q_p "

le choix de q_p est assez important du fait que le facteur

de bobinage et le nombre d'encoches du stator en dépendent. Il est donné en fonction du pas polaire τ par le tableau suivant :

τ [cm]	10	15	20	30
q_1	(1); 2; (3)	3; (4)	(3); 4; (5)	4; 5; (6)

les chiffres entre parenthèses sont rarement utilisés.

q_1 doit être supérieur à 2 afin que la dispersion provenant des champs d'harmoniques supérieures reste faible.

On prend $q_1 = 4$

- le pas d'enroulement : y_1

il caractérise la distance entre deux cotés actifs, il est choisi de façon à éliminer le 5^e et le 7^e harmonique

$$\text{donc, } \frac{4}{5} < \beta < \frac{6}{7} \quad \text{avec } \beta = 1 - \frac{1}{v}$$

$$\text{on choisit } \beta = \frac{5}{6} = 0,833$$

$$\text{d'où : } y = \beta \cdot \tau = \frac{5}{6} \cdot 24,6 = 20,5 \text{ cm}$$

En encoches, on aura :

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} \text{ encoches}$$

- le nombre d'encoches du stator : Z_1

$$Z_1 = 2p \cdot m_1 \cdot q_1$$

$$= 6 \cdot 3 \cdot 4$$

$$Z_1 = 72 \text{ encoches}$$

$$\text{donc : } \tau = \frac{72}{6} = 12 \text{ enc.}$$

$$\text{et } y_1 = \frac{5}{6} \cdot 12 = 10 \text{ encoches}$$

- Le nombre de conducteurs effectifs :

Pour l'enroulement à 2 couches, c'est un nombre pair, il doit être entier.

Dans le cas où il ne l'est pas, on doit arrondir sa valeur sans perdre de vue que les réactances X_1 et X'_2 sont fonctions de son carré.

la relation donnant ce nombre est :

$$N_e = \frac{A_1 \cdot t_1 \cdot a_1}{I_{IN}}$$

où t_1 : c'est le pas polaire, il est donné par :

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 47}{72} = 2,05 \text{ cm}$$

d'où :

$$N_e = \frac{437 \cdot 2,05 \cdot 3}{267} = 10,06$$

$$N_e = 10$$

Cette valeur nous permet de faire un calcul exact de la charge linéaire du courant du stator initialement donné par la courbe (3)

$$A_1 = \frac{I_{IN} \cdot N_e}{t_1 \cdot a_1} = \frac{267 \cdot 10}{2,05 \cdot 3} = 434,14 \text{ A/cm.}$$

le domaine de tolérance étant que la valeur nouvellement calculée ne doit pas différer de plus de 5 à 10% de la valeur prise initialement.

Dans notre cas, la valeur calculée diffère de 2,86% de la valeur prise.

- Le nombre de spires par phase :

Il est donné par la relation :

$$N_1 = p \cdot q_1 \cdot \frac{N_e}{a_1} = 3 \cdot 4 \cdot \frac{10}{3}$$

$$N_1 = 40 \text{ tours/phase}$$

- La section d'un conducteur effectif :

Le choix entre fils ronds ou rectangulaires est d'ordre économique et tient compte du coût de la matière et de la main-d'œuvre. Le montage dans l'encoche et le calibrage des têtes de bobines sont plus rapides avec des fils ronds et sont des opérations qui peuvent être réalisées sur machines automatiques, par contre, le coefficient de remplissage (rapport entre la section de cuivre et la section de l'encoche) est beaucoup plus faible, surtout si les fils sont gros et ne sont pas rangés. En outre, la puissance spécifique et la conductibilité thermique dans l'encoche sont augmentées lorsqu'on utilise des conducteurs rectangulaires de même que le coefficient de remplissage.

Pour ces raisons, on choisit des conducteurs rectangulaires.

La section est donnée par la relation :

$$q'_1 = \frac{I_{1N}}{a_1 \cdot j'_1}$$

avec j'_1 : densité de courant dans l'enroulement du stator qui spécifie les pertes et l'échauffement de la machine. Elle dépend de la puissance, de la version et du système d'aération de la machine.

Sa valeur est choisie de telle sorte qu'elle reste dans les marges permises :

$$j'_1 = (4,5 \div 5,5) \text{ A/mm}^2$$

On choisit : $j'_1 = 5,1 \text{ A/mm}^2$

De là, la section d'un conducteur effectif sera :

$$q'_1 = \frac{267}{3,51} = 17,45 \text{ mm}^2$$

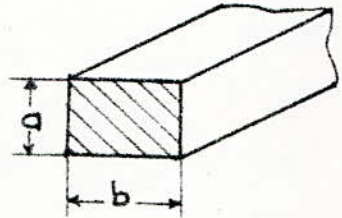
On divise le conducteur effectif en 2 conducteurs élémentaires
la section normalisée de chaque conducteur élémentaire sera :

$$q'_{1\text{ele}} = 8,79 \text{ mm}^2$$

les dimensions normalisées sont :

$$a = 2,44 \text{ mm}$$

$$b = 3,80 \text{ mm}$$



les fils de section rectangulaire presentent aussi l'avantage de permettre un rangement régulier et stable des conducteurs dans les encoches malgré les efforts centrifuges.

Pour ces conducteurs, la couche isolante a pour épaisseur 0,15 mm donc, on aura comme dimensions du conducteur isolé :

$$a' = 2,44 + 0,15 = 2,59 \text{ mm}$$

$$b' = 3,80 + 0,15 = 3,95 \text{ mm}$$

la section normalisée du conducteur effectif sera :

$$q'_1 = n_{\text{ele}} \cdot q'_{1\text{ele}} = 2 \cdot 8,79$$

$$q'_1 = 17,58 \text{ mm}^2$$

A partir de cette section normalisée, la nouvelle valeur de la densité de courant du stator j'_1 sera :

$$j'_1 = \frac{I_{1N}}{q_1 \cdot n_{\text{ele}} \cdot q'_{1\text{ele}}} = \frac{I_{1N}}{q_1 \cdot q'_1} = \frac{267}{3 \cdot 17,58}$$

$$j'_1 = 5,06 \text{ A/mm}^2$$

Cette valeur est très proche de celle choisie ; la difference represente moins de 1% (0,78%) de la valeur prise initialement.

1.3.2 Dimensionnement de l'encoche du stator :

La bobine d'enroulement est placée dans les encoches poinçonnées dans les toles d'acier qui forment les paquets du stator.

La forme de l'encoche est choisie en fonction de la puissance et de la tension de la machine.

Dans notre cas, la forme de l'encoche qui convient est la forme semi-ouverte. Ces encoches semi-ouvertes sont généralement rectangulaires.

Le mode de pose et le genre de l'isolation de l'enroulement dépendent beaucoup de la forme de l'encoche. Pour les encoches semi-ouvertes qui sont utilisées dans les machines de basse tension (jusqu'à 500v) et de moyenne puissance les feuilles isolantes sont placées préalablement dans l'encoche.

La bobine, comprenant deux parties suivant la largeur de l'encoche, est préalablement bobinée sur gabarit et formée.

La largeur de la fente de l'encoche est telle qu'une moitié de la section peut y passer.

L'enroulement, mis en place et fixé dans l'encoche ainsi que dans les parties frontales, est imprégné d'un vernis isolant.

Pour notre cas, on choisit un isolement de la classe B qui peut supporter une température maximale de 130°C . On utilise deux couches isolantes en micafolium de 0,4 mm d'épaisseur. L'isolation entre les deux couches d'enroulement est assurée par des feuilles de mica d'épaisseur $e = 1,2\text{ mm}$.

L'intercalaire étant formé de deux couches isolantes en micafolium de même épaisseur (0,4 mm).

La qualité de l'isolement des machines électriques détermine leur fiabilité et c'est pour cette raison qu'on prête une sérieuse attention au choix de l'isolation et à sa fabrication.

Le rôle de l'isolation ne se limite pas seulement à sa rigidité diélectrique et à sa résistance à la chaleur mais aussi à sa conductibilité thermique pour tenir compte du fait que les pertes dans le cuivre sont évacuées par l'isolation dans le milieu ambiant.

Pour la fermeture de l'encoche, on utilise une cale diélectrique de 4,2 mm de hauteur.

Les dimensions de l'encoche du stator sont :

- largeur d'encoche :

$$b_1 = 2.3,95 + 3.2.0,4$$

$$b_1 = 10,3 \text{ mm}$$

- hauteur du col :

h_4 est choisie égale à 0,7 mm

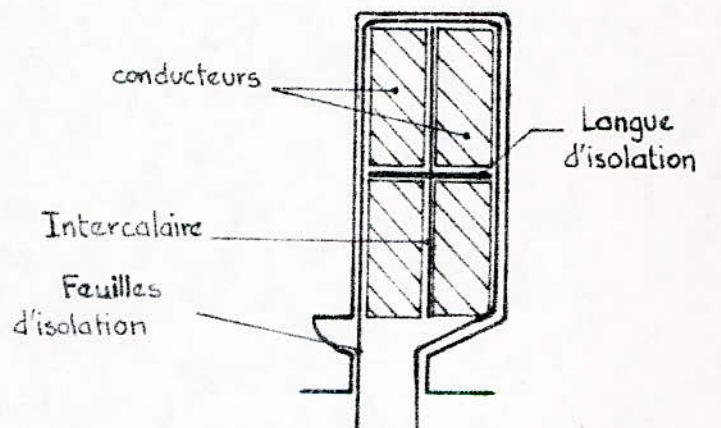
- épaisseur de la langue d'isolation :

$$e = 1,2 \text{ mm}$$

- hauteur de la cale :

$$h_2 = 4,2 \text{ mm}$$

- hauteur totale de l'encoche : $h_{z_1} = 34 \text{ mm}$



Mode de pose des feuilles d'isolation et des conducteurs

- l'ouverture de l'encoche est :

$$b_{enc_1} = 5,6 \text{ mm}$$

Les encoches étant à cotés parallèles ce qui entraîne le non parallélisme des cotés des dents et donc trois largeurs max, min et moy pour une dent :

$$b_{z_{\text{MAX}}} = \frac{\pi}{Z_1} (D_1 + 2h_{z_1}) - b_1 = \frac{\pi}{72} (470 + 2 \cdot 34) - 10,3 = 13,17 \text{ mm}$$

$$b_{z_{\text{MIN}}} = \frac{\pi}{Z_1} (D_1 + 2h_2 + 2h_4) - b_1 = \frac{\pi}{72} (470 + 1,4 + 8,4) - 10,3 = 10,65 \text{ mm}$$

$$b_{z_{\text{MOY}}} = \frac{\pi}{Z_1} (D_1 + h_{z_1}) - b_1 = \frac{\pi}{72} (470 + 34) - 10,3 = 11,69 \text{ mm}$$

- le pas dentaire :

$$Z_1 = \frac{\pi}{Z_1} D_1 = \frac{\pi}{72} \cdot 47 = 2,05 \text{ cm}$$

- la section de l'encoche :

Elle est donnée par la relation :

$$Q_{enc_1} = Q'_{enc_1} + Q_{cale} + Q_{isol}$$

où

Q'_{enc_1} : section d'encoche nécessaire aux conducteurs isolés

$$Q'_{enc_1} = \frac{N_e \cdot n_{ele} \cdot q_1/2}{K_r}$$

K_r est le coefficient de remplissage, pris dans l'intervalle toléré qui est $(0,65 \div 0,72)$; on prend $K_r = 0,65$

$$Q'_{enc_1} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 8,79}{0,65} = 270,46 \text{ mm}^2$$

Q_{isol} : section de l'isolation complete.

$$Q_{isol} = 33,18 \text{ mm}^2$$

Q_{cale} : section de la cale dielectrique

$$Q_{cale} = 25 \text{ mm}^2$$

d'où:

$$Q_{enc,1} = 328,65 \text{ mm}^2$$

- la section nette de cuivre :

$$Q_{cu} = N_e \cdot q'_1 = 10 \cdot 17,58 = 175,8 \text{ mm}^2$$

la nouvelle valeur du coefficient de remplissage est

$$K_r = \frac{Q_{cu}}{Q'_{enc,1}} = \frac{175,8}{270,46} = 0,65$$

On retrouve la même valeur pour K_r

1.3.3 Calcul des inductions :

- Induction maximale dans l'entrefer :

$$B_g = \frac{\phi_g}{\alpha_g \cdot \bar{G} \cdot l_g}$$

où ϕ_g représente le flux magnetique dans l'entrefer

$$\phi_g = \frac{K_E \cdot U_1 \cdot 10^8}{4 \cdot K_p \cdot K_{b,1} \cdot N_1 \cdot f_1} = \frac{0,967 \cdot 380 \cdot 10^8}{4 \cdot 1,09 \cdot 0,926 \cdot 40 \cdot 50}$$

$$\phi_g = 4,55 \cdot 10^6 \text{ MAXW}$$

donc :

$$B_g = \frac{4,55 \cdot 10^6}{0,715 \cdot 24,6 \cdot 33} = 7839 \text{ Gauss}$$

La différence entre la valeur prise sur la courbe (3) et la valeur calculée est négligeable (0,34%) en comparaison avec la marge admise (5÷10%).

- Induction maximale dans les dents du stator:

$$B_{z_{1MAX}} = \frac{B_s \cdot t_1}{b_{z_{1MIN}} \cdot K_{ac_1}} = \frac{7839 \cdot 2,05}{1,065 \cdot 0,93}$$
$$B_{z_{1MAX}} = 16225 \text{ Gauss}$$

- Induction minimale dans les dents du stator:

$$B_{z_{1MIN}} = \frac{B_s \cdot t_1}{b_{z_{1MAX}} \cdot K_{ac_1}} = \frac{7839 \cdot 2,05}{1,317 \cdot 0,93}$$
$$B_{z_{1MIN}} = 13120 \text{ Gauss}$$

- Induction moyenne dans les dents du stator:

$$B_{z_{1MOY}} = \frac{B_s \cdot t_1}{b_{z_{1MOY}} \cdot K_{ac_1}} = \frac{7839 \cdot 2,05}{1,169 \cdot 0,93}$$
$$B_{z_{1MOY}} = 14781,5 \text{ Gauss}$$

Les valeurs trouvées sont dans les normes imposées: $(1,3 \div 1,7)T$

K_{ac_1} : facteur de remplissage qui tient compte de la manière d'isolation de l'acier électrotechnique. Pour l'acier vernis et pour une épaisseur de la tôle de 0,5 mm, $K_{ac_1} = 0,93$

- Induction dans le joug du stator:

$$B_{j_1} = \frac{\phi_s}{2 \cdot h_{j_1} \cdot l_s \cdot K_{ac_1}}$$

où h_{j_1} : hauteur du joug du stator

$$h_{j_1} = \left(\frac{D_{ext} - D_1}{2} \right) - h_{z_1} = \left(\frac{660 - 470}{2} \right) - 34$$

$$h_{j_1} = 61 \text{ mm}$$

donc :
$$B_{J_1} = \frac{4,55 \cdot 10^6}{2 \cdot 6,1 \cdot 33 \cdot 0,93}$$

$$B_{J_1} = 12152 \text{ Gauss}$$

L'intervalle de tolérance étant $(1 \div 1,5)T$, la valeur trouvée est acceptable.

B-ROTOR :

Sauf pour les petites machines qui ont des encoches exécutées complètement fermées, les encoches du rotor sont souvent du type semi-fermé.

Les cales de fermeture soumises à la pression exercée par le bobinage sous l'effet de la force centrifuge, s'appuient par l'isthme sur l'extrémité de la dent. L'encoche semi-fermée limite la largeur entre appuis de la cale et en conséquence les contraintes de flexion qu'elle subit. Elle permet aussi de limiter les pulsations du champ magnétique dans l'entrefer des moteurs asynchrones. Ces pulsations proviennent des variations des perméances dues au défilement des encoches du rotor devant celles du stator.

Le rotor de toutes les moyennes et grosses machines est muni d'un enroulement en barres en deux couches (généralement une barre par couche). Le montage dans les encoches devra être exécuté avec des jeux minimaux pour limiter les mouvements ou tassements en rotation.

Le choix des barres est imposé, soit par les caractéristiques de la machine notamment par la valeur de l'intensité, soit par les conditions de formation ou de montage notamment dans le cas des encoches semi-fermées.

En vue de réduire le plus possible le nombre de connexions, l'enroulement choisi est du type ondulé.

Les avantages que présente un enroulement exécuté en barres rectangulaires sont:

- L'augmentation du coefficient de remplissage K_r
- L'augmentation de la puissance spécifique et de la conductibilité thermique dans l'encoche.

Pour l'enroulement ondulé, le pas raccourci ne présente aucun avantage car si une barre est raccourcie, l'autre doit être allongée, le pas est donc toujours diamétral.

Pour réaliser ces enroulements, on prépare les demi-bobines complètement isolées avec une demi-tête fermée (coudée), et l'autre laissée rectiligne. On enfle axialement les demi-bobines dans les encoches et on plie les parties rectilignes de façon à former les deuxièmes demi-têtes de bobines. On retouche l'isolation à l'endroit de ces coudes si elle a été détériorée pendant le pliage. On termine la confection de l'enroulement par les connexions entre les extrémités des demi-bobines et l'isolation de ces connexions.

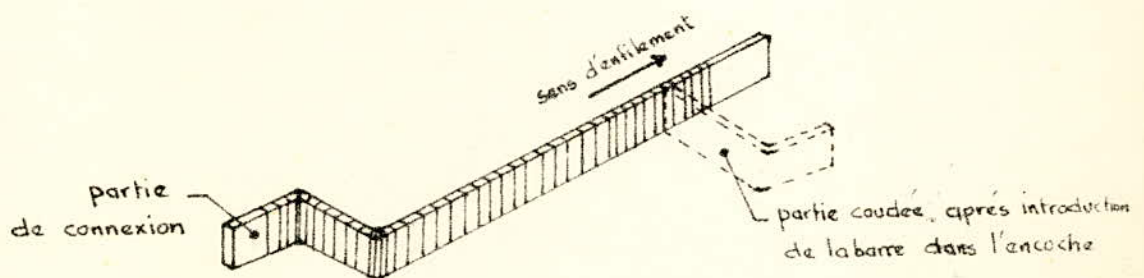


Schéma de réalisation d'une demi-bobine pour un enroulement ondulé

On doit choisir le nombre d'encoches du rotor de telle façon qu'il soit différent de celui du stator et ceci pour éliminer les couples parasites synchrones et les couples de vibration. Ceci revient à choisir le nombre d'encoches par pôle et par phase du rotor q_2 différent de celui du stator q_1 .

q_2 doit être entier pour pouvoir réaliser l'enroulement ondulé
La relation liant q_1 et q_2 est :

$$q_2 = q_1 \pm 1$$

On choisit : $q_2 = q_1 + 1 = 5$

1.3.4 Calcul des paramètres du rotor :

- Nombre total d'encoches du rotor :

$$Z_2 = 2p \cdot m_2 \cdot q_2$$

m_2 : nombre de phases du rotor $m_2 = 3$

$$Z_2 = 6 \cdot 3 \cdot 5 = 90 \text{ encoches}$$

- Diamètre externe du rotor :

$$D_2 = D_1 - 2\delta = 470 - 2 \cdot 1$$

$$D_2 = 468 \text{ mm}$$

- Pas dentaire du rotor :

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 468}{90} = 16,34 \text{ mm}$$

- Pas polaire :

$$\tau_2 = \frac{Z_2}{2p} = \frac{90}{6} = 15 \text{ encoches}$$

- Nombre de tours par phase :

$$N_2 = 2p \cdot q_2 \cdot \frac{1}{a_2}$$

a_2 étant le nombre de branches parallèles. Pour l'enroulement ondulé : $a_2 = 1$

$$N_2 = 6.5 = 30 \text{ tours}$$

- Facteur de bobinage :

$$K_{b_2} = K_{d_2} \cdot K_{r_2}$$

où :

$$K_{d_2} = \frac{\sin q_2 \frac{\alpha_2}{2}}{q_2 \cdot \sin \frac{\alpha_2}{2}}$$

avec : $\alpha_2 = \frac{2\pi p}{Z_2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3}{90} = \frac{\pi}{15} = 12^\circ \text{ électriques}$

$$K_{d_2} = \frac{\sin 5.6^\circ}{5 \cdot \sin 6^\circ} = 0,957$$

et : $K_{r_2} = \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_2}{\tau_2}$

Pour l'enroulement à pas diamétral : $y_2 = \tau_2$

donc : $K_{r_2} = \sin \frac{\pi}{2} = 1$

d'où : $K_{b_2} = K_{d_2} = 0,957$

- Force électromotrice réelle :

$$E_2 = K_E \frac{U_1 \cdot N_2 \cdot K_{b_2}}{N_1 \cdot K_{b_1}} = 0,957 \frac{380 \cdot 30 \cdot 0,957}{40 \cdot 0,926}$$

$$E_2 = 284,82 \text{ v}$$

on prend : $E_2 = 285 \text{ v}$

l'enroulement étant en étoile, la tension composée sera :

$$\sqrt{3} \cdot E_1 = \sqrt{3} \cdot 285 = 494 \text{ v}$$

- Courant du rotor :

$$I_2 = k_1 \cdot I_{1N} \frac{m_1 \cdot N_1 \cdot K_{b1}}{m_2 \cdot N_2 \cdot K_{b2}}$$

où : $k_1 = f(\cos\varphi)$: Facteur de correction qui tient compte de la chute de la f.e.m en charge ; sa valeur est comprise dans l'intervalle (0,92 ÷ 0,96).

on prend $k_1 = 0,93$

donc :

$$I_2 = 0,93 \cdot 267 \cdot \frac{3 \cdot 40 \cdot 0,926}{3 \cdot 30 \cdot 0,957}$$

$$I_2 = 320 \text{ A}$$

- Courant ramené :

$$I'_2 = \frac{P_N \cdot 10^3}{3 \cdot U_1 \cdot \eta_{LN}} = \frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,925}$$

$$I'_2 = 237 \text{ A}$$

- Charge linéaire de courant :

$$A_2 = \frac{I'_2}{I_{1N}} \cdot A_1 = \frac{237}{267} \cdot 434,14$$

$$A_2 = 385,36 \text{ A/cm.}$$

- Densité de courant :

Sa valeur sera choisie arbitrairement à partir de l'intervalle de tolérance (5 ÷ 6,5) A/mm²

On choisit : $j_2 = 5,5 \text{ A/mm}^2$

La densité du courant rotorique est supérieure à celle du courant statorique car l'échauffement provoqué par I_2 est diminué au maximum par les têtes de bobines du rotor en mouvement ; les têtes de

bobines servent de palettes de ventilation et font évacuer la chaleur dégagée par les enroulements du rotor.

- Section des barres du rotor:

$$q'_2 = \frac{I_2}{j_2} = \frac{320}{5,5}$$

$$q'_2 = 58,18 \text{ mm}^2$$

La largeur de l'encoche du rotor est donnée par la relation

$$b'_{2enc} \approx 0,47 \cdot t_2$$

$$b'_{2enc} \approx 0,47 \cdot 16,35 = 7,68 \text{ mm.}$$

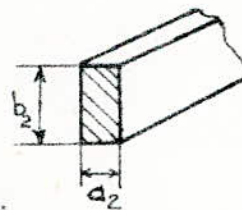
L'encoche du rotor étant à cotés parallèles et semi-fermée si l'on tient compte de l'isolation: trois couches de 0,4 mm d'épaisseur de micafolium; on aura comme largeur de la barre:

$$a = 7,68 - 2 \cdot 3 \cdot 0,4 = 5,28 \text{ mm.}$$

les valeurs normalisées, selon les normes russes, pour les dimensions de la barre étant:

$$a_2 = 5,1 \text{ mm}$$

$$b_2 = 11,6 \text{ mm}$$



on aura donc comme section normalisée:

$$q''_2 = 5,1 \cdot 11,6 = 58,3 \text{ mm}^2$$

la nouvelle valeur de la densité de courant sera:

$$j_2 = \frac{I_2}{q''_2} = \frac{320}{58,3} = 5,49 \text{ A/mm}^2$$

cette valeur est acceptable.

A partir de ces valeurs normalisées, on aura comme dimensions de l'encoche du rotor:

- largeur de l'encoche :

$$b_{enc2} = a_2 + 3 \cdot 2 \cdot 0,4$$

$$= 5,1 + 2,4$$

où 2.3.0,4 : épaisseur de l'isolant

$$b_{enc2} = 7,5 \text{ mm}$$

- hauteur de l'encoche :

- on choisit la hauteur du col :

$$h_5 = 0,8 \text{ mm}$$

- la hauteur de la cale :

$$h_4 = 2,5 \text{ mm}$$

et l'épaisseur de la langue d'isolation :

$$h_3 = 0,7 \text{ mm}$$

la hauteur totale est :

$$h_{z_2} = 2b_2 + h_3 + h_4 + h_5 + 4 \cdot 3 \cdot 0,4$$

$$h_{z_2} = 32 \text{ mm}$$

- ouverture de l'encoche :

$$b_{r_2} = 1,5 \text{ mm}$$

- la largeur mini t''_2 entre 2 encoches :

$$t''_2 = \frac{\pi}{z_2} (D_2 - 2h_{z_2}) - b_{enc2}$$

$$= \frac{\pi}{30} (468 - 2 \cdot 32) - 7,5 = 6,67 \text{ mm}$$

- la section de l'encoche :

$$Q_{enc2} = 227,7 \text{ mm}^2$$

- le perimetre :

$$P_2 = 75,07 \text{ mm}$$

ENCOCHE du STATOR

$h_1 = 25,9 \text{ mm}$

$h_2 = 0,8 \text{ mm}$

$h_3 = 4,2 \text{ mm}$

$h_4 = 0,7 \text{ mm}$

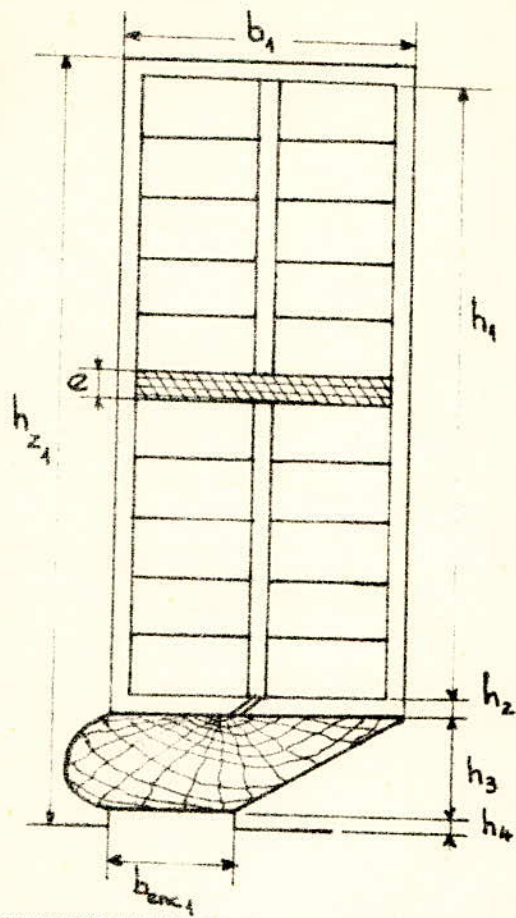
$e = 1,2 \text{ mm}$

$h_{z1} = 34 \text{ mm}$

$b_{enc1} = 5,6 \text{ mm}$

$b_1 = 10,3 \text{ mm}$

Conducteurs: $2,59 \times 3,95$



Echelle: 3

ENCOCHE du ROTOR

$h_2 = 28,7 \text{ mm}$

$h_3 = 0,7 \text{ mm}$

$h_4 = 2,5 \text{ mm}$

$h_5 = 0,8 \text{ mm}$

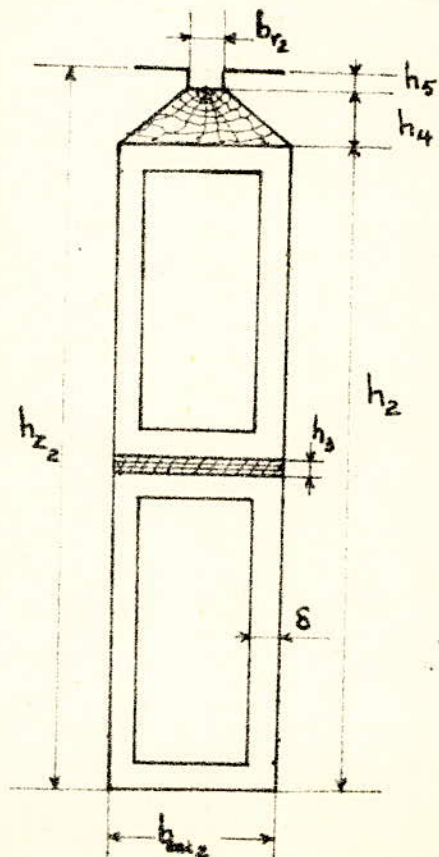
$\delta = 1,2 \text{ mm}$

$b_{r2} = 1,5 \text{ mm}$

$b_{enc2} = 7,5 \text{ mm}$

$h_{z2} = 32 \text{ mm}$

barres: $5,1 \times 11,6$



Echelle: 3

1.4 Calcul du circuit magnétique:

Le calcul du champ de l'enroulement a pour but principal de déterminer la répartition de l'induction magnétique le long de l'entrefer car cette répartition dépendent:

- les valeurs et les formes des f.e.m induites dans les enroulements.
- la valeur et la nature des efforts électromagnétiques qui créent les couples moteurs dans la machine.

Le champ magnétique de l'enroulement est déterminé par sa force magnétomotrice qui dépend de l'aménagement de l'enroulement et des courants qui le parcourent.

Le circuit magnétique d'une machine électrique tournante se compose de plusieurs éléments:

- les culasses statorique et rotorique.
- les dents statoriques et rotoriques.
- l'entrefer.

La force magnétomotrice totale nécessaire à la magnétisation du circuit magnétique de la machine sera donc la somme de chacune des forces magnétomotrices créées dans les différents tronçons constituant ce circuit magnétique.

1.4.1 Force magnétomotrice dans l'entrefer:

Elle est donnée par la relation:

$$F_g = 2 \cdot H_g \cdot \delta \cdot K_g$$

où: K_g est le facteur de CARTER qui tient compte de la distribution du champ magnétique dans l'entrefer.

$$K_s = K_{s_1} \cdot K_{s_2}$$

avec :

$$K_{s_1} = \frac{t_1 + 10s}{t_1 - b_{enc_1} + 10s} = \frac{2,05 + 10 \cdot 0,1}{2,05 - 0,56 + 10 \cdot 0,1} = 1,22$$

$$K_{s_2} = \frac{t_2 + 10s}{t_2 - b_{r2} + 10s} = \frac{1,634 + 10 \cdot 0,1}{1,634 - 0,15 + 10 \cdot 0,1} = 1,06$$

b_{enc_1} : ouverture de l'encoche du stator

$$K_s = 1,22 \cdot 1,06 = 1,29$$

H_s : champ magnétique dans l'entrefer

$$H_s = \frac{B_s}{\mu_0} = 0,8 \cdot B_s$$

s : entrefer

d'où :

$$F_s = 2 \cdot 0,8 \cdot B_s \cdot K_s \cdot s = 2 \cdot 0,8 \cdot 7839 \cdot 1,29 \cdot 0,1$$

$$F_s = 1618 \text{ A.T}$$

1.4.2 Force magnétomotrice des dents du stator :

$$F_{z_1} = 2 \cdot H_{z_1} \cdot h_{z_1}$$

Comme on a trois valeurs pour l'induction des dents du stator, on a aussi trois valeurs pour le champ magnétique H_{z_1} .

On obtient ces valeurs de H_{z_1} à partir de la courbe (7) d'aimantation de l'acier électrotechnique.

On choisit comme acier, le 3320 qui présente un pourcentage de silicium de 4% et qui nous donne des pertes réduites.

Cet acier est utilisé pour des machines de grande puissance, il est laminé à froid et texturé.

La courbe (7) nous donne les valeurs suivantes:

$$B_{z_{1\text{MAX}}} = 16225 \text{ Gs} \rightarrow H_{z_{1\text{MAX}}} = 5,6 \text{ A/cm}$$

$$B_{z_{1\text{MOY}}} = 14781,5 \text{ Gs} \rightarrow H_{z_{1\text{MOY}}} = 3,7 \text{ A/cm}$$

$$B_{z_{1\text{MIN}}} = 13120 \text{ Gs} \rightarrow H_{z_{1\text{MIN}}} = 2,8 \text{ A/cm}$$

H_{z_1} est donné par la relation:

$$H_{z_1} = \frac{1}{6} (H_{z_{1\text{MAX}}} + H_{z_{1\text{MIN}}} + 4 H_{z_{1\text{MOY}}})$$

$$H_{z_1} = \frac{1}{6} (5,6 + 2,8 + 4 \cdot 3,7)$$

$$H_{z_1} = 3,866 \text{ A/cm}$$

d'où:

$$F_{z_1} = 2 \cdot H_{z_1} \cdot h_{z_1} = 2 \cdot 3,866 \cdot 3,4 -$$

$$F_{z_1} = 26,29 \text{ A.T}$$

1.4.3 Force magnétomotrice des dents du rotor:

$$F_{z_2} = 2 \cdot H_{z_2} \cdot h_{z_2}$$

Pour obtenir H_{z_2} , on procède de la même façon que pour H_{z_1} , car les encoches du rotor étant semi-fermées, les dents ne seront pas à cotés parallèles du fait que les encoches le sont.

On utilise le même acier pour le rotor.

Les inductions sont données par:

$$B_{z_{2MAX}} = \frac{B_s \cdot t_2}{b_{z_{2MIN}} \cdot K_{ac}}$$

où :

$$K_{ac} = 0,93$$

$$b_{z_{2MIN}} = t_2'' = 6,67 \text{ mm}$$

$$B_{z_{2MAX}} = \frac{7839 \cdot 1,634}{0,667 \cdot 0,93} = 20649,2 \text{ Gs}$$

$$B_{z_{2MAX}} = 20649,2 \text{ Gs} \longrightarrow H_{z_{2MAX}} = 500 \text{ A/cm}$$

$$B_{z_{2MIN}} = \frac{B_s \cdot t_2}{b_{z_{2MAX}} \cdot K_{ac}}$$

où :

$$b_{z_{2MAX}} = t_2 - b_{r_2} = 16,35 - 1,5 = 14,85 \text{ mm}$$

$$B_{z_{2MIN}} = \frac{7839 \cdot 1,634}{1,485 \cdot 0,93} = 9281 \text{ Gs}$$

$$B_{z_{2MIN}} = 9281 \text{ Gs} \longrightarrow H_{z_{2MIN}} = 1,6 \text{ A/cm}$$

$$B_{z_{2MOY}} = \frac{B_s \cdot t_2}{b_{z_{2MOY}} \cdot K_{ac}}$$

où

$$b_{z_{2MOY}} = \frac{\pi}{Z_2} (D_2 - h_{z_2}) - b_{enc_2} = \frac{\pi}{90} (468 - 32) - 7,5$$

$$b_{z_{2MOY}} = 7,7 \text{ cm}$$

$$B_{z_{2MOY}} = \frac{7839 \cdot 1,634}{0,77 \cdot 0,93} = 17887 \text{ Gs}$$

$$B_{z_{2MOY}} = 17887 \text{ Gs} \longrightarrow H_{z_{2MOY}} = 14 \text{ A/cm}$$

donc le champ des dents du rotor sera :

$$\begin{aligned}
H_{z_2} &= \frac{1}{6} (H_{z_{2MAX}} + H_{z_{2MIN}} + 4 H_{z_{2MOY}}) \\
&= \frac{1}{6} (500 + 1,6 + 4 \cdot 14) \\
&= 92,93 \text{ A/cm}
\end{aligned}$$

d'où :

$$\begin{aligned}
F_{z_2} &= 2 \cdot H_{z_2} \cdot h_{z_2} = 2 \cdot 92,93 \cdot 3,2 \\
F_{z_2} &= 594,75 \text{ A.T}
\end{aligned}$$

1.4.4 Facteur de saturation:

Il caractérise la saturation du circuit magnétique de la machine, il est donné par la relation:

$$\begin{aligned}
K_z &= \frac{F_8 + F_{z_1} + F_{z_2}}{F_8} = \frac{26,29 + 594,75 + 1618}{1618} \\
K_z &= 1,38
\end{aligned}$$

la différence étant de 6,15% de la valeur prise initialement (1,3):
cette valeur est acceptable.

1.4.5 Force magnétomotrice du joug du stator:

$$F_{ac_1} = K'_{ac_1} \cdot H_{ac_1} \cdot L_{ac_1}$$

où

L_{ac_1} : longueur de l'acier du joug du stator

$$L_{ac_1} = \frac{\pi}{2p} (D_{ext_1} - h_{j_1})$$

avec : h_{j_1} : hauteur du joug du stator

$$h_{j_1} = \left(\frac{D_{ext_1} - D_1}{2} \right) - h_{z_1} = \left(\frac{66 - 47}{2} \right) - 3,4 = 5,1 \text{ cm.}$$

$$\text{donc: } L_{ac_1} = \frac{\pi}{6} (66 - 6,1) = 31,36 \text{ cm}$$

K'_{ac_1} : facteur qui tient compte de la non uniformité du champ magnétique dans le joug du stator.

Sa valeur est donnée en fonction de l'induction B_{J_1} par la courbe (8):

Pour $B_{J_1} = 12152 \text{ Gs}$, $K'_{ac_1} = 0,53$

H_{ac_1} : champ magnétique dans le joug du stator; sa valeur est donnée par la courbe (7)

$$B_{J_1} = 12152 \text{ Gs} \longrightarrow H_{ac_1} = 2,45 \text{ A/cm}$$

d'où:

$$F_{ac_1} = 0,53 \cdot 2,45 \cdot 31,36$$

$$F_{ac_1} = 40,72 \text{ A.T}$$

1.4.6 Force magnétomotrice dans le joug du rotor:

$$F_{ac_2} = K'_{ac_2} \cdot H_{ac_2} \cdot L_{ac_2}$$

où:

$$L_{ac_2} = \frac{\pi}{2p} (D_2 - h_{J_2})$$

avec:
$$h_{J_2} = \frac{D_2 - d_{axe} + \frac{1}{6} d_{axe}}{2} - h_{z_2}$$

h_{z_2} : hauteur de la dent du rotor

d_{axe} : diamètre de l'arbre sur lequel est monté le rotor,

il est donné par la relation:

$$d = K \sqrt[3]{\frac{P_N}{n}} \quad \begin{matrix} P_N \text{ [kW]} \\ n \text{ [tr/mn]} \end{matrix}$$

K : facteur dépendant du diamètre interne du stator, il est donné par le tableau suivant:

D_1 [cm]	10	20	30	40	50 et plus
K	35	30	27	25	24

on a $D_1 = 47 \text{ cm}$, on prend $K = 24$

le terme $\frac{1}{6} d_{axe}$ signifie qu'on tient compte de la partie du flux qui s'enferme par l'axe.

donc :

$$d_{axe} = 24 \cdot \sqrt[3]{\frac{250}{1000}} = 15,12 \text{ cm}$$

Pour les moteurs asynchrones, on augmente d_{axe} de 20%.

on aura : $d_{axe} = 18,14 \text{ cm}$

d'où :
$$h_{j2} = \frac{46,8 - 18,14 + \frac{1}{6} \cdot 18,14}{2} = 3,2$$

$$h_{j2} = 12,6 \text{ cm}$$

et
$$L_{ac2} = \frac{\pi}{6} (46,8 - 12,6) = 17,9 \text{ cm}$$

H_{ac2} est donné en fonction de B_{j2} par la courbe (7)

B_{j2} étant l'induction dans le joug du rotor :

$$B_{j2} = \frac{\Phi_8}{2 \cdot h_{j2} \cdot l_2 \cdot K_{ac}}$$

avec : $l_2 = l_1 + 0,5 = 38 + 0,5 = 38,5 \text{ cm}$

$l_2 > l_1$: pour l'amélioration des conditions d'assemblage et l'augmentation du $\cos \varphi$.

donc :
$$B_{j2} = \frac{4,55 \cdot 10^6}{2 \cdot 12,6 \cdot 38,5 \cdot 0,93} = 0,5 \text{ Tesla}$$

la courbe (7) nous donne : $H_{ac2} = 0,80 \text{ A/cm}$ et

la courbe (8) : $K_{ac2} = 0,646$

d'où :

$$F_{ac2} = 0,646 \cdot 0,8 \cdot 17,9 = 9,25 \text{ A.T}$$

1.4.7 Force magnétomotrice totale :

$$F_{cir} = F_{z1} + F_{z2} + F_{ac1} + F_{ac2} + F_8$$

$$F_{\text{cir}} = 26,29 + 594,75 + 40,72 + 9,25 + 1618$$

$$F_{\text{cir}} = 2289 \text{ A.T}$$

1.4.8 Facteur de saturation totale de la machine :

$$K_{\mu} = \frac{F_{\text{cir}}}{F_{\text{s}}} = \frac{2289}{1618}$$

$$K_{\mu} = 1,41$$

si $K_{\mu} < 1,4$: la machine aura un excès d'acier

si $K_{\mu} > 1,4$: la saturation de la machine sera forte

donc pour que le dimensionnement de la machine soit convenable il faut que $K_{\mu} = 1,4$. Dans notre cas, le dimensionnement est valable.

1.4.9 Courant magnétisant :

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\text{cir}}}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot K_{b_1}} = \frac{3 \cdot 2289}{0,9 \cdot 3 \cdot 40 \cdot 0,926}$$

$$I_{\mu} = 68,66 \text{ A}$$

$$I_{\mu} \% = \frac{I_{\mu}}{I_{\text{IN}}} \cdot 100 = \frac{68,66}{267} \cdot 100 = 25,7 \%$$

l'intervalle de tolérance étant (18% ÷ 45%), la valeur de $I_{\mu} \%$ est valable

1.5 Constante de PETROV :

Pour pouvoir estimer la quantité du fer utilisé dans la construction de la machine, on se base sur la constante de PETROV qui est donnée par :

$$C_p = \frac{D_1^{2,45} \cdot l_s \cdot n^{1,2}}{P_N} = \frac{47^{2,45} \cdot 33 \cdot 1000^{1,2}}{293,6} = 5,58 \cdot 10^6$$

Pour $C_p > 8,5 \cdot 10^6$ la machine a un excès d'acier. Dans notre cas, la valeur trouvée pour C_p reste dans la marge permise.

- Paramètres de l'enroulement du stator :

L'enroulement choisit est un enroulement imbriqué à pas raccourci :

$$y_{\text{racc}} = 10$$

Il est à deux couches avec le nombre d'encoches par pôle et par

phase :

$$q_1 = 4$$

Le nombre de branches parallèles : $a_1 = 3$

Le nombre total d'encoches : $Z_1 = 72$

Le pas polaire en encoches : $\sigma_1 = 12$

Le nombre de paires de pôles : $p = 3$

Le nombre de phases : $m_1 = 3$

Le pas relatif d'enroulement : $\beta = \frac{5}{6}$

L'angle électrique entre deux encoches successives :

$$\alpha_1 = \frac{360 \cdot p}{Z_1} = \frac{360 \cdot 3}{72} = 15^\circ$$

Le déplacement en encoches entre deux commencements :

$$\lambda_1 = \frac{120^\circ}{\alpha_1} = \frac{120^\circ}{15^\circ} = 8 \text{ encoches}$$

- Paramètres de l'enroulement du rotor :

L'enroulement est ondulé à pas diamétral : $y_2 = \sigma_2 = \frac{Z_2}{2p} = 15 \text{ enc.}$

avec : $Z_2 = 90$: nombre total d'encoches

L'enroulement est à deux couches avec le nombre d'encoches par

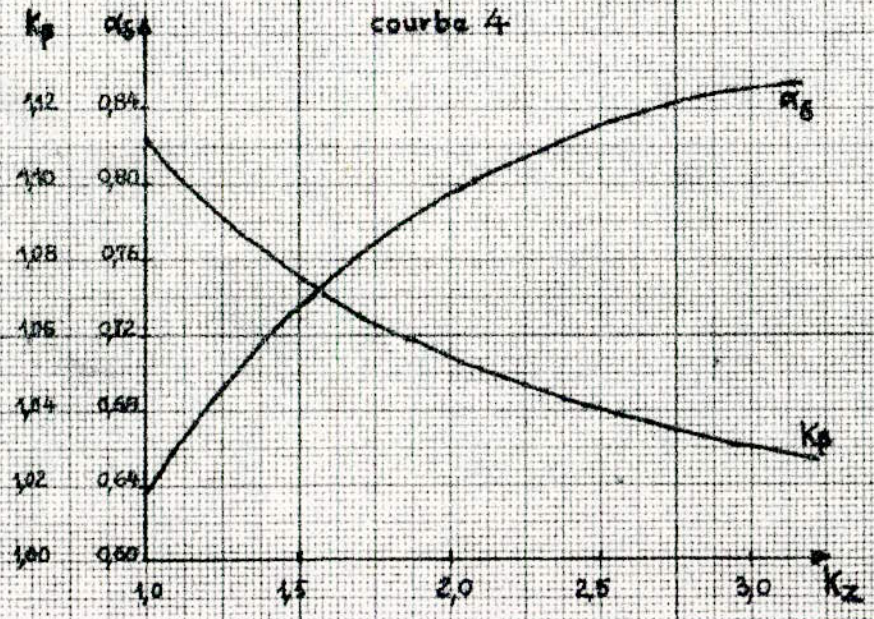
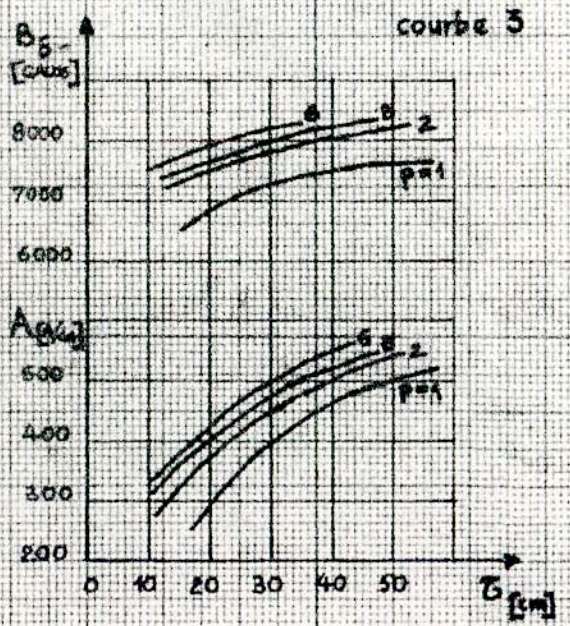
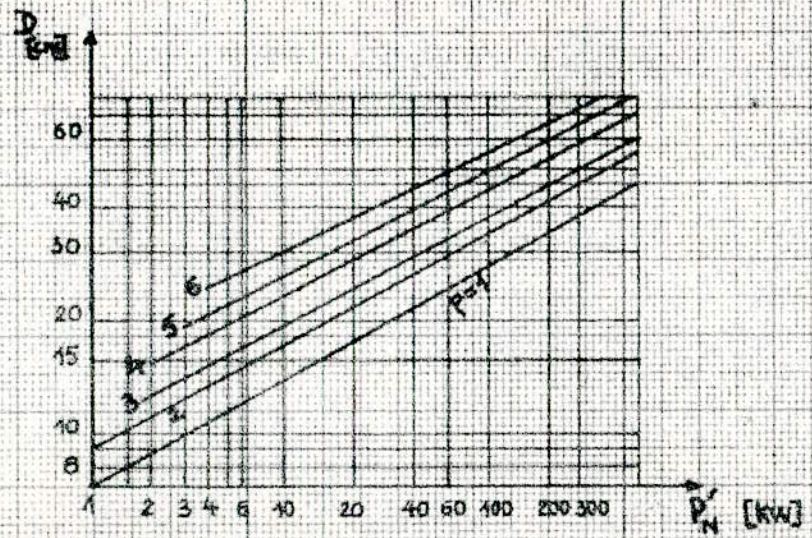
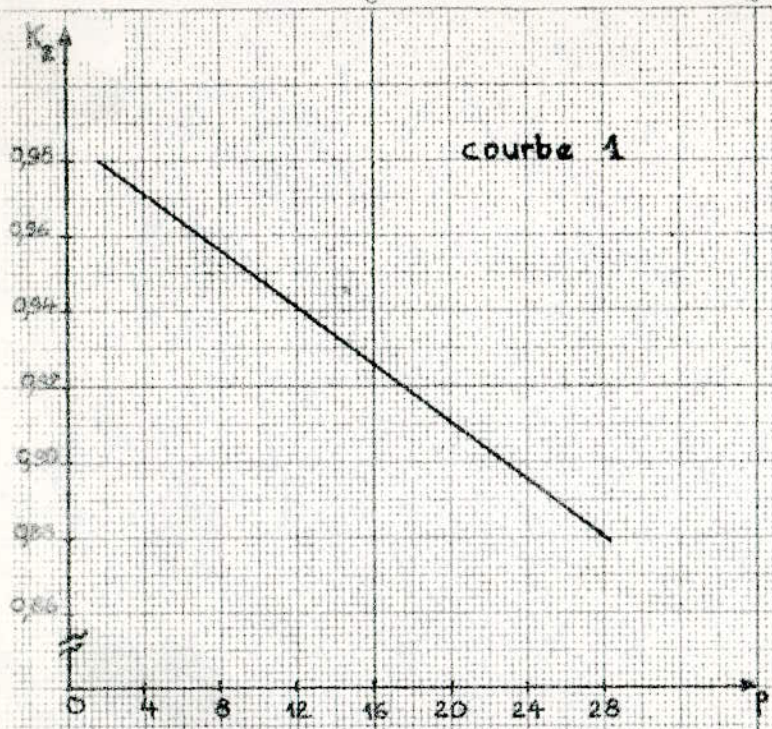
pôle et par phase entier : $q_2 = 5$

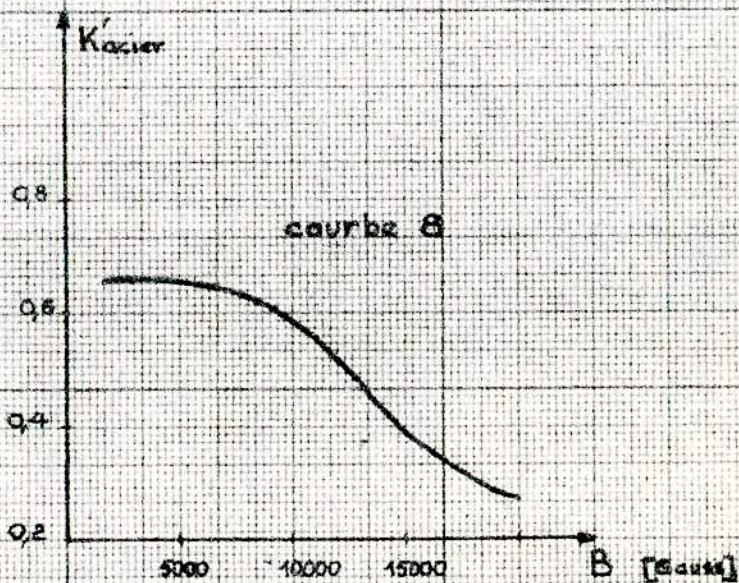
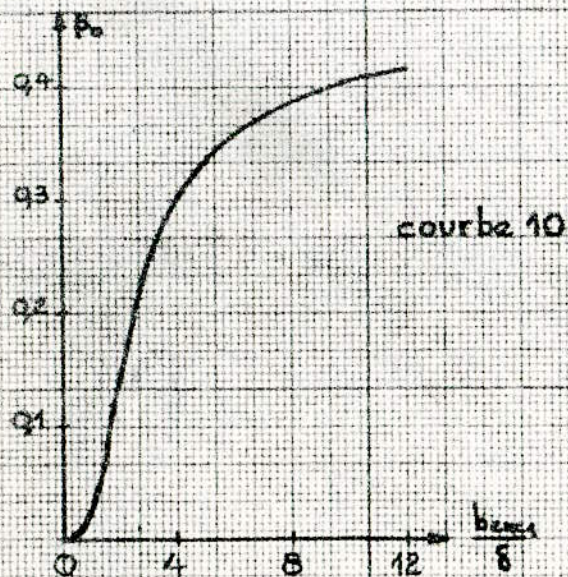
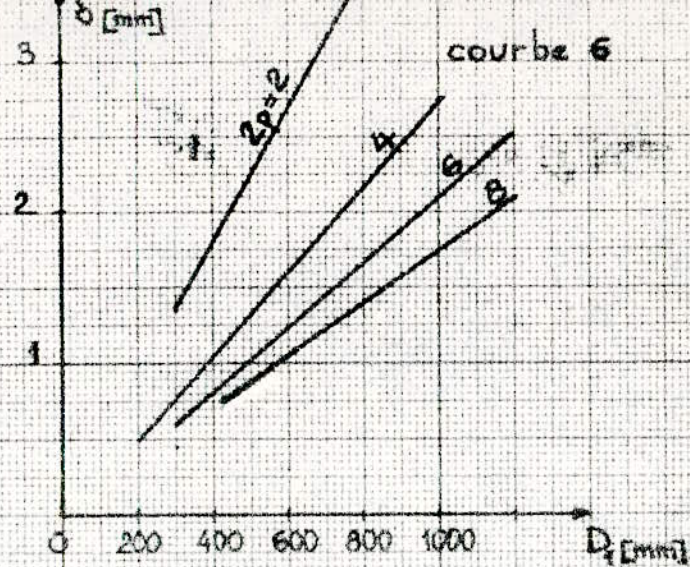
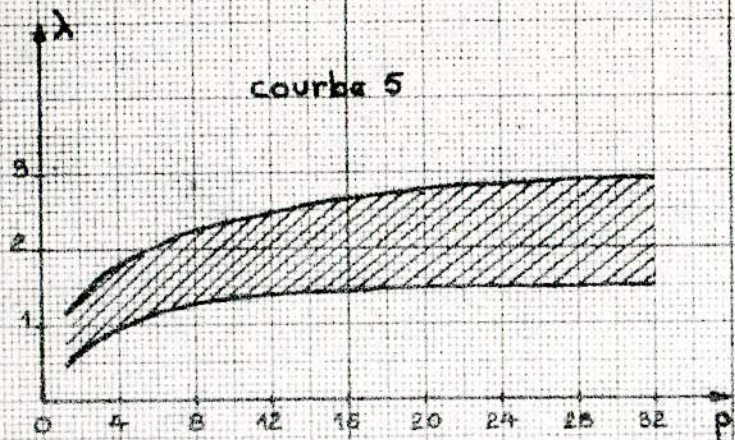
Le nombre de phases : $m_2 = m_1 = 3$

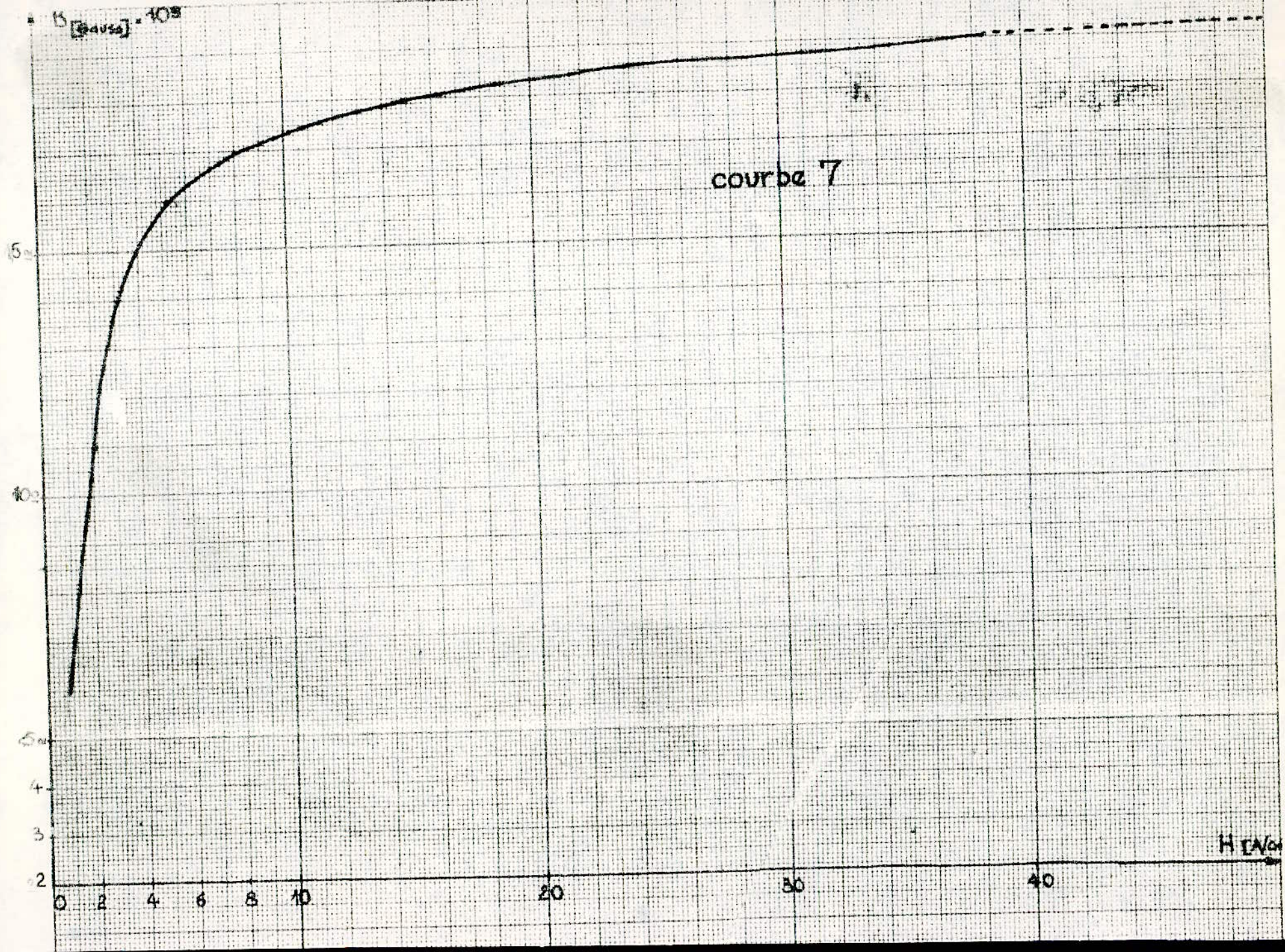
L'angle électrique entre deux encoches successives : $\alpha_2 = \frac{360 \cdot p}{Z_2} = 12^\circ$

Le déplacement entre deux commencements : $\lambda_2 = 10 \text{ encoches}$

Le nombre de branches parallèles : $a_2 = 1$







1.6 Répartition spatiale de la force magnétomotrice

Pour la construction de la f.m.m on a les conditions principales suivantes :

- La valeur de la f.m.m est constante entre deux conducteurs, et change dans les axes où se trouvent les conducteurs

- La direction de la f.m.m est déterminée par la direction des courants.

- La courbe doit être symétrique par rapport à l'axe des abscisses quand le nombre d'encoches par pôle et par phase "q" est entier.

La méthode de construction de la courbe de la f.m.m est basée sur le principe de superposition : on trace la courbe de la f.m.m en échelon pour un moment de temps précis ; pour notre cas on a pris trois moments de temps précis différents ($\omega t = 0$; $\omega t = \frac{\pi}{6}$ et $\omega t = \frac{\pi}{3}$). Nous aurons donc trois courbes de f.m.m en échelon qui seront décalées l'une par rapport à l'autre dans le temps.

Le principe de décomposition en série de fourrier nous permet de déterminer l'amplitude des différents harmoniques qui constituent la f.m.m en échelon. Ces harmoniques sont : l'harmonique fondamental 1 et les harmoniques de rang supérieur (3, 5, 7, ...).

Les harmoniques supérieurs influent peu lorsque "q" devient relativement grand, et la courbe de la f.m.m est très rapprochée de la sinusoïde.

La décomposition en série de fourrier nous donne :

$$Y = a_1 \cos x + b_1 \sin x + a_3 \cos 3x + b_3 \sin 3x + a_5 \cos 5x + b_5 \sin 5x + a_7 \cos 7x + b_7 \sin 7x + a_9 \cos 9x + b_9 \sin 9x + \dots$$

1.6 Répartition spatiale de la force magnétomotrice

Pour la construction de la f.m.m on a les conditions principales suivantes :

- La valeur de la f.m.m est constante entre deux conducteurs, et change dans les axes où se trouvent les conducteurs

- La direction de la f.m.m est déterminée par la direction des courants.

- La courbe doit être symétrique par rapport à l'axe des abscisses quand le nombre d'encoches par pôle et par phase "q" est entier.

La méthode de construction de la courbe de la f.m.m est basée sur le principe de superposition : on trace la courbe de la f.m.m en échelon pour un moment de temps précis ; pour notre cas on a pris trois moments de temps précis différents ($\omega t = 0$; $\omega t = \frac{\pi}{6}$ et $\omega t = \frac{\pi}{3}$). Nous aurons donc trois courbes de f.m.m en échelon qui seront décalées l'une par rapport à l'autre dans le temps.

Le principe de décomposition en série de fourrier nous permet de déterminer l'amplitude des différents harmoniques qui constituent la f.m.m en échelon. Ces harmoniques sont : l'harmonique fondamental 1 et les harmoniques de rang supérieur (3, 5, 7, ...).

Les harmoniques supérieurs influent peu lorsque "q" devient relativement grand, et la courbe de la f.m.m est très rapprochée de la sinusoïde.

La décomposition en série de fourrier nous donne :

$$Y = a_1 \cos x + b_1 \sin x + a_3 \cos 3x + b_3 \sin 3x + a_5 \cos 5x + b_5 \sin 5x + a_7 \cos 7x + b_7 \sin 7x + a_9 \cos 9x + b_9 \sin 9x + \dots$$

$$Y = \sum_{n=1}^5 [a_{2n-1} \cdot \cos(2n-1)x + b_{2n-1} \cdot \sin(2n-1)x]$$

On se limite à l'harmonique de rang 5.

Les coefficients a_i et b_i sont donnés (tout calcul fait) par :

$$a_1 = 0,1667 Y_0 + 0,161 (Y_1 - Y_{11}) + 0,1443 (Y_2 - Y_{10}) + 0,1179 (Y_3 - Y_9) + 0,0833 (Y_4 - Y_8) + 0,043 (Y_5 - Y_7)$$

$$a_3 = 0,1667 [Y_0 - (Y_4 - Y_8)] - 0,1179 (Y_3 - Y_9) + 0,1179 [(Y_1 - Y_{11}) - (Y_5 - Y_7)]$$

$$a_5 = 0,1667 Y_0 + 0,0431 (Y_1 - Y_{11}) - 0,1443 (Y_2 - Y_{10}) - 0,1179 (Y_3 - Y_9) + 0,0833 (Y_4 - Y_8) + 0,161 (Y_5 - Y_7)$$

$$b_1 = 0,1667 Y_6 + 0,0431 (Y_1 + Y_{11}) + 0,0833 (Y_2 + Y_{10}) + 0,1179 (Y_3 + Y_9) + 0,1143 (Y_4 + Y_8) + 0,161 (Y_5 + Y_7)$$

$$b_3 = -0,1667 [Y_6 - (Y_2 + Y_{10})] + 0,1179 (Y_3 + Y_9) + 0,1179 [(Y_1 + Y_{11}) - (Y_5 + Y_7)]$$

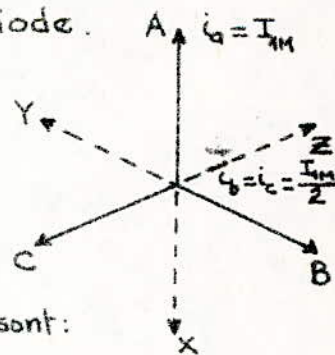
$$b_5 = 0,1667 Y_6 + 0,161 (Y_1 + Y_{11}) + 0,0833 (Y_2 + Y_{10}) - 0,1179 (Y_3 + Y_9) - 0,1443 (Y_4 + Y_8) + 0,0431 (Y_5 + Y_7)$$

Les y_i sont les amplitudes obtenues en divisant la courbe, en échelon, de la f.m.m en 12 parties sur une demi période.

1.6.1 : Moment de temps $wt=0$

a/ $i_a = I_{1M} = I_1 \sqrt{2} = 267 \sqrt{2} = 377,6 \text{ A}$

$i_b = i_c = \frac{I_{1M}}{2} = \frac{I_1 \sqrt{2}}{2} = 188,8 \text{ A}$



b/ Les différentes amplitudes de la courbe en échelon sont :

$$2 I_{1M} N_1 = 2 \cdot 377,6 \cdot 40 = 30208 \text{ A.T}$$

$$\frac{3}{2} \cdot I_{1M} \cdot N_1 = \frac{3}{2} \cdot 377,6 \cdot 40 = 22656 \text{ A.T}$$

$$I_{1M} N_1 = 377,6 \cdot 40 = 15104 \text{ A.T}$$

c/ D'après la courbe en échelon, les différentes y_i sont :

$$Y_0 = Y_1 = Y_{11} = 15104 \quad ; \quad Y_2 = Y_3 = Y_9 = Y_{10} = 37760 ;$$

$$Y_4 = Y_5 = Y_6 = Y_7 = Y_8 = 52864$$

d/ Le calcul des coefficients a_i et b_i nous donne:

$$a_1 = a_3 = a_5 = 2517,83$$

$$b_1 = 57587,74 ; b_3 = 3376,75 ; b_5 = 363,25$$

On obtient le tableau de valeurs suivant:

$Y \backslash x$	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{6}$	π
Y_1	2517,83	30974	42501	51131,36	57587,74	48613,53	38940,3	26613,36	-2517,83
Y_3	2517,83	3376,75	607,35	-2517,83	-3376,75	2517,83	4168,10	3376,75	-2517,83
Y_5	2517,83	-1998,88	-2037,23	944,33	363,25	-1573,50	1523,52	2362,13	-2517,83
Y_T	7553,49	32351,90	41071,12	49557,90	54574,24	49557,86	44631,92	32352,94	-7553,49

1.6.2 Moment de temps $\omega t = \frac{\pi}{6}$

a/ $i_a = i_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{IM} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 377,6 = 327 \text{ A}$

$$i_b = 0 \text{ A}$$

b/ $\sqrt{3} \cdot N_1 \cdot I_{IM} = \sqrt{3} \cdot 40 \cdot 377,6 = 26160,9 \text{ A.T}$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot N_1 \cdot I_{IM} = 13080,45 \text{ A.T}$$

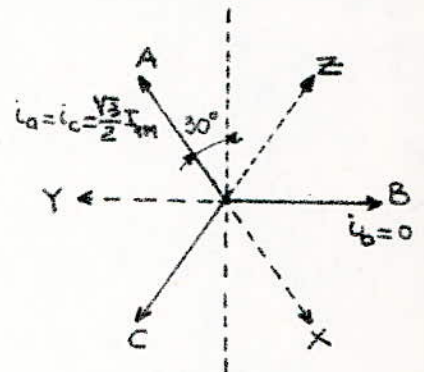
c/ $Y_0 = Y_1 = Y_{11} = 13080,45$

$$Y_2 = Y_3 = Y_9 = Y_{10} = 39241,34$$

$$Y_4 = Y_5 = Y_6 = Y_7 = Y_8 = 52321,8$$

d/ $a_1 = a_3 = a_5 = 2180,51$

$$b_1 = 54448,68 ; b_3 = 4361 ; b_5 = -4232,51$$



$Y \backslash x$	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{6}$	π
Y_1	2180,51	23112,7	40042,88	48244,19	54448,68	46063,68	36959,17	25335,36	-2180,51
Y_3	2180,51	4361	1541,84	-2180,51	-4361	2180,51	4625,54	4361	-2180,51
Y_5	2180,51	-4004,63	1450,98	2575,2	-4232,51	2575,2	4534,68	-227,87	-2180,51

1.6.3 Moment de temps $wt = \frac{\pi}{3}$

a/ $i_a = i_b = \frac{I_{1M}}{2} = 188,8 \text{ A}$

$i_c = -I_{1M} = -377,6 \text{ A}$

b/ $N_1 I_{1M} = 377,6 \cdot 40 = 15104 \text{ A.T}$

$\frac{3}{2} N_1 I_{1M} = \frac{3}{2} \cdot 40 \cdot 377,6 = 22656 \text{ A.T}$

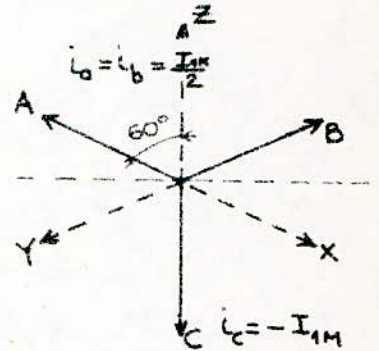
c/ $\gamma_0 = \gamma_1 = \gamma_{11} = 15104$

$\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_9 = \gamma_{10} = 37760$

$\gamma_4 = \gamma_5 = \gamma_6 = \gamma_7 = \gamma_8 = 52864$

Donc on a les mêmes valeurs que pour $wt=0$ mais les courbes sont décalées dans le temps d'un angle $wt = \frac{\pi}{3}$.

Finalement on remarque que l'on peut négliger les harmoniques de rangs 3° et 5° devant le premier harmonique. (voir courbes)



CHAPITRE II

Calcul des paramètres du moteur

2. Calcul des paramètres du moteur

On se propose dans ce chapitre de calculer les résistances et réactances relatives aux bobinages statoriques et rotoriques.

Les résistances et les réactances des machines électriques constituent les éléments essentiels qui permettent d'étudier les différents régimes de fonctionnement de la machine. Ainsi, grâce à leur connaissance, on peut déterminer les conditions de fonctionnement de la machine non seulement en régime permanent, mais encore lors des phénomènes accidentels et rapides comme les court-circuits brusques et le décrochage du réseau.

2.1 Calcul des résistances :

2.1.1 Résistance de l'enroulement statorique :

Elle est donnée par la relation :

$$r_1(75^\circ\text{C}) = \rho_{(75^\circ\text{C})} \cdot \frac{L_1}{n_{1c} \cdot q_{1c} \cdot a_1}$$

Les enroulements du stator étant en cuivre, la résistivité à 15°C est :

$$\rho_{15^\circ\text{C}} = 0,0175 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

$$\text{à } 75^\circ\text{C} \text{ on aura : } \rho_{75^\circ\text{C}} = \rho_{15^\circ\text{C}} \cdot [1 + \alpha \cdot \Delta\theta]$$

où : α : coefficient de dilatation. A 15°C , $\alpha_{\text{cuivre}} = 0,004$

$\Delta\theta$: différence de température ; $\Delta\theta = 75^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 60^\circ\text{C}$

$$\text{donc : } \rho_{75^\circ\text{C}} = 0,0175 [1 + 0,004 \cdot 60] = 0,0217 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

L_1 : longueur totale des conducteurs d'une phase.

$$L_1 = 2 \cdot \ell_{\text{moy}} \cdot N_1 \cdot 10^{-2} \text{ [m]}$$

avec : ℓ_{moy} : longueur moyenne d'un demi tour d'enroulement.

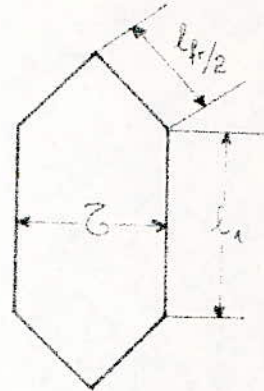
$$l_{moy_1} = l_1 + l_{frontale}$$

et $l_{frontale} = l_{fr} = K \cdot b_y + L$

b_y étant la largeur moyenne des parties frontales.

$$b_y = \frac{\pi}{2p} (D_1 + h_{z_1}) \cdot \beta$$

$$b_y = \frac{\pi}{6} (47 + 3,4) \cdot \frac{5}{6} = 22 \text{ cm}$$



les valeurs de K et L dépendent du nombre de paires de poles et du gabarit de la machine; elles sont données par le tableau:

2p	Gabarits: 6; 7; 8; 9		Gabarits: 10; 11; 12	
	K	L	K	L
2	1,30	3	1,35	4
4	1,35	3	1,40	4
6	1,45	3	1,50	4

donc, pour le gabarit 11 et $2p=6$

ona:

$$K = 1,5$$

$$L = 4 \text{ cm}$$

$$l_{fr} = K \cdot b_y + L = 1,5 \cdot 22 + 4 = 37 \text{ cm}$$

$$l_{moy_1} = l_1 + l_{fr} = 38 + 37 = 75 \text{ cm}$$

et $L_1 = 2 \cdot l_{moy_1} \cdot N_1 \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 75 \cdot 40 \cdot 10^{-2} = 60 \text{ m}$

d'où:

$$r_{1(75^\circ\text{C})} = f_{(75^\circ\text{C})} \cdot \frac{L_1}{n_{e1} \cdot q_{e1} \cdot \Delta_1} = 0,0217 \cdot \frac{60}{2 \cdot 8,79 \cdot 3}$$

$$r_{1(75^\circ\text{C})} = 0,024 \Omega$$

la valeur relative est donnée par:

$$r_{1\#} = \frac{r_1}{U_1} \cdot I_{1N} = \frac{0,024}{380} \cdot 267 = 0,0168$$

le domaine de tolérance étant de : (0,01 ÷ 0,08), la valeur trouvée s'y trouve.

2.1.2 Résistance de l'enroulement rotorique :

$$r_2 = r_{\text{cu}} + r_{2a} = \rho_{(75^\circ\text{C})} \cdot \frac{L_2}{q_2'' \cdot a_2} + \frac{\Delta U_{\text{balais}}}{I_2}$$

où : $L_2 = 2 \cdot N_2 \cdot l_{\text{moy}_2}$

avec : $l_{\text{moy}_2} = l_2 + l_{\text{fr}_2}$: longueur d'1/2 tour d'enroulement.

$l_{\text{fr}_2} = A + (10 \div 15) \text{ cm}$: longueur des parties frontales.

$$A = \frac{Z_y}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{t_c}\right)^2}}$$

et : $Z_y = \frac{\pi}{2p} (D_2 - h_{z2})$

$$f_c = B + a'_1$$

$$a'_1 = 2\Delta_1 + \Delta_2$$

où :

Δ_1 : épaisseur d'isolation de la section : $\Delta_1 = (3 \times 0,4) \text{ mm}$

Δ_2 : espace entre parties frontales qu'il faut avoir pour un bon refroidissement

Pour les tensions jusqu'à 600 V,

$$\Delta_2 = (0,3 \div 0,4) \text{ mm}$$

on choisit $\Delta_2 = 0,35 \text{ mm}$

B : longueur du cuivre + 1 couche d'isolation

$$B = [b + s] \cdot P_\ell + \Delta l + 0,05 P_\ell + 0,1 \quad [\text{mm}]$$

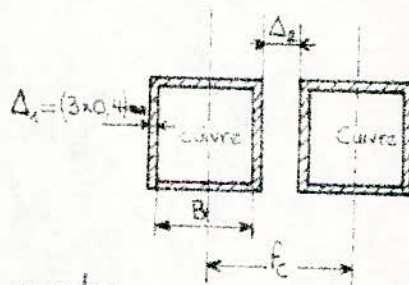
b : longueur nette du cuivre : $b = 5,1 \text{ mm}$

s : isolation des deux cotés du conducteur élémentaire : $s = 0$

P_ℓ : nombre de conducteurs placés en largeur dans l'encoche ; dans notre cas : $P_\ell = 1$ (une seule barre)

Δl : épaisseur de l'isolation des deux cotés du conducteur élémentaire ; $\Delta l = 0$

$0,05 P_\ell$: tient compte de l'augmentation de l'imprégnation



donc: $B = b + 0,05 \cdot p_2 + 0,1 = 5,1 + 0,15 = 5,25 \text{ mm}$

$$B = 0,525 \text{ cm}$$

$$l_c = B + 2\Delta_1 + \Delta_2 = 0,525 + 2 \cdot 0,12 + 0,35 = 1,115 \text{ cm}$$

et: $l_c = \frac{\pi}{Z_2} (D_2 + A_2)$

où: $A_2 = a_3 + 2h'_2$

pour des tensions jusqu'à 690V : $h'_2 = 0,2 \text{ mm}$
 $a_3 = 1,2 \text{ mm}$

$$A_2 = 1,2 + 2 \cdot 0,2 = 1,6 \text{ mm}$$

$$l_c = \frac{\pi}{90} (46,8 + 0,16) = 1,639 \text{ cm}$$

de même:

$$Z_y = \frac{\pi}{6} (46,8 - 3,2) = 22,8 \text{ cm}$$

donc: $A = \frac{22,8}{\sqrt{1 - \left(\frac{1,115}{1,639}\right)^2}} = 31,1 \text{ cm}$

et: $l_{fr2} = A + 10 = 31,1 + 10 = 41,1 \text{ cm}$

$$l_{moy2} = l_2 + l_{fr2} = 38,5 + 41,1 = 79,6 \text{ cm}$$

la longueur totale des conducteurs d'une phase du rotor sera:

$$L_2 = 2 \cdot N_2 \cdot l_{moy2} \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 30 \cdot 79,6 \cdot 10^{-2} = 47,76 \text{ m}$$

la résistance active d'une phase du rotor:

$$r_{2a} = \rho_{75^\circ} \frac{L_2}{q_2 \cdot a_2} = 0,0217 \cdot \frac{47,76}{583,1} = 0,0177 \Omega$$

et la résistance transitoire des balais:

$$r_{bal} = \frac{\Delta U_{bal}}{I_2} \quad \text{avec} \quad \Delta U_{bal} \text{ estimé à } 0,7 \text{ V}$$

$$r_{bal} = \frac{0,7}{320} = 0,00218 \Omega$$

la résistance globale sera:

$$r_2 = r_{2a} + r_{bal} = 0,0177 + 0,00218 = 0,02 \Omega$$

- Résistance du rotor ramené au stator :

$$r'_2 = r_2 \cdot K_{red}$$

K_{red} : facteur de réduction

$$K_{red} = \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 \cdot K_{b1}}{N_2 \cdot K_{b2}} \right)^2 = \frac{3}{3} \left(\frac{40 \cdot 0,926}{30 \cdot 0,957} \right)^2 = 1,66$$

d'où : $r'_2 = 0,02 \cdot 1,66 = 0,0332 \Omega$

- Résistance du rotor réduite dans l'unité relative :

$$r'_{2x} = \frac{r'_2}{U_1} \cdot I_{1N} = \frac{0,0332}{380} \cdot 267 = 0,023$$

Valeur qui est comprise dans l'intervalle toléré : (0,01 ÷ 0,08)

2.2 Calcul des réactances :

2.2.1 Réactance de fuite du stator : X_{1f}

Le calcul de la réactance de fuite tient compte des dispersions dans les différentes parties de l'enroulement; ces dispersions sont :

- dispersion d'encoche
- dispersion différentielle
- dispersion dans les têtes des bobines

la réactance totale du stator est donnée par la relation :

$$X_{11} = X_{12} + X_{1f}$$

X_{12} : réactance d'induction mutuelle entre les enroulements du stator et du rotor, due à l'harmonique fondamental du flux principal

X_{1f} : réactance de fuite engendrée par le flux de fuite.

$$X_{12} = \frac{E}{I_M} = A_x \cdot \lambda_0$$

où E : force électromotrice de la machine, donnée par :

$$E = 4 \cdot K_p \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot K_{b_1} \cdot \phi \cdot 10^{-8}$$

la grandeur A_x est donnée par :

$$A_x = 0,158 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{p \cdot q_1}$$

$$= 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{40}{100}\right)^2 \cdot \frac{33}{3 \cdot 4} = 0,03476 \Omega$$

λ_0 : facteur sans dimension appelé perméance et qui ne dépend que de la géométrie de la machine. Il est donné par :

$$\lambda_0 = 0,427 \cdot q_1 \cdot \frac{K_p \cdot \alpha_s \cdot \sigma}{\delta \cdot K_s \cdot K_M}$$

$$= 0,427 \cdot 4 \cdot \frac{1,09 \cdot 0,715 \cdot 246}{1 \cdot 1,29 \cdot 1,4} = 181,31$$

donc : $X_{12} = A_x \cdot \lambda_0 = 0,03476 \cdot 181,31 = 6,3 \Omega$

La réactance de fuite est donnée par la relation :

$$X_{1f} = 0,158 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{p \cdot q_1} \cdot \Sigma \lambda_1$$

$\Sigma \lambda_1 = \lambda_{e_1} + \lambda_{fr_1} + \lambda_{dif_1}$: somme des perméances qui caractérisent les dispersions du flux

avec : λ_{e_1} : c'est le coefficient de dispersion (perméance) d'encoche, il tient compte de la géométrie et du remplissage de l'encoche.

En tenant compte du biais et du raccourcissement du pas, on a la relation suivante :

$$\lambda_{e_1} = \left(\frac{h_1}{3b_1} + \frac{h_3}{b_1}\right) \cdot K_{racc}$$

où : K_{racc} : coefficient de raccourcissement du pas

$$K_{racc} = \frac{3\beta + 1}{4} = 0,875$$

$$h_3 = h_2 + h_4 + 2 \cdot 0,4 = 4,2 + 0,7 + 0,8 = 5,7 \text{ mm}$$

avec : 2.0,4 : épaisseur d'isolation

donc :

$$\lambda_{e_1} = \left(\frac{27,5}{3 \cdot 10,3} + \frac{5,7}{10,3}\right) \cdot 0,875 = 1,263$$

λ_{fr1} : c'est le coefficient de dispersion de la partie frontale de l'enroulement

Pour les parties frontales, la vue des lignes du champ magnétique est très compliquée; c'est pourquoi le calcul de λ_{fr1} ne peut être effectué que de façon approximative.

On a la formule empirique suivante.

$$\lambda_{fr1} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l'_g} (l_{fr} - 0,64 \cdot \sigma \cdot \beta_1) \cdot K_{racc1}$$

où :

$$K_{racc1} = \sin \beta \frac{\pi}{2} = \sin \frac{5}{6} \frac{\pi}{2} = 0,965$$

$$l'_g = l_1 - 0,5 \cdot n_v \cdot b_v = 38 - 0,5 \cdot 5 \cdot 1 = 35,5 \text{ cm}$$

$$\text{d'où : } \lambda_{fr1} = 0,34 \cdot \frac{4}{35,5} \cdot (37 - 0,64 \cdot 24,6 \cdot \frac{5}{5}) \cdot 0,965 = 0,882$$

λ_{dif1} : c'est le coefficient de dispersion différentielle.

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_1 \cdot K_{b1}^2}{11,9 \cdot \sigma \cdot K_g} = \frac{20,5 \cdot (0,926)^2}{11,9 \cdot 1 \cdot 1,29} = 1,145$$

La somme des perméances sera :

$$\Sigma \lambda_1 = \lambda_{e1} + \lambda_{fr1} + \lambda_{dif1} = 1,263 + 0,882 + 1,145 = 3,29$$

La réactance de fuite sera :

$$\begin{aligned} X_{1f} &= 0,158 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_g}{p \cdot q_1} \cdot \Sigma \lambda_1 \\ &= 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{40}{100}\right)^2 \cdot \frac{33}{3 \cdot 4} \cdot 3,29 \end{aligned}$$

$$X_{1f} = 0,114 \Omega$$

La valeur relative est :

$$X_{1f*} = \frac{X_{1f} \cdot I_{1N}}{U_1} = \frac{0,114 \cdot 267}{380} = 0,08$$

Le domaine de tolérance étant : (0,08 ÷ 0,14), la valeur ci-dessus s'y

trouve.

2.2.2 Réactance de fuite du rotor : X_{2f}

La réactance totale des fuites dans l'enroulement du rotor se calcule de la même façon que celle du stator. Elle est donnée par la formule suivante :

$$X_{2f} = 0,158 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_2}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{p \cdot 92} \cdot \sum \lambda_2$$

où $\sum \lambda_2 = \lambda_{e2} + \lambda_{fr2} + \lambda_{dif2}$

- Perméance d'encoche :

$$\lambda_{e2} = \left(\frac{h'_1}{3b'_1} + \frac{h'_3}{b'_1} \right) \cdot K_{racc2}$$

où : $b'_1 = b_{enc2} = 7,5 \text{ mm}$

$$h'_1 = 21,5 \text{ mm}$$

$$h'_3 = h_5 + h_4 + 3 \cdot 0,4 = 4,5 \text{ mm}$$

$$\lambda_{e2} = \left(\frac{21,5}{3 \cdot 7,5} + \frac{4,5}{7,5} \right) \cdot 1$$

$$K_{racc2} = \frac{3\beta_2^2 + 1}{4} = \frac{4}{4} = 1 \text{ car}$$

$$\lambda_{e2} = 1,55$$

$$\beta_2 = \frac{y_2}{\tau_2} = 1$$

- Perméance des parties frontales :

$$\lambda_{fr2} = 0,34 \cdot \frac{92}{l'_s} \cdot (l_{fr2} - 0,64 \cdot \tau \cdot \beta_1) \cdot K_{racc2}$$

$$= 0,34 \cdot \frac{5}{35,5} \cdot (41,1 - 0,64 \cdot 24,6 \cdot \frac{5}{6}) \cdot 1$$

$$\lambda_{fr2} = 1,33$$

- Perméance différentielle :

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_2 \cdot K_{b2}^2}{11,9 \cdot \tau \cdot K_s} = \frac{16,34 \cdot (0,957)^2}{11,9 \cdot 1 \cdot 1,29}$$

$$\lambda_{dif2} = 0,974$$

La perméance globale de l'enroulement du rotor sera :

$$\sum \lambda_2 = 1,55 + 1,33 + 0,974 = 3,854$$

La réactance de fuite du rotor :

$$X_{2f} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{30}{100}\right)^2 \cdot \frac{33}{3 \cdot 5} \cdot 3,854 = 0,0602 \Omega$$

La réactance de fuite du rotor réduite :

$$X'_2 = X_{2f} \cdot \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{N_1 \cdot K_{b1}}{N_2 \cdot K_{b2}} \right)^2 = X_{2f} \cdot K_{red}$$

$$X'_2 = 0,0602 \cdot 1,66 = 0,1 \Omega$$

La valeur relative sera :

$$X'_{2*} = X'_2 \cdot \frac{I_{1N}}{U_1} = 0,1 \cdot \frac{267}{380} = 0,07$$

La marge permise étant de : (0,07 à 0,14)

2.2.3 Influence du biais sur les réactances :

- Coefficient d'inclinaison : K_{biais}

L'existence du biais d'encoche diminue le bruit magnétique, les couples parasites de la machine mais augmente les réactances, ce qui entraîne une diminution des couples de démarrage et maximal.

L'influence du biais peut être prise en considération uniquement dans le cas où le nombre d'encoches par pôle et par phase (q) est supérieur à 2 car dans le cas contraire la perméance différentielle influe beaucoup.

L'angle d'inclinaison est :

$$\gamma^\circ = \frac{360 \cdot p}{\pi \cdot D_2} \cdot b_{\text{biais}}$$

$$\text{ou : } b_{\text{biais}} = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1 + p} = \frac{\pi \cdot 47}{72 + 3} = 1,96$$

$$\gamma^\circ = \frac{360 \cdot 3}{\pi \cdot 46,8} \cdot 1,96 = 14,4$$

Le coefficient ϵ du tableau suivant est donné par :

$$\epsilon = \frac{U_1}{I_{1N} \cdot X_{1f}} = \frac{380}{68,66 \cdot 0,114} = 48,54$$

$$\epsilon^{-1} = 0,02$$

Le facteur de biais est donné en fonction de ϵ^{-1} et de l'angle d'inclinaison γ° par le tableau :

$\gamma \cdot \epsilon^{-1}$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,20
12	1,2	-	-	-	-	-	-
14	1,16	1,07	1,06	-	-	-	-
16	1,25	1,11	1,07	1,06	-	-	-
.....
60	8,9	3,8	2,78	2,24	2,05	1,75	1,43

On a : $K_{\text{biais}} = 1,16$

- Influence du biais sur X_{1f} :

$$X_{1b} = X_{1f} \cdot K_b = 0,114 \cdot 1,16 = 0,13 \Omega$$

- Influence du biais sur X_{2f} :

$$X_{2b} = X_{2f} \cdot K_b = 0,0602 \cdot 1,16 = 0,0698 \Omega$$

2.2.4 - Réactance mutuelle :

$$X_{12} = \frac{U_1 - I_{1f} \cdot X_{1f}}{I_{1f}} = \frac{380 - 68,66 \cdot 0,114}{68,66}$$

$$X_{12} = 5,42 \Omega$$

- Réactance mutuelle réduite :

$$X_{12*} = \frac{I_{1N} \cdot X_{12}}{U_1} = \frac{267 \cdot 5,42}{380} = 3,808$$

la valeur de X_{12*} est dans le domaine de tolérance : $(1,25 \div 4)$

CHAPITRE III

Pertes et Rendement

3.1 Calcul des pertes :

La prédétermination des pertes d'une machine électrique est une opération généralement très délicate à cause de la complexité des phénomènes se traduisant par ces pertes et du grand nombre d'éléments souvent mal connus qui doivent intervenir dans le calcul.

On peut classer ces pertes comme suit :

1°/ Les pertes mécaniques comprenant :

- les pertes par frottement aux paliers
- les pertes par frottement aux balais (bagues)
- les pertes par ventilation et frottement sur l'air

2°/ Les pertes dans le fer comprenant :

- les pertes par hysteresis dues au flux principal
- les pertes par courant FOUCAULT dues également au flux principal.

Les pertes par hysteresis et par courant FOUCAULT dues au flux principal sont appelées : pertes fer normales.

- les pertes fer supplémentaires à vide produites par des variations locales d'induction

3°/ Les pertes dans le cuivre qui sont les pertes joules normales dans les enroulements.

3.1.1 Pertes à vide :

Elles comprennent les pertes mécaniques et les pertes dans le fer

- Pertes dans le fer :

Les pertes dans l'acier du rotor existent mais, vu la faible valeur (1 à 3 Hz) de la fréquence du cycle d'aimantation du circuit magnétique

du rotor, sont négligeables et on ne prend en compte que les pertes dans l'acier du stator.

Ces dernières sont déterminées pour deux parties du stator:

- Pertes dans le joug: Elles sont données par la relation:

$$P_{ac,j} = K_{ac,j} \cdot P_{ac,spc} \cdot G_j \cdot 10^{-3}$$

où: $K_{ac,j} = 1,3$ pour les machines de moyenne puissance

C'est un facteur qui tient compte de l'augmentation des pertes par suite du traitement du stator.

$P_{ac,spc}$: pertes spécifiques de l'acier 3320; à partir de la courbe (9), on a: $P_{ac,spc} = 1,75$ w/Kg

G_j : Poids du joug du stator

$$G_j = V_j \cdot \gamma$$

$\gamma = 7,65$ g/cm³: poids spécifique de l'acier

avec: $V_j = S_j \cdot \ell_1$

où: $S_j = \frac{\pi}{4} D_{ext,1}^2 - \frac{\pi}{4} (D_1 + 2h_{z,1})^2 = \frac{\pi}{4} (66)^2 - \frac{\pi}{4} (47 + 2 \cdot 3,4)^2$

$$S_j = 1147,9 \text{ cm}^2$$

$$V_j = 1147,9 \cdot 38 = 43620,2 \text{ cm}^3$$

donc: $G_j = V_j \cdot \gamma = 43620,2 \cdot 7,65 = 333,7$ Kg

d'où: $P_{ac,j} = 1,3 \cdot 1,75 \cdot 333,7 = 759,16 \cdot 10^{-3}$ Kg

- Pertes dans les dents:

$$P_{ac,d} = K_{ac,d} \cdot P_{ac,spc} \cdot G_d \cdot 10^{-3}$$

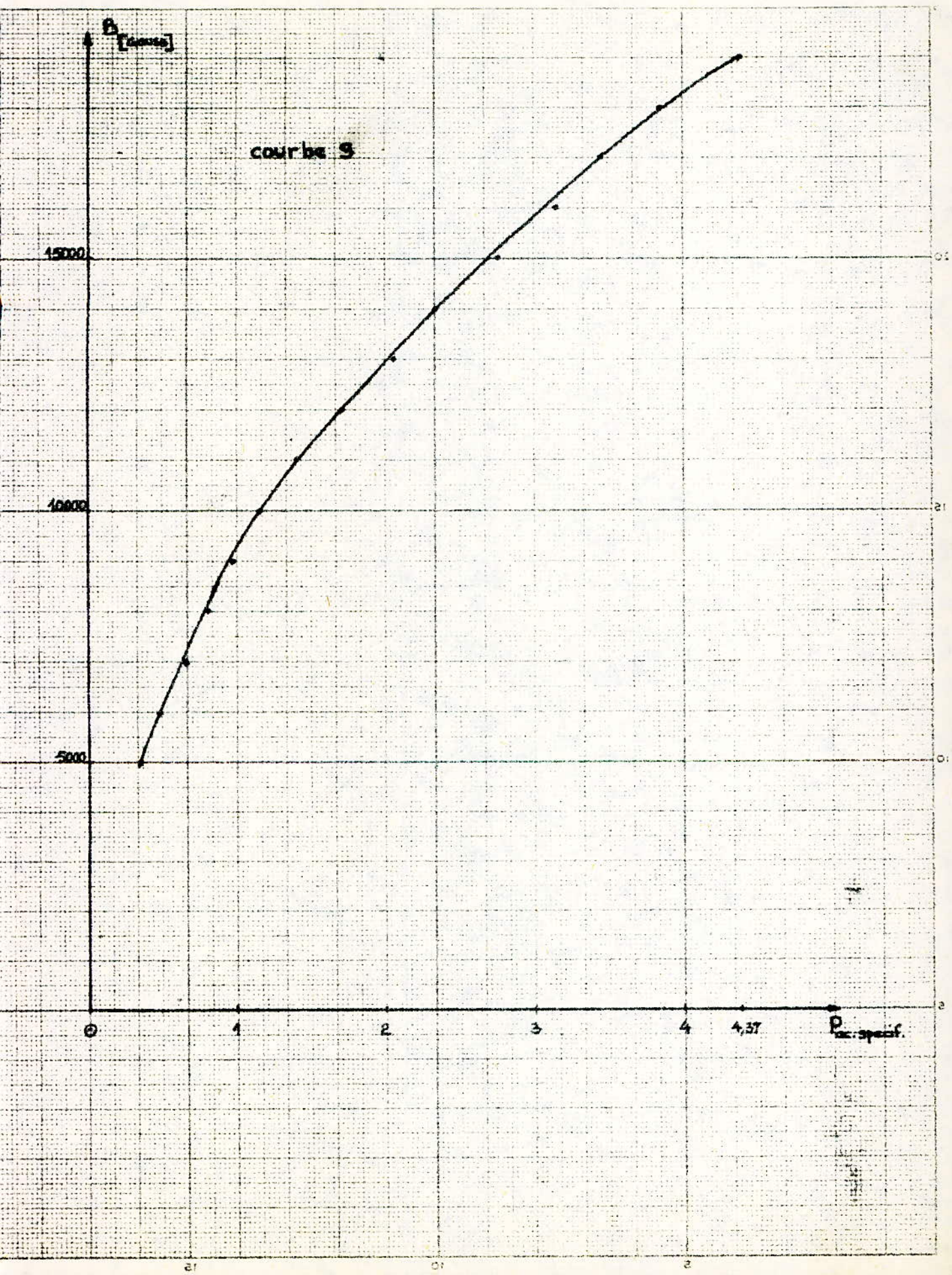
La courbe (9) nous donne pour $B_{z,1max} = 1,62$ T : $P_{ac,spc} = 3,185$ w/Kg

$K_{ac,d} = 1,8$ pour les moyennes puissances

$G_d = \gamma \cdot V_d$: poids des dents du stator.

$$V_d = S_d \cdot \ell_1 = \left[\frac{\pi}{4} [(D_1 + 2h_{z,1})^2 - D_1^2] - Z_1 \cdot Q_{enc,1} \right] \cdot \ell_1 = 38 \left[\frac{\pi}{4} [(47 + 2 \cdot 3,4)^2 - 47^2] - 72 \cdot 3,29 \right]$$

$$V_d = 11465 \text{ cm}^3$$



donc: $G_d = \gamma \cdot V_d = 11465 \cdot 7,65 = 87,7 \text{ Kg}$

d'où: $P_{acd} = 1,8 \cdot 3,185 \cdot 87,7 \cdot 10^{-3} = 502,78 \text{ KW}$

donc les pertes principales dans l'acier du stator sont:

$$P_{ac1} = P_{aj} + P_{acd} = 759,16 + 502,78$$

$$P_{ac1} = 1261,94 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

On tient compte des pertes de surface aussi: lorsque le stator et le rotor de la machine tournante comportent des encoches ouvertes ou semi-ouvertes, il y a apparition d'oscillation de l'induction dans les couches extérieures des dents.

La fréquence de ces oscillations est très grande et la profondeur de pénétration du champ oscillant est très petite, c'est pourquoi les pertes existent seulement à la surface et s'appellent: pertes de surface.

La fréquence d'oscillation étant:

$$f = \frac{Z_1 \cdot n}{60} = \frac{72 \cdot 1000}{60} = 1200 \text{ Hz}$$

- Pertes de surface dans le stator produites par le rotor:

$$P_{\text{surf. } Z_1} = 2p \cdot G \cdot \frac{t_1 - b_{enc1}}{t_1} \cdot l_s \cdot P_{\text{sp. surf}_1} \cdot 10^{-3} \text{ [KW]}$$

où: $P_{\text{sp. surf}_1} = 0,5 K_0 \left(\frac{Z_2 \cdot n_2}{10^4} \right)^{1,5} \left(\frac{B_0 \cdot t_2}{10^3} \right)^2$: pertes de surface.

avec: $B_0 = \beta_0 \cdot K_s \cdot B_s$: amplitude de l'oscillation de l'induction dans l'entrefer

β_0 étant déterminé à partir de la courbe (10): $\beta_0 = f(b_{enc1}/\delta)$

pour $b_{enc1} = 5,6 \text{ mm}$; $\delta = 1 \text{ mm}$ on a: $\beta_0 = 0,305$

K_s : facteur d'entrefer $K_s = 1,29$

B_s : induction dans l'entrefer $B_s = 7839 \text{ Gauss}$

donc: $B_0 = 0,305 \cdot 1,29 \cdot 7839 = 3084,25 \text{ Gauss}$

K_0 : facteur dépendant de la nuance et de l'épaisseur de l'acier utilisé.

$K_0 = 2,5$ pour l'acier texturé

on prend : $n_2 = n_1 = 1000$ tr/mn

donc :
$$P_{sp.surf_1} = 0,5 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{90 \cdot 10^3}{10^4}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{3084,25 \cdot 1,634}{10^3}\right)^2 = 857,19 \text{ Kg/cm}^3$$

d'où :
$$P_{surf.z_1} = 2 \cdot 3 \cdot 24,6 \cdot \frac{2,05 - 0,56}{2,05} \cdot 33 \cdot 857,19 \cdot 10^{-7} = 303,466 \cdot 10^3 \text{ KW}$$

- Pertes de surface dans le rotor produites par le stator :

$$P_{surf.z_2} = 2p \cdot G \cdot \frac{t_2 - b_{r2}}{t_2} \cdot l_2 \cdot P_{spec.surf_2} \cdot 10^{-7} \text{ [KW]}$$

où :
$$P_{spec.surf_2} = 0,5 \cdot K_0 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10^4}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{B_0 \cdot t_1}{10^3}\right)^2$$

On prend la même épaisseur et la même nuance pour l'acier du rotor

$$P_{spec.surf_2} = 0,5 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{72 \cdot 10^3}{10^4}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{3084,25 \cdot 2,05}{10^3}\right)^2 = 965,42 \text{ Kg/cm}^3$$

d'où

$$P_{surf.z_2} = 2 \cdot 3 \cdot 24,6 \cdot \frac{1,634 - 0,15}{1,634} \cdot 38,5 \cdot 965,42 \cdot 10^{-7}$$

$$P_{surf.z_2} = 498,247 \cdot 10^3 \text{ KW}$$

De même, la présence d'encoches au stator et au rotor fait que l'induction dans les dents varie avec la position relative de celles-ci.

Les oscillations du flux dans les dents consécutives à ce phénomène causent des pertes supplémentaires dites de pulsations.

Ces pertes de pulsations sont calculées pour chaque partie :

- Pour le stator :

$$P_{puls.z_1} = 0,14 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n_2}{10^4} \cdot \frac{B_{puls.z_1}}{10^3}\right)^2 \cdot G_{z_1} \cdot 10^{-3} \text{ [KW]}$$

avec :

$$B_{puls.z_1} = \frac{\gamma_r \cdot \delta}{2t_1} \cdot B_{z_1, moy}$$

$$\gamma_r = \left(\frac{b_{r2}}{\delta}\right)^2 \cdot \frac{1}{5 + b_{r2}/\delta} = \left(\frac{1,5}{1}\right)^2 \cdot \frac{1}{5 + 1,5} = 0,346$$

donc : $B_{puls_{z_1}} = \frac{0,346 \cdot 1}{2 \cdot 2,05} \cdot 14781,5 = 124,74 \text{ Gauss}$

d'où : $P_{puls_{z_1}} = 0,14 \cdot \left(\frac{90 \cdot 10^3}{10^4} \cdot \frac{124,74}{10^3} \right)^2 \cdot 87,7 \cdot 10^{-3} = 15,47 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$

— Pour le rotor :

$$P_{puls_{z_2}} = 0,14 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10^4} \cdot \frac{B_{puls_{z_2}}}{10^3} \right)^2 \cdot G_{z_2} \cdot 10^{-3} \text{ [KW]}$$

$$B_{puls_{z_2}} = \frac{\gamma_{anc_1} \cdot \delta}{2 t_2} \cdot B_{z_2 \text{ moy}}$$

$$\gamma_{anc_1} = \left(\frac{b_{anc_1}}{\delta} \right)^2 \cdot \frac{1}{5 + b_{anc_1}/\delta} = (5,6)^2 \cdot \frac{1}{5 + 5,6} = 2,958$$

donc : $B_{puls_{z_2}} = \frac{2,958 \cdot 1}{2 \cdot 16,34} \cdot 17887 = 1619 \text{ Gauss}$

$G_{z_2} = V_{z_2} \cdot \gamma$: Poids des dents du rotor

avec : $V_{z_2} = S_{z_2} \cdot l_2 = \left[\frac{\pi}{4} \left[D_2^2 - (D_2 - 2h_{z_2})^2 \right] - Z_2 \cdot Q_{anc_2} \right] \cdot l_2$

$$= \left[\frac{\pi}{4} \left[(46,8)^2 - (46,8 - 2 \cdot 3,2)^2 \right] - 90 \cdot 2,277 \right] \cdot 38,5 = 8985,13 \text{ cm}^3$$

$$G_{z_2} = 8985,13 \cdot 7,65 = 68736,24 \text{ g}$$

$$G_{z_2} = 68,736 \text{ Kg}$$

d'où : $P_{puls_{z_2}} = 0,14 \cdot \left(\frac{72 \cdot 10^3}{10^4} \cdot \frac{1619}{10^3} \right)^2 \cdot 68,736 \cdot 10^{-3} = 1307,58 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$

La somme des pertes supplémentaires à vide :

$$P_{\text{suppl}} = P_{\text{surf}_{z_1}} + P_{\text{surf}_{z_2}} + P_{puls_{z_1}} + P_{puls_{z_2}} = 303,466 + 498,247 + 15,47 + 1307,58$$

$$P_{\text{suppl}} = 2124,763 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

Les pertes totales en acier à vide :

$$P_{\text{ac}} = P_{\text{ac}_1} + P_{\text{suppl}} = 1261,94 + 2124,763$$

$$P_{\text{ac}} = 3386,7 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

— Pertes mécaniques :

Pour la ventilation radiale avec canaux de refroidissement

ces pertes sont données par la relation:

$$P_{mec} = 1,2 \cdot 2p \cdot \left(\frac{\sigma}{10}\right)^3 \cdot (n+1) \cdot 10^{-3} \quad [KW]$$

$$P_{mec} = 1,2 \cdot 6 \cdot \left(\frac{24,6}{10}\right)^3 \cdot (5+1) \cdot 10^{-3} = 1715 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

d'où les pertes totales à vide:

$$P_0 = P_{ac} + P_{mec} = (3386,7 + 1715) \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

$$P_0 = 5101,7 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

3.1.2 Pertes en charge:

Ce sont les pertes joules normales dans les enroulements du stator et du rotor et les pertes cuivre supplémentaires à vide

- Pertes dans l'enroulement du stator:

$$P_{Cu1} = m_1 \cdot I_{1N}^2 \cdot r_{1(75^\circ C)} \cdot 10^{-3} \quad [KW]$$

$$= 3 \cdot (267)^2 \cdot 0,024 \cdot 10^{-3} = 5132,8 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

- Pertes dans l'enroulement du rotor:

$$P_{Cu2} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_{2a(75^\circ C)} \cdot 10^{-3}$$

$$= 3 \cdot (320)^2 \cdot 0,0177 \cdot 10^{-3} = 5437,44 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

- Pertes cuivre supplémentaires:

Elles sont liées au flux de fuite qui engendre les courants de Foucault dans le bâti de la machine. Elles sont estimées par la relation:

$$P'_{suppl} = 0,005 \cdot P'_N = 0,005 \cdot 293,6$$

$$P'_{suppl} = 1468 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

d'où les pertes totales en charge:

$$P_{ch} = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P'_{suppl} = (5132,8 + 5437,44 + 1468) \cdot 10^{-3}$$

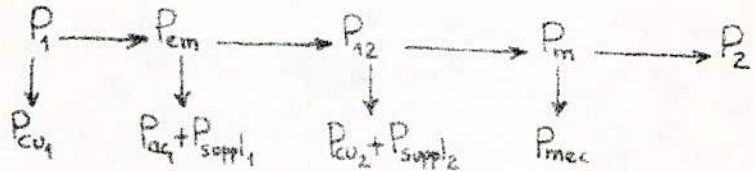
$$P_{ch} = 12038,24 \cdot 10^{-3} \text{ KW}$$

3.1.3 Pertes totales de la machine :

$$\Sigma P = P_0 + P_{ch} = (5101,7 + 12038,24) \cdot 10^{-3} \text{ kW}$$

$$\Sigma P = 17140 \cdot 10^{-3} \text{ kW}$$

Bilan énergétique :



3.2 Rendement de la machine :

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = \frac{P_2}{P_1}$$

ou bien: $\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P} = 1 - \frac{17140}{250 + 17140}$

$$\eta = 0,9358$$

$$\eta = 93,58\%$$

Cette valeur étant légèrement supérieure à celle prise au départ, ceci signifie que les pertes ont été atténuées.

CHAPITRE IV

Caractéristiques de Travail

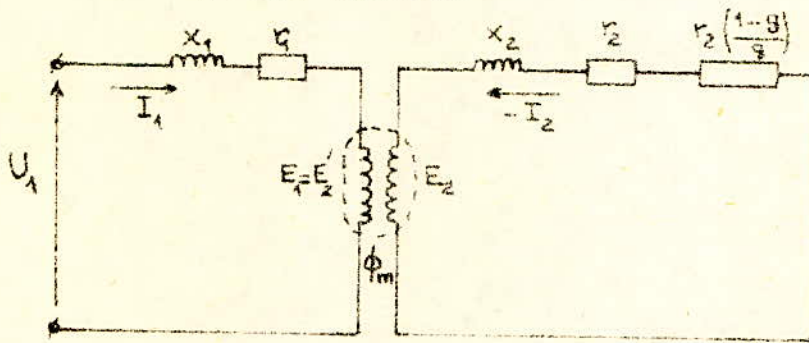
Les caractéristiques de travail d'un moteur asynchrone sont données par le diagramme du cercle ou par la méthode analytique.

On fera l'étude de ces caractéristiques par la méthode du diagramme du cercle.

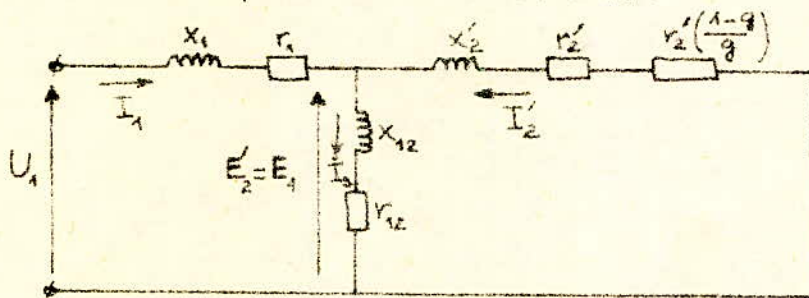
4.1 Diagramme du cercle :

Ce diagramme est construit à partir du schéma équivalent en "Π" ou en "T" du moteur asynchrone à rotor bobiné.

Ces schémas sont obtenus à partir du schéma physique équivalent ramené au rotor immobile :



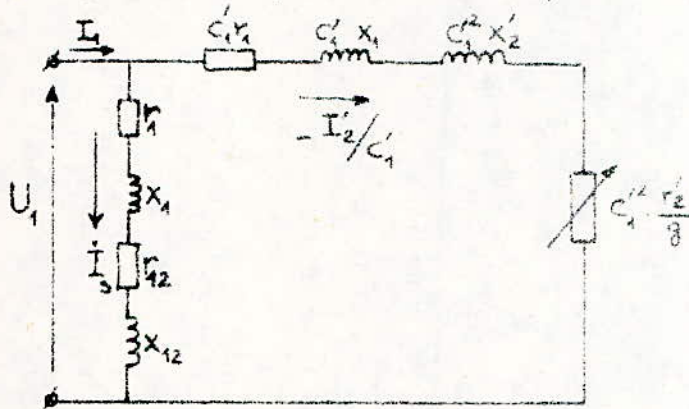
En ramenant toutes les grandeurs du circuit secondaire au circuit primaire et en considérant la machine asynchrone comme un transformateur on obtient le schéma équivalent en "T" suivant :



Le circuit magnétique a à ses bornes la même tension $E_1 = E_2'$; il comporte la résistance mutuelle r_{12} et la réactance d'induction mutuelle X_{12} . Le schéma équivalent en "T" n'est pas commode pour l'étude des processus ayant lieu lors du travail du moteur asynchrone parce que

lorsque la charge diminue, la tension aux bornes reste généralement constante et le flux d'induction mutuelle et la f.e.m. correspondante aux bornes du circuit magnétisant, lors de la variation de la charge sous l'influence de la chute de tension " $I_1 Z_1$ " dans le circuit primaire, varient également.

Le schéma équivalent en " Γ ", dans lequel le circuit magnétisant est rapporté aux bornes primaires et dans lequel le courant, pour toutes les variations de la charge et les variations du glissement g , reste constant et égal au courant de marche à vide idéale au synchronisme \dot{I}_s pour $g=0$, est plus commode pour l'étude du moteur asynchrone:



où $C_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_{re}}$ facteur de correction

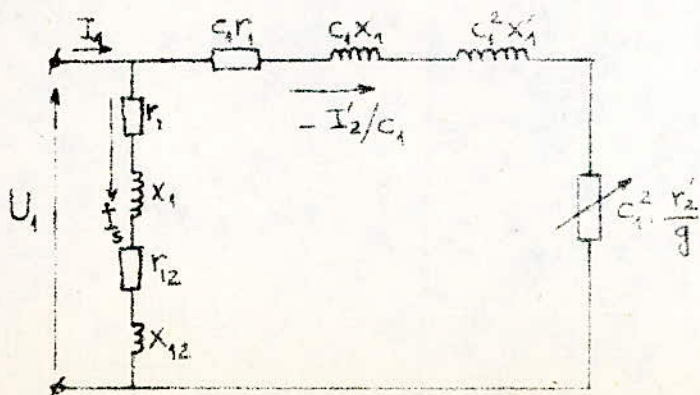
$$Z_1 = r_1 + jX_1$$

$$Z_{12} = r_{12} + jX_{12}$$

$$r_{12} = \frac{P_{sc1} \cdot 10^3}{m_1 \cdot I_{1s}^2} = \frac{1261,94}{3 \cdot (68,66)^2}$$

$$r_{12} = 0,095 \Omega$$

Pour avoir des résultats suffisamment précis pour le calcul des courants des puissances et des autres données d'une machine asynchrone, on utilise le schéma équivalent en " Γ " corrigé:



où $C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_{12}} = 1 + \frac{0,114}{5,42}$

$$C_1 = 1,021$$

- Paramètres de court-circuit :

$$r'_{cc} = c_1 r_1 + c_1^2 r_2' = 1,021 \cdot 0,024 + (1,021)^2 \cdot 0,0332 = 0,059 \Omega$$

$$X'_{cc} = c_1 X_1 + c_1^2 X_2' = 1,021 \cdot 0,114 + (1,021)^2 \cdot 0,10 = 0,22 \Omega$$

$$Z_{cc} = \sqrt{r_{cc}'^2 + X_{cc}'^2} = \sqrt{(0,059)^2 + (0,22)^2} = 0,2278 \Omega$$

$$I_{cc} = \frac{U}{Z_{cc}} = \frac{380}{0,2278} = 1668,32 \text{ A}$$

4.1.1 La construction du diagramme du cercle est réalisable à partir des résultats suivants :

- Courant à vide : C'est le courant \dot{I}_s qui correspond à la vitesse de synchronisme ($g=0$)

$$I_s = \frac{U_s}{\sqrt{(r_1 + r_{12})^2 + (X_1 + X_{12})^2}} = \frac{380}{\sqrt{(0,024 + 0,09)^2 + (0,114 + 5,42)^2}}$$

$$I_s = 68,65 \text{ A}$$

- Déphasage pour $g=0$:

$$\cos \varphi_s = \frac{r_1 + r_{12}}{\sqrt{(r_1 + r_{12})^2 + (X_1 + X_{12})^2}} = \frac{0,024 + 0,09}{5,535} = 0,0206$$

$$\varphi_s = 88,82^\circ$$

- L'angle de rotation de la ligne du centre du diagramme :

$$\sin 2\gamma_1 = 2 \frac{\dot{I}_s \cdot r_1}{U_1} = \frac{2 \cdot 68,65 \cdot 0,024}{380} = 0,086$$

$$2\gamma_1 = 0,49^\circ$$

- L'angle d'inclinaison de la droite : $P_{em} = 0; \Gamma = 0$

$$\text{tg } \alpha_1 = \frac{c_1 r_1}{X'_{cc}} = \frac{1,021 \cdot 0,024}{0,22} = 0,111$$

$$\alpha_1 = 6,35^\circ$$

- L'angle d'inclinaison de la droite des puissances utiles : $P_2 = 0$

$$\text{tg } \alpha_2 = \frac{r'_{cc}}{X'_{cc}} = \frac{0,059}{0,22} = 0,268 \rightarrow \alpha_2 = 15^\circ$$

- Le diamètre du cercle des courants:

$$D_{cc} = \frac{U_1}{X'_{cc}} = \frac{380}{0,22} = 1727,27 \text{ A}$$

On choisit comme diamètre : $\overline{AD} = 350 \text{ mm}$

L'échelle des courants sera:

$$C_I = \frac{D_{cc}}{AD} = \frac{1727,27}{350} = 4,935 \text{ A/mm}$$

- Echelle des puissances:

$$C_p = 3 \cdot U_1 \cdot C_I \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 380 \cdot 4,935 \cdot 10^{-3}$$

$$C_p = 5,626 \text{ kW/mm}$$

- Echelle des couples:

$$C_r = \frac{975}{n_1} \cdot C_p = \frac{975}{10^3} \cdot 5,626$$

$$C_r = 5,485 \text{ Kg.m/mm}$$

- Construction du diagramme du cercle:

Le tracé du diagramme se fait de la façon suivante:

- On porte I_s [mm] de telle façon qu'il fasse un angle φ_s avec la verticale:

$$I_s \text{ [mm]} = \overline{OA} = \frac{I_s}{C_I} = \frac{68,65}{4,935} = 13,9 \text{ mm}$$

- De A, on trace une droite horizontale AB

- De B, on élève une perpendiculaire telle que:

$$BR = \frac{AD}{2} \cdot \sin 2\alpha_1 = \frac{350}{2} \cdot 0,0086 = 1,5 \text{ mm}$$

On obtient le cercle de rayon:

$$AR = \frac{AD}{2} = 175 \text{ mm}$$

- De R, on élève une perpendiculaire à AD et on porte les points

F_1 et F_2 tels que:

$$RF_1 = \frac{AD}{2} \cdot \text{tg } \alpha_1 = 175 \cdot 0,111 = 19,42 \text{ mm}$$

$$RF_2 = \frac{AD}{2} \cdot \tan \alpha_2 = 175 \cdot 0,268 = 46,9 \text{ mm}$$

On obtient les droites AT et AK qui représentent les droites correspondantes à $g = \infty$ ($P_{em} = 0; \Gamma = 0$) et à $g = 1$ ($P_2 = 0$).

Pour les échelles du glissement et du rendement, voir le diagramme du cercle.

4.1.2 Détermination des points du régime nominal

On choisit sur AF_2 un point P quelconque, on abaisse la perpendiculaire à AD de ce point et on porte le segment PP_1 :

$$PP_1 = \frac{P_N + P_{mec} + P_{puls} + P_{surf} + P_{suppl}}{C_p} = \frac{256}{5,626} = 45,5 \text{ mm}$$

On trace la parallèle à AF_2 passant par P_1 , elle coupe le cercle en N. On obtient les valeurs suivantes :

- Courant nominal :

$$I_{1N} = ON \cdot C_I = 53,4935 = 261,55 \text{ A}$$

- Courant réduit du rotor :

$$I'_{2N} = AN \cdot C_I = 48,84935 = 240,83 \text{ A}$$

- Facteur de puissance :

$$\cos \varphi_{1N} = \frac{ON_1}{100} = \frac{92,5}{100} = 0,925$$

- Puissance nominale absorbée :

$$P_{1N} = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1N} \cdot \cos \varphi_{1N} = 3 \cdot 380 \cdot 261,55 \cdot 0,925$$

$$P_{1N} = 275,8 \text{ KW}$$

ou bien :

$$P_{1N} = NM \cdot C_p = 49 \cdot 5,626 = 275,7 \text{ KW}$$

- Rendement nominal :

$$\eta_{1N} = 1 - \frac{19,5}{390} = 0,95$$

- Puissance nominale utile :

$$P_{2N} = NQ \cdot C_p = 46,5 \cdot 5,626 = 261,61 \text{ KW}$$

- Puissance électromagnétique nominale :

$$P_{emN} = NP \cdot C_p = 48 \cdot 5,626 = 270,048 \text{ KW}$$

ou bien $P_{emN} = P_{IN} - P_{cu} - P_{ac}$

avec: $P_{cu} = 1.5,626 = 5,626 \text{ kW}$

$P_{ac} = 0,5 \cdot 5,626 = 2,8 \text{ kW}$

$P_{emN} = 275,8 - 5,626 - 2,8 = 267,374 \text{ kW}$

- Glissement nominal :

$g_N = 0,021$ (lu sur l'échelle des glissements)

- Capacité de surcharge :

$\lambda_{MAX} = \frac{\Gamma_{MAX}}{\Gamma_N} = \frac{\overline{N_m N'_m}}{NP} = \frac{157}{48} = 3,27$

- Rapports de démarrage :

$\lambda_d = \frac{\Gamma_d}{\Gamma_N} = \frac{\overline{KK_1}}{NP} = \frac{51,5}{48} = 1,073$

$\frac{I_d}{I_N} = \frac{\overline{OK}}{\overline{ON}} = \frac{351,5}{53} = 6,63$

- Couples : $\Gamma_N = \overline{NP} \cdot C_T = 263,23 \text{ Kg.m} = 2579 \text{ N.m}$

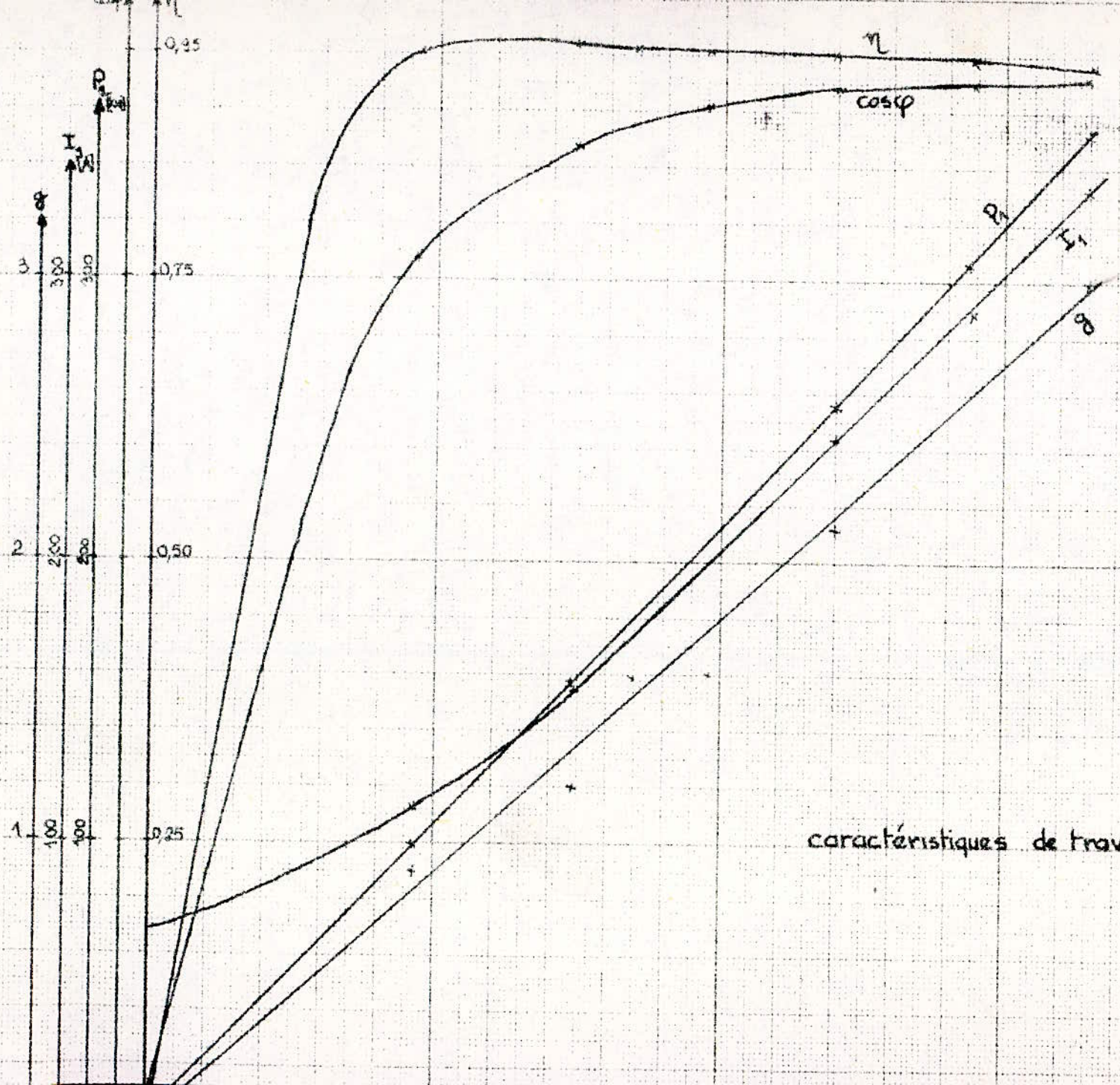
$\Gamma_{MAX} = \overline{N_m N'_m} \cdot C_T = 861,145 \text{ Kg.m} = 8435,34 \text{ N.m}$

$\Gamma_d = \overline{KK_1} \cdot C_T = 282,47 \text{ Kg.m} = 2767 \text{ N.m}$

4.2 Caractéristiques de travail

Pour la détermination de ces caractéristiques on prend 5 à 6 points dans l'intervalle : $[I_0; 1,5 I_N]$ et on relève directement du diagramme du cercle les différentes valeurs des paramètres : $I_1, P_1, \eta, \cos \varphi, g$ et P_2 . On trace ensuite les courbes $[I_1, P_1, \eta, \cos \varphi, g] = f(P_2)$ à partir des valeurs du tableau suivant :

I_1 [A]	68,16	112,5	156,5	200,5	244,5	288,5	332,5
P_1 [kW]	2,8	98,45	154,7	205,35	256	306,6	351,6
η	0	0,955	0,959	0,956	0,952	0,946	0,941
$\cos \varphi$	0,0204	0,77	0,87	0,905	0,92	0,925	0,93
g	0	0,9	1,2	1,6	2,12	2,43	3,03
P_2 [kW]	0	92,83	149,1	196,9	241,9	289,7	331,9



caractéristiques de travail

CHAPITRE V

Calcul Thermique

5.1 Calcul de l'échauffement

Le calcul des échauffements est une des parties délicates du calcul général des machines. Il présente des difficultés considérables car l'ensemble d'une machine électrique est loin de constituer un corps homogène. Le fer, le cuivre, les isolants et l'air en sont des éléments constitutifs distribués inégalement et possédant des coefficients de conductibilité thermique fort différents.

De plus, les vitesses de l'air dans les diverses parties de la machine sont difficiles à déterminer avec précision ; on arrive cependant à calculer assez correctement les échauffements des différentes parties de la machine moyennant certaines hypothèses simplificatrices consacrées par l'expérience.

La température Θ dans une partie donnée d'une machine dépend non seulement des pertes qui s'y produisent mais de la température Θ_0 de l'agent refroidisseur utilisé pour le refroidissement de la machine.

La différence : $\Theta - \Theta_0 = \Delta\Theta$ est la surélévation de température de la partie donnée de la machine par rapport à l'agent refroidisseur.

Pour assurer aux machines une durée de service nécessaire, il est prévu une température standard de l'agent refroidisseur et des surélévations de température limites admissibles Θ_{lim} .

On considère l'air comme agent refroidisseur principal et qu'il admet une température limite admissible de 35°C .

Les surélévations de température limites Θ_{lim} prévues pour les différentes parties de la machine, isolées avec des isolants de la classe B et non isolées, sont les suivantes :

- Enroulement stator : $\Theta_{lim} = 85^\circ\text{C}$

- Enroulement rotor : $\theta_{lim} = 95^\circ$

- Noyaux et autres pièces en contact ou non avec les enroulements

$$\theta_{lim} = 85^\circ$$

- Bagues collectrices : $\theta_{lim} = 90^\circ$

En pratique, le calcul des échauffements de la machine à version protégée se fait de la façon suivante :

5.1.1 Chute de température dans l'isolant de l'enroulement :

a/ STATOR :

$$\Delta\theta_{isol_1} = W_{enc_1} \cdot \left(\frac{\delta_{isol_1}}{\lambda} \right)$$

avec :

λ : conductibilité thermique de l'isolant utilisé ; pour le micafolium $\lambda = 0,16 \cdot 10^{-2} [W/mK]$

W_{enc_1} : flux de chaleur spécifique par cm^2 d'encoche

$$W_{enc_1} = \frac{A_1 \cdot d_1 \cdot t_1}{100 \cdot P_1 \cdot \gamma_1}$$

P_1 : périmètre de l'encoche du stator

$$P_1 = 8,72 \text{ cm}$$

γ_1 : conductibilité spécifique ; pour la classe B :

$$\gamma_{75^\circ} = 46 [m/\Omega \cdot mm^2]$$

$$W_{enc_1} = \frac{434,14 \cdot 2,05 \cdot 5,1}{100 \cdot 8,72 \cdot 46} = 11,315 \text{ W/cm}^2$$

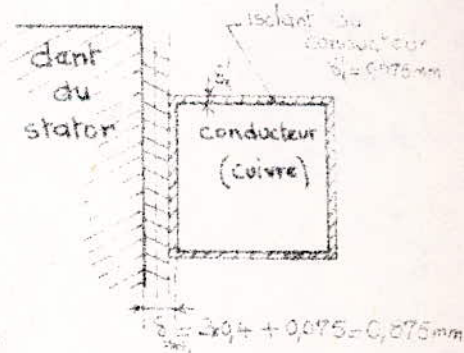
donc :
$$\Delta\theta_{isol_1} = 11,315 \cdot \frac{0,0875}{0,16} = (5,18)^\circ C$$

b/ ROTOR :

$$\Delta\theta_{isol_2} = W_{enc_2} \left(\frac{\delta_{isol_2}}{\lambda} \right)$$

On a la même nature de l'isolant, donc les mêmes conductibilités λ et γ

$\delta_{isol_2} = 3 \cdot 0,4 = 1,2 \text{ mm}$: trois feuilles isolantes de micafolium (la barre, ou conducteur du rotor n'est pas isolée).



$$W_{enc_2} = \frac{A_2 \cdot j_2 \cdot l_2}{100 \cdot P_2 \cdot \gamma} = \frac{386,25 \cdot 5,49 \cdot 1,634}{100 \cdot 7,5 \cdot 46} = 10 \text{ W/cm}^2$$

donc: $\Delta\theta_{isol_2} = 10 \cdot \frac{0,12}{0,16} = 7,5 \text{ }^\circ\text{C}$

d'où: $\Delta\theta_{isol} = \Delta\theta_{isol_1} + \Delta\theta_{isol_2} = 7,5 + 6,18 = 13,68 \text{ }^\circ\text{C}$

5.1.2. surélévation de température des surfaces:

a/ Surface interne du stator

$$\Delta\theta_{surf_1} = \frac{W_{surf_1}}{\alpha_v}$$

où:

α_v : facteur de transfert de chaleur de la surface soufflée

$$\alpha_v = 6,6 \cdot 10^{-3} (1 + 0,1 v)$$

v : vitesse linéaire périphérique du rotor

$$v = \omega \cdot R_2 = 2\pi \cdot f \cdot \frac{D_2}{2} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot \frac{46,8}{2} = 73,476 \text{ m/s}$$

donc: $\alpha_v = 6,6 \cdot 10^{-3} (1 + 0,1 \cdot 73,476) = 55,1 \cdot 10^{-3} \text{ [W/cm}^2\text{, }^\circ\text{C]}$

W_{surf_1} : flux de chaleur spécifique de la surface intérieure du stator

$$W_{surf_1} = \frac{P_{ac1} + 0,5 \cdot P_{suppl}}{\pi \cdot D_1 \cdot l_s} + \frac{A_1 \cdot j_1}{100 \cdot \gamma} = \frac{1261,94 + 0,5 \cdot 2124,763}{\pi \cdot 47,33} + \frac{434,14 \cdot 5,1}{100 \cdot 46}$$

$$W_{surf_1} = 0,958 \text{ W/cm}^2$$

et $\Delta\theta_{surf_1} = \frac{0,958}{55,1 \cdot 10^{-3}} = 17,38 \text{ }^\circ\text{C}$

b/ surface externe du rotor:

$$\Delta\theta_{surf_2} = \frac{W_{surf_2}}{\alpha_v}$$

où: $W_{surf_2} = \frac{P_{ac1} + 0,5 \cdot P_{suppl}}{\pi \cdot D_2 \cdot l_s} + \frac{A_2 \cdot j_2}{100 \cdot \gamma} = 0,94$

$$\Delta\theta_{surf_2} = \frac{0,94}{55,1 \cdot 10^{-3}} = 17,06 \text{ }^\circ\text{C}$$

On remarque qu'on a la même température dans l'entrefer: $\Delta\theta_{surf_1} = \Delta\theta_{surf_2} = 17,38 \text{ }^\circ\text{C}$

5.1.3 Surélévation de température dans les parties frontales :

a/ STATOR :

$$\Delta\theta_{pf_1} = \frac{W_{pf_1}}{1,33 \cdot 10^{-3} (1 + 0,05 \nu)}$$

$W_{pf_1} = W_{enc_1} = 11,315 \text{ W/cm}^2$: flux de chaleur par cm^2 de partie frontale

$$\Delta\theta_{pf_1} = \frac{11,315 \cdot 10^{-2}}{1,33 \cdot 10^{-3} (1 + 0,05 \cdot 73,476)} = 18,20^\circ\text{C}$$

b/ ROTOR :

$$\Delta\theta_{pf_2} = \frac{W_{pf_2}}{1,33 \cdot 10^{-3} (1 + 0,05 \nu)}$$

$$W_{pf_2} = W_{enc_2} = 10 \text{ W/cm}^2$$

$$\Delta\theta_{pf_2} = \frac{10 \cdot 10^{-2}}{1,33 \cdot 10^{-3} (1 + 0,05 \cdot 73,476)} = 16,08^\circ\text{C}$$

5.1.4 Surélévation moyenne de température des enroulements :

a/ STATOR :

$$\begin{aligned} \Delta\theta_1 &= \frac{(\Delta\theta_{isol_1} + \Delta\theta_{surf_1}) \cdot l_1 + (\Delta\theta_{isol_1} + \Delta\theta_{pf_1}) \cdot l_{fr_1}}{l_1 + l_{fr_1}} \\ &= \frac{(6,18 + 17,38) \cdot 38 + (6,18 + 18,20) \cdot 37}{38 + 37} = 23,96^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\Delta\theta_1 = 24^\circ\text{C}$$

b/ ROTOR :

$$\begin{aligned} \Delta\theta_2 &= \frac{(\Delta\theta_{isol_2} + \Delta\theta_{surf_2}) \cdot l_2 + (\Delta\theta_{isol_2} + \Delta\theta_{pf_2}) \cdot l_{fr_2}}{l_2 + l_{fr_2}} \\ &= \frac{(7,5 + 17,06) \cdot 38,5 + (7,5 + 16,08) \cdot 41,1}{38,5 + 41,1} = 24,05^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\Delta\theta_2 = 24^\circ\text{C}$$

Ces valeurs sont inférieures aux températures admissibles, donc elles sont convenables.

5.2 Calcul de la ventilation

Il permet le dimensionnement du ventilateur afin d'assurer un débit d'air suffisant pour le refroidissement de la machine et le calcul de la résistance aérodynamique des différentes parties de la machine où l'air est ventilé.

Le type de ventilateur s'adaptant le mieux pour les moteurs asynchrones à rotor bobiné est le ventilateur centrifuge qui nous impose l'auto-ventilation externe.

Le débit d'air nécessaire à l'évacuation de la chaleur due aux différentes pertes de la machine est donné par la formule :

$$Q_{nec} = \frac{\Sigma P}{c \cdot \Delta \theta}$$

où c : chaleur spécifique de l'air $c = 1100 \text{ J/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\Delta \theta$: différence de température entre l'air froid et l'air chaud.

Cette différence de température est fixée, pour les classes A, E, B, à 20°C , toutefois on peut prendre comme valeur de $\Delta \theta$, la température correspondante à la surélévation de température dans les enroulements :

$$\Delta \theta = 24^\circ\text{C}$$

ΣP : pertes globales de la machine, à l'exception des pertes des paliers, qui doivent être évacuées par l'air de ventilation.

$$\Sigma P = 17140 \text{ W}$$

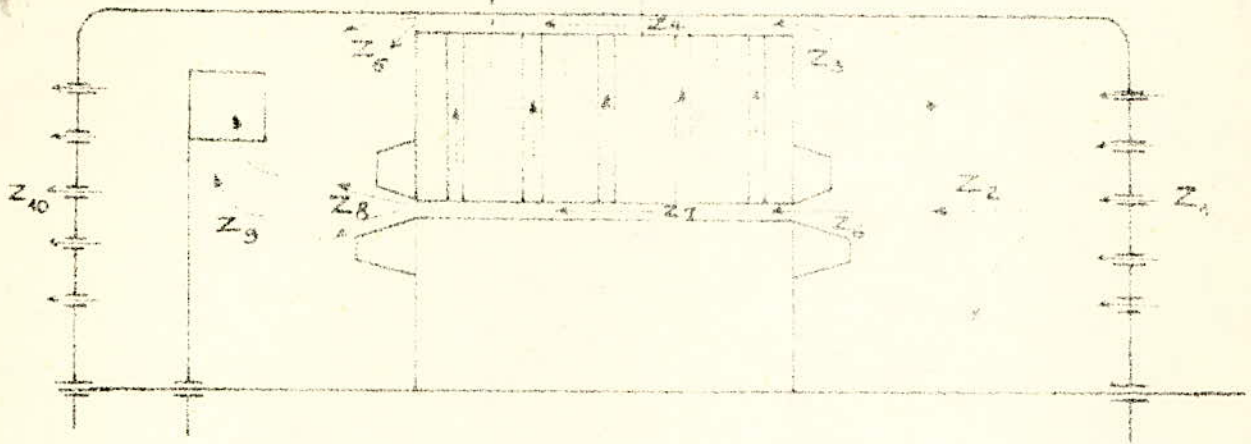
donc :
$$Q_{nec} = \frac{17140}{1100 \cdot 24} = 0,65 \text{ m}^3/\text{s}$$

La ventilateur doit nous donner un débit d'air supérieur au débit d'air nécessaire Q_{nec} . Pour le dimensionner, il est nécessaire de connaître les formes de toutes les parties se trouvant dans le circuit de l'air afin

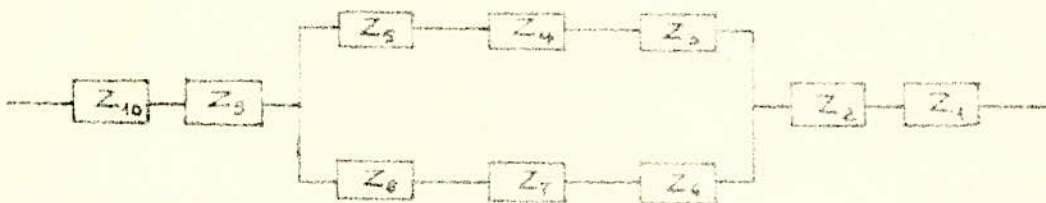
de calculer leurs résistances aérodynamiques

Ces formes aérodynamiques sont pratiquement complexes du point de vue géométrie mais on peut les approximer à des formes standards.

Le schéma de parcours de l'air est le suivant



Le schéma équivalent en résistances aérodynamiques est:



5.2.1 Calcul des résistances aérodynamiques.

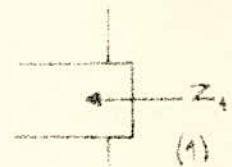
a/ Résistance d'entrée de l'air à travers les orifices du couvercle:

$$Z_1 = \frac{\xi_1}{S_1^2} \quad [\text{kg s}^2/\text{m}^5]$$

ξ_1 : facteur dépendant de la forme de l'entrée qui est schématisé par le profil (1) suivant:

S_1 : section de trou d'entrée de l'air

$$\xi_1 = 61 \cdot 10^{-3}$$



(1)

On choisit 400 orifices pour l'entrée de l'air et le diamètre de chacun est

de 1,5 cm ; donc: $S_1 = 400 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1,5)^2 = 706,8 \text{ cm}^2$

et

$$Z_1 = \frac{61 \cdot 10^{-3}}{(706,8)^2 \cdot 10^{-8}} = 12,2 \text{ kg s}^2/\text{m}^5$$

b/ Résistance d'expansion de l'air dans la machine :

$$Z_2 = \frac{\rho_2}{S_2^2}$$

avec : $\rho_2 = \rho_{10} \left(1 - \frac{S_{MIN}}{S_{MAX}} \right) = 61 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{706,8}{3141,6} \right) = 36,34 \cdot 10^{-3}$

$$\rho_{10} = \rho_{11} = 61 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{MIN} = S_1 = 706,8 \text{ cm}^2$$

$$S_{MAX} = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - D_{bg}^2) = \frac{\pi}{4} (70^2 - 30^2) = 3141,6 \text{ cm}^2$$

avec D_c : diamètre du couvercle, on le choisit égal à 70 cm

D_{bg} : diamètre des bagues

$S_2 = S_{MAX}$: section entre les bagues et le couvercle.

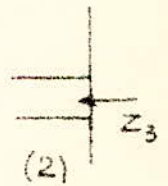
d'où : $Z_2 = \frac{36,34 \cdot 10^{-3}}{(3141,6)^2 \cdot 10^{-8}} = 0,37 \text{ kgf.s/m}^2$

c/ Résistance d'entrée de l'air entre le stator et le couvercle :

$$Z_3 = \frac{\rho_3}{S_4^2}$$

$\rho_3 = 30 \cdot 10^{-3}$: correspond au profil (2)

$$S_4 = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - D_{ext1}^2) = \frac{\pi}{4} (70^2 - 66^2) = 427,25 \text{ cm}^2$$



d'où : $Z_3 = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{(427,25)^2 \cdot 10^{-8}} = 16,43 \text{ kgf.s/m}^2$

d/ Résistance de frottement entre couvercle et stator :

$$Z_4 = \frac{\rho_4}{S_4^2}$$

$$\rho_4 = 61 \cdot 10^{-3} \frac{\lambda \cdot \ell_1}{d_{eq}}$$

où : $\lambda = 0,08$ pour les canaux axiaux

ℓ_1 : longueur du stator

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4 S_4}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 427,25}{\pi}} = 23,32 \text{ cm}$$

$$\rho_4 = 61 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08 \cdot 38 \cdot \pi \cdot 10^{-3}$$

d'où
$$Z_4 = \frac{7,95 \cdot 10^{-3}}{(427,25)^2 \cdot 10^{-8}} = 4,35 \text{ kgf.s/m}^5$$

e/ Résistance d'expansion à la sortie du canal entre stator et couvercle:

$$Z_5 = \frac{\xi_5}{S_5^2}$$

$$\xi_5 = 61 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{S_4}{S_5}\right)$$

S_5 : section sur l'arbre du ventilateur, l'arbre normalisé a une section de 12 cm de diamètre (D_V)

$$S_5 = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - D_V^2) = \frac{\pi}{4} (70^2 - 12^2) = 3735,35 \text{ cm}^2$$

donc:
$$\xi_5 = 61 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{427,25}{3735,35}\right) = 54 \cdot 10^{-3}$$

et:
$$Z_5 = \frac{54 \cdot 10^{-3}}{(427,25)^2 \cdot 10^{-8}} = 29,58 \text{ kgf.s/m}^5$$

f/ Résistance d'entrée de l'air dans l'entrefer:

$$Z_6 = \frac{\xi_6}{S_6^2}$$

$$S_6 = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) = \frac{\pi}{4} (47^2 - 46,8^2) = 14,73 \text{ cm}^2$$

$$Z_6 = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{(14,73)^2 \cdot 10^{-8}} = 13826,6 \text{ kgf.s/m}^5$$

g/ Résistance de frottement dans l'entrefer:

$$Z_7 = \frac{\xi_7}{S_6^2}$$

$$\xi_7 = 61 \cdot 10^{-3} \frac{\lambda \cdot L_1}{d'_{eq}} \quad \text{où: } d'_{eq} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_6}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 14,73}{\pi}} = 4,33 \text{ cm}$$

$$\xi_7 = 42,82 \cdot 10^{-3}$$

et:
$$Z_7 = \frac{42,82 \cdot 10^{-3}}{(14,73)^2 \cdot 10^{-8}} = 19504,73 \text{ kgf.s/m}^5$$

h/ Résistance d'expansion à la sortie de l'entrefer:

$$Z_8 = \frac{\rho_8}{S_6^2}$$

$$\rho_8 = 61.10^{-3} \left(1 - \frac{S_6}{S_5}\right) = 61.10^{-3} \left(1 - \frac{14,73}{3735,35}\right) = 60,75 \cdot 10^{-3}$$

$$Z_8 = \frac{60,75 \cdot 10^{-3}}{(14,73)^2 \cdot 10^{-8}} = 27998,88 \text{ Kgf.s/m}^5$$

i/ Résistance de décompression:

$$Z_9 = \frac{\rho_9}{S_9^2}$$

S_9 : section des trous de sortie qui sont identiques aux trous d'entrée

$$S_9 = S_1 = 706,8 \text{ cm}^2$$

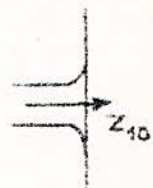
$$Z_9 = Z_1 = 12,2 \text{ Kgf.s/m}^5$$

j/ Résistance de sortie de l'air:

$$Z_{10} = \frac{\rho_{10}}{S_1^2}$$

$$\rho_{10} = 12,5 \cdot 10^{-3} : \text{correspond au profil (3)}$$

$$Z_{10} = \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{(706,8)^2 \cdot 10^{-8}} = 2,5 \text{ Kgf.s/m}^5$$



k/ Résistance globale:

$$Z_{11} = Z_3 + Z_4 + Z_5 = 16,43 + 4,35 + 29,58 = 50,36 \text{ Kgf.s/m}^5$$

$$Z_{12} = Z_6 + Z_7 + Z_8 = 13826,6 + 19504,73 + 27998,88 = 61330,21 \text{ Kgf.s/m}^5$$

$$Z_{13} = \frac{Z_{11} \cdot Z_{12}}{(\sqrt{Z_{11}} + \sqrt{Z_{12}})^2} = \frac{50,36 \cdot 61330,21}{(\sqrt{50,36} + \sqrt{61330,21})^2} = 47,59 \text{ Kgf.s/m}^5$$

$$\text{d'où: } Z = Z_1 + Z_2 + Z_{13} + Z_9 + Z_{10} = 74,853 \text{ Kgf.s/m}^5$$



52.2 Dimensionnement du ventilateur :

- Diamètre extérieur : Il est donné par la relation

$$D_{V2} = (1,4 \div 1,5) D_2$$

on prend : $D_{V2} = 1,4 D_2 = 1,4 \cdot 46,8 = 65,52 \text{ cm}$

- Diamètre interne :

$$D_{V1} \text{ est tel que : } D_{V2} = (1,2 \div 1,5) D_{V1}$$

on prend : $D_{V1} = \frac{D_{V2}}{1,5} = 43,68 \text{ cm}$

- largeur de la palette :

$$b = (12 \div 15) \% D_{V2}$$

on prend : $b = \frac{15}{100} \cdot 65,52 = 9,83 \text{ cm}$

- Nombre de palettes : Il doit être un nombre premier

$$N_p = (6 \div 10) \frac{D_{V2}}{D_{V2} - D_{V1}}$$

$$N_p = 9 \cdot \frac{65,52}{65,52 - 43,68} = 27$$

on prend $N_p = 29$ palettes.

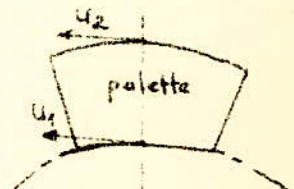
- section balayée par les palettes :

$$S = 0,92 \cdot \pi \cdot b \cdot D_{V2} = 0,92 \cdot \pi \cdot 9,83 \cdot 65,52 = 1861,5 \text{ cm}^2$$

- Vitesse linéaire sur l'extérieur des palettes :

$$u_2 = \frac{\pi \cdot D_{V2} \cdot N_N}{6000} = \frac{\pi \cdot 65,52 \cdot 1000}{6000} = 34,3 \text{ m/s}$$

$N_N = n = 1000 \text{ tr/min}$



- Vitesse linéaire sur la partie inférieure de la palette :

$$u_1 = \frac{\pi \cdot D_{V1} \cdot n}{6000} = \frac{\pi \cdot 43,68 \cdot 1000}{6000} = 22,87 \text{ m/s}$$

- Débit d'air maximum :

$$Q_{\text{MAX}} = 0,42 \cdot u_2 \cdot S_2 = 0,42 \cdot 34,3 \cdot 1861,5 \cdot 10^{-4} = 2,68 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Pression à vide (marche à vide) du ventilateur :

$$H_0 = \eta_{\text{a0}} \cdot \frac{\gamma}{g} (u_2^2 - u_1^2)$$

où : η_{a0} : rendement aérodynamique à vide ; il est estimé pour les palettes radiales à 0,6

γ : masse spécifique de l'air ; $\gamma = 1,2 \text{ Kg/m}^3$

g : accélération de la pesanteur ; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

donc :
$$H_0 = 0,6 \cdot \frac{1,2}{9,81} ((65,52)^2 - (22,87)^2) = 47,7 \text{ Kgf/m}^2$$

- Pression assurant le passage de l'air nécessaire au refroidissement

$$H = Z \cdot Q^2$$

Q : débit d'air que doit fournir le ventilateur, il doit être supérieur au débit nécessaire Q_{nec} .

Pour trouver ce débit Q , on a une relation entre H et H_0 :

$$H = Z \cdot Q^2 = H_0 \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_{\text{MAX}}} \right)^2 \right]$$

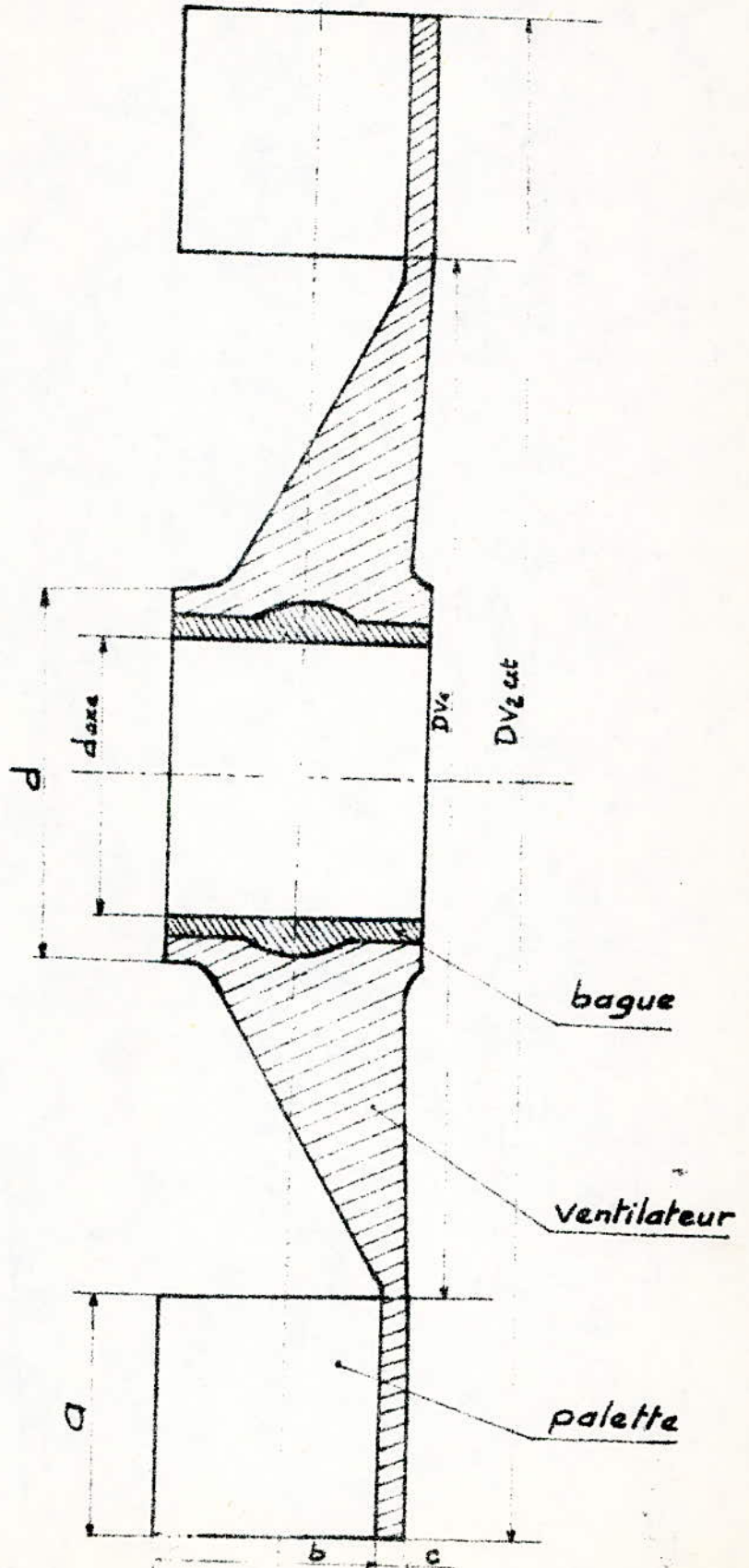
cette relation traduit le point de fonctionnement du ventilateur qui est l'intersection de la caractéristique du système de refroidissement ($H=ZQ^2$) et la caractéristique du ventilateur $\frac{H}{H_0} = 1 - \left(\frac{Q}{Q_{\text{MAX}}} \right)^2$.

on obtient :
$$Q = \sqrt{\frac{H_0}{Z + \frac{H_0}{Q_{\text{MAX}}^2}}} = \sqrt{\frac{47,7}{74,65 + \frac{47,7}{(2,68)^2}}} = 0,765 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ce débit Q est bien supérieur à Q_{nec} : notre ventilateur convient.

VENTILATEUR

- $b = 9,83 \text{ cm}$
- $D_{\frac{1}{2} \text{ ext}} = 65,52 \text{ cm}$
- $D_{\frac{1}{4}} = 43,68 \text{ cm}$
- $a = 10,92 \text{ cm}$
- $C = 1 \text{ cm}$
- $d_{\text{axe}} = 12 \text{ cm}$
- $d = 16 \text{ cm}$



.CHAPITRE VI

.Calcul mécanique .

6.1. Technologie des arbres.

Ils constituent un des organes mécaniques essentiels des machines tournantes et doivent par suite être exécutés avec le plus grand soin, car du comportement de l'arbre dépend en grande partie la sécurité de marche de la machine, notamment la flexion de l'arbre doit être suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas de danger de contact du rotor et du stator.

Etant donné l'importance des masses constituant les rotors, il y a lieu, lors de leur conception, de tenir compte de la vitesse critique de flexion et d'assurer un équilibrage dynamique de l'ensemble aussi parfait que possible.

6.2. but:

Le rôle de l'arbre est double :

- transmettre le couple
- supporter l'ensemble des organes du rotor de la machine ou des éléments fixés sur l'arbre, en tenant compte des forces auxquelles ces organes sont soumis.

L'arbre doit donc être dimensionné de façon que, sous l'action de l'ensemble des forces qui le sollicitent, la contrainte n'atteigne en aucun de ses points une valeur dangereuse pour sa conservation.

Il faut de plus que les vitesses critiques de flexion et de torsion soient suffisamment éloignées de la vitesse de fonctionnement normal.

De ce qui précède découlent des conditions de résistances (ou de contraintes maximales admissibles) et des conditions de rigidité qui donnent des valeurs différentes du diamètre de l'axe d , on retient

la valeur la plus forte ainsi trouvée afin de satisfaire la totalité des conditions.

6.3. Calcul mécanique de l'arbre :

Il consiste en la détermination des caractéristiques mécaniques du moteur dont les principales sont les suivantes :

- la flèche due aux efforts s'exerçant sur l'arbre
- la vitesse critique de rotation
- l'effort unitaire dans la section la plus sollicitée de l'arbre

6.3.1. géométrie de l'arbre :

le rotor est assimilable à une poutre reposant sur deux appuis sur laquelle s'exerce l'effort ($G_0 + T_0$).

le calcul de l'arbre se fera dans les conditions les plus défavorables, c'est à dire on choisit les valeurs limites des diamètres et des longueurs correspondant aux paliers et au ventilateur.

les valeurs limites choisies sont :

- pour les paliers :

$$d = d_{axe} = 181,4 \text{ mm}$$

$$l = 80 \text{ mm}$$

- pour le ventilateur :

$$d = 120 \text{ mm}$$

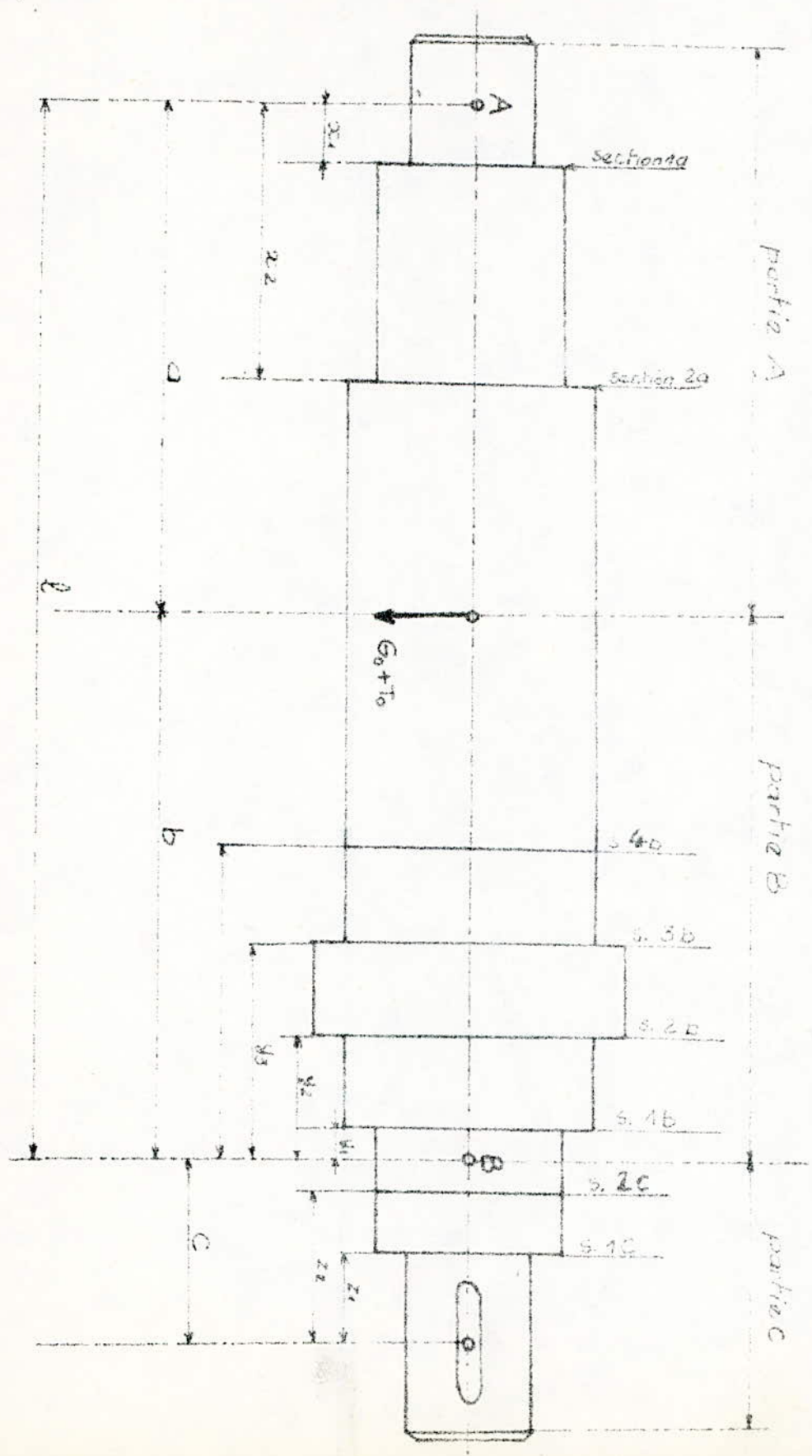
$$l = 215 \text{ mm}$$

- pour le manchon :

$$d = 181,4 \text{ mm}$$

$$l = 330 \text{ mm}$$

moynnant les conditions précédentes, le schéma de l'arbre servant pour le calcul s'établit comme suit.



détermination des paramètres des différentes parties A, B et C :

- Partie A :

$$x_1 = 40 \text{ mm} \quad ; \quad d_{2a} = 181,4 \text{ mm}$$

$$x_2 = 255 \text{ mm} \quad ; \quad a = 655 \text{ mm}$$

$$d_{1a} = 120 \text{ mm} \quad ;$$

- Partie B :

$$y_1 = 40 \text{ mm} \quad ; \quad d_{1b} = 181,4 \text{ mm}$$

$$y_2 = 240 \text{ mm} \quad ; \quad d_{2b} = 261,4 \text{ mm} = d_{3b}$$

$$y_3 = 320 \text{ mm} \quad ; \quad d_{4b} = 181,4 \text{ mm}$$

$$y_4 = 370 \text{ mm} \quad ; \quad b = 770 \text{ mm}$$

- Partie C :

$$z_1 = 85 \text{ mm} \quad ; \quad d_{1c} = 180 \text{ mm} \quad ; \quad c = 125 \text{ mm}$$

$$z_2 = 125 \text{ mm} \quad ; \quad d_{2c} = 180 \text{ mm}$$

6.3.2. Poids du rotor :

Il est donné par la relation :

$$G = 6,3 (D_2^2 L + D_{bag} L_{bag})$$

où D_{bag} : diamètre extérieur des bagues ; $D_{bag} = 300 \text{ mm}$

L_{bag} : longueur du manchon sur lequel sont montées les bagues

D_2 : diamètre du rotor

L : Longueur du rotor

$$G = 6,3 (46,8^2 \cdot 38,5 + 30 \cdot 33)$$

$$G = 537,48 \text{ Kg}$$

6.3.3 Couple nominal :

Il se calcule suivant la formule :

$$\Gamma_n = 97500 \cdot \frac{P_N}{n}$$

$$\Gamma_n = 97500 \cdot \frac{250}{1000} = 24375 \text{ Kg.cm}$$

6.3.4. Réaction des charges :

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$P_c = K_R \frac{\Gamma_N}{R}$$

où K_R : coefficient qui tient compte de la nature de la transmission
dans notre cas on prend $K_R = 0,3$

R : rayon du manchon ; $R = 130,7 \text{ mm} = \frac{d_{2b}}{2}$

Γ_N : couple nominal ; $\Gamma_N = 24375 \text{ Kg.cm}$.

$$P_c = 0,3 \cdot \frac{24375}{13,07} = 559,5 \text{ Kg}$$

$$P_c = 559,5 \text{ Kg.}$$

6.3.5. Fléchissement au milieu de l'arbre :

Il est donné par la relation :

$$f_G = \frac{G}{3.E.I^2} (a^2 S_b + b^2 S_a)$$

où l : distance entre les patiers ; $l = a+b = 142,5 \text{ cm}$.

E : module d'élasticité ; $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Kg/cm}^2$

S_a et S_b sont données par :

$$S_a = \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} ; \quad S_b = \frac{Y_i^3 - Y_{i-1}^3}{J_i}$$

i : est le numéro du tronçon de la section

J_i : est le moment d'inertie du tronçon i de la section donnée.

les valeurs de S_a et S_b sont tirées d'après les tableaux T_1 et T_2

G : poids du rotor ; $G = 537,48 \text{ Kg}$.

$$f_G = \frac{537,48}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^6 (142,5)^2} (65,5^2 \cdot 3,338 + 77^2 \cdot 3,1698)$$

$$f_G = 139,12 \cdot 10^{-6} \text{ cm.}$$

6.3.6. Fléchissement de l'arbre sous l'action des forces de réaction :

Il se calcule d'après la relation:

$$f_p = \frac{P_r \cdot C}{3 \cdot E \cdot I^2} \left[(1,5 \cdot l \cdot S_a - S_b) a + b S_a \right]$$

l, E, a, b, S_a, S_b ont la même signification que précédemment :

P_r : réaction des charges ; $P_r = 559,5 \text{ Kg}$

C : distance entre palier et le bout d'arbre ; $C = 125 \text{ mm}$

S_0 est donnée par : $S_0 = \frac{Y_0^2 - Y_0^{-2}}{J_z}$; sa valeur est tirée du tableau T2

$$f_p = \frac{559,5 \cdot 12,5}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot (142,5)^2} \left[(1,5 \cdot 142,5 \cdot 0,111 - 3,338) 65,5 + 77 \cdot 3,1698 \right]$$

$$f_p = 86,35 \cdot 10^{-6} \text{ cm.}$$

6.4. attraction magnétique:

Il s'agit de l'action exercée par le stator des machines tournantes sur le rotor. Elle s'engendre à cause de la non uniformité de l'entrefer et du fléchissement de l'arbre sous l'influence de G et P .

Elle se détermine par la relation

$$T_0 = 3 \cdot D_2 \cdot L_2 \cdot \frac{e_0}{\delta}$$

où e_0 : excentricité de l'arbre donnée par : $e_0 = 0,1\delta + f_G + f_p$

D_2 : diamètre du rotor ; $D_2 = 46,8 \text{ cm}$

L_2 : longueur du rotor ; $L_2 = 38,5 \text{ cm}$

$$e_0 = 0,1 \cdot 0,1 + 139,12 \cdot 10^{-6} + 86,35 \cdot 10^{-6}$$

$$e_0 = 0,01022547 \text{ cm.}$$

$$T_0 = 3 \cdot 46,8 \cdot 38,5 \cdot \frac{0,01022547}{0,1}$$

$$T_0 = 552,72 \text{ Kg.}$$

6.4.1. Fléchissement de l'arbre sous l'influence de l'attraction magnétique:

Il est donné par : $f_r = f_G \cdot \frac{T_0}{G}$

Tableau 2 (T₂)

Sections	D _i [cm]	J _i [cm ⁴]	Y _i [cm]	Y _i ³ [cm ³]	Y _i ³ - Y _{i-1} ³ [cm ³]	$\frac{Y_i^3 - Y_{i-1}^3}{J_i}$ [cm ⁻¹]	Y _i ² [cm ²]	Y _i ² - Y _{i-1} ² [cm ²]	$\frac{Y_i^2 - Y_{i-1}^2}{J_i}$ [cm ⁻²]
1b	18,14	5315,19	4	64	64	0,012	16	16	0,003
2b	26,14	22918,8	24	13824	13760	0,6	576	560	0,0244
3b	26,14	22918,8	32	32768	18944	0,826	1024	448	0,0195
4b	18,14	5315,19	37	42875	10107	1,9	1369	345	0,065
						S _b = 3,338			
							S _o = 0,111		

Tableau 1 (T₁)

Sections	d _i [cm]	J _i [cm ⁴]	X _i [cm]	X _i ³ [cm ³]	X _i ³ - X _{i-1} ³ [cm ³]	$\frac{X_i^3 - X_{i-1}^3}{J_i}$ [cm ⁻¹]
1a	12	1017,87	4	64	64	0,0628
2a	18,14	5315,19	25,5	16581,375	16517,375	3,107
						S _a = 3,1698

$$F_T = 139,12 \cdot 10^6 \cdot \frac{552,72}{537,48}$$

$$F_T = 143,064 \cdot 10^6 \text{ cm.}$$

6.4.2. Fléchissement installé de l'attraction magnétique:

Il est défini comme suit:

$$f_m = \frac{F_T}{1-m}$$

où m : facteur liant le fléchissement dû à l'attraction magnétique au

fléchissement initial du rotor; $m = \frac{F_T}{Q_0} = \frac{143,064 \cdot 10^6}{0,01022547} = 0,014$

$$f_m = \frac{143,064 \cdot 10^6}{1-0,014}$$

$$f_m = 145,1 \cdot 10^6 \text{ cm.}$$

6.5 Fléchissement résultant de l'arbre:

Il est donné par:

$$f = f_G + f_p + f_m \quad ; \quad f = 139,12 \cdot 10^6 + 86,35 \cdot 10^6 + 145,1 \cdot 10^6 =$$

$$f = 370,57 \cdot 10^6 \text{ cm.}$$

Les normes prévoient que le fléchissement ne doit pas dépasser 10% de la valeur de l'entrefer δ . Cette condition est bien réalisée dans notre cas.

6.6. Vitesse critique de rotation:

Cette vitesse est celle pour laquelle un arbre est susceptible de prendre sous l'action d'une charge P dont le point d'application n'est pas sur l'axe de l'arbre, une flèche f , telle que la force centrifuge qui en résulte provoque la rupture de l'arbre. Elle est donnée par la relation suivante:

$$N_c = 300 \sqrt{\frac{1-m}{f_G}} \quad ; \quad N_c = 300 \sqrt{\frac{1-0,014}{139,12 \cdot 10^6}}$$

$$N_c = 25256 \text{ tr/mn.}$$

Le fonctionnement en dessous de la vitesse critique donne la meilleure garantie de l'absence de vibrations. La vitesse critique doit être supérieure à la vitesse nominale d'au moins 30%, elle est environ 25 fois la vitesse nominale dans notre cas.

6.7 Calcul de l'arbre à la solidité :

• On détermine les valeurs maximales des moments de rotation et de torsion pour les différentes sections

6.7.1. Partie C :

— section 1c :

* Moment de rotation :

Il est donné par la relation :

$$M_r = 2 \cdot P \cdot Z_1 = 2 \cdot 559,5 \cdot 8,5 = 9511,5 \text{ Kg.cm}$$

* Moment de torsion :

$$M_T = 2 \cdot \alpha \cdot P \cdot N \quad ; \quad \text{Pour les machines réversibles } \alpha = 0,8$$

$$M_T = 2 \cdot 0,8 \cdot 24375$$

$$M_T = 39.000 \text{ Kg.cm}$$

* Module de torsion :

$$\text{Il est défini par : } W = \frac{\pi}{32} d^3 = \frac{\pi}{32} (18)^3 = 572,55 \text{ cm}^3$$

* Contrainte normale :

$$\sigma = \frac{\sqrt{M_r^2 + (K \cdot \alpha \cdot M_T)^2}}{W} \quad \text{où } K: \text{ facteur dépendant des conditions de travail}$$

des machines supposées dures K vaut 2,5.

$$\sigma = \frac{\sqrt{(9511,5)^2 + (2,5 \cdot 0,8 \cdot 39000)^2}}{572,55}$$

$$\sigma = 137,241 \text{ Kg/cm}^2$$

— section 2c :

D'une façon analogue on déterminera les valeurs des paramètres M_r , M_T , W , σ . Les résultats sont récapitulés dans le tableau (T3)

$$M_r = 13987,5 \text{ Kg.cm} ; \quad M_T = 39000 \text{ Kg.cm} ; \quad W = 572,55 \text{ cm}^3 ; \quad \sigma = 138,405 \text{ Kg/cm}^2$$

6.72. Partie B

- charge due à l'attraction magnétique :

$$T_M = \frac{T_0}{1-m} \quad ; \quad T_M = \frac{552,72}{1-0,014} = 560,562 \text{ Kg}$$

- Réaction de base :

Elle se détermine par la relation

$$B = (G + T_M) \frac{a}{l} + 2 \cdot P_c \frac{c+l}{l} \quad \text{où } a = 65,5 \text{ cm} ; c = 12,5 \text{ cm} ; l = 142,5 \text{ cm.}$$

$$B = (537,48 + 560,562) \frac{65,5}{142,5} + 2 \cdot 559,5 \frac{12,5 + 142,5}{142,5}$$

$$B = 1721,87 \text{ Kg.}$$

- Calcul des paramètres de la section 1b :

$$* \quad M_r = 2 \cdot P_c \cdot (c + y_1) + B y_1 \quad \text{où } y_1 = 40 \text{ mm} ; c = 12,5 \text{ cm.}$$

$$M_r = 2 \cdot 559,5 (12,5 + 4) + 1721,87 \cdot 4$$

$$M_r = 20185,37 \text{ Kg.cm.}$$

$$* \quad M_T = 39000 \text{ Kg.cm.}$$

$$* \quad W = \frac{\pi}{32} \cdot d_{1b}^3 = \frac{\pi}{32} (18,14)^3 = 586,02 \text{ cm}^3$$

$$* \quad \sigma = \frac{\sqrt{(20185,37)^2 + (2,5 \cdot 0,8 \cdot 39000)^2}}{586,02}$$

$$\sigma = 137,485 \text{ Kg/cm}^2$$

- Section 2b :

Le calcul reste analogue à celui de la section 1b, les résultats sont donnés dans le tableau (T4)

- Section 3b :

voir tableau (T4)

- Section 4b :

Voir même tableau (T4)

Partie C:

Sections	M_r [kg.cm]	M_T [kg.cm]	W [cm ³]	σ [kg/cm ²]
1c	9511,5	39000	572,55	137,241
2c	13987,5	39000	572,55	138,405

Tableau
(T3)

Partie A:

Sections	M_r	M_T	W	σ
1a	2765,94	0	169,646	16,304
2a	17632,86	0	586,02	30,09

Tableau
(T5)

Partie B:

Sections	M_r	M_T	W	σ
1b	20185,37	39000	586,02	137,485
2b	82159,5	39000	1753,54	64,6
3b	104895,34	39000	1753,54	74,54
4b	119099,69	39000	586,02	242,94

Tableau
(T4)

6.7.3 Partie A :

Cette partie n'est pas soumise à la torsion

- Réaction de base :

Elle est définie par la relation

$$A = (G + T_M) \frac{b}{l} + 2.P_2 \frac{c}{l}$$

$$A = (537,48 + 560,562) \frac{77}{142,5} + 2 \cdot 559,5 \cdot \frac{12,5}{142,5}$$

$$A = 691,485 \text{ Kg.}$$

- Section 1a :

$$* M_r = A x_1 = 691,485 \cdot 4 = 2765,94 \text{ Kg.cm.}$$

$$* W = \frac{\pi}{32} d_{1a}^3 = \frac{\pi}{32} (12)^3 = 169,646 \text{ cm}^3$$

$$* \sigma = \frac{M_r}{W} = \frac{2765,94}{169,646} = 16,304 \text{ Kg./cm}^2$$

- Section 2a :

voir tableau (Ts).

CHAPITRE VII

Calcul des Résistances Additionnelles

7.1. Généralités :

Au démarrage ce moteur est assimilable à un transformateur dont le stator serait le primaire et le rotor le secondaire. On limite l'intensité au démarrage en limitant l'intensité du secondaire (I_{rotor})

7.2. démarrage des moteurs bobinés à bagues:

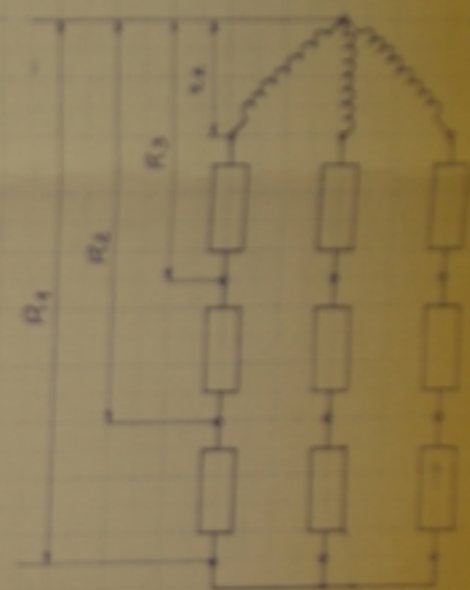
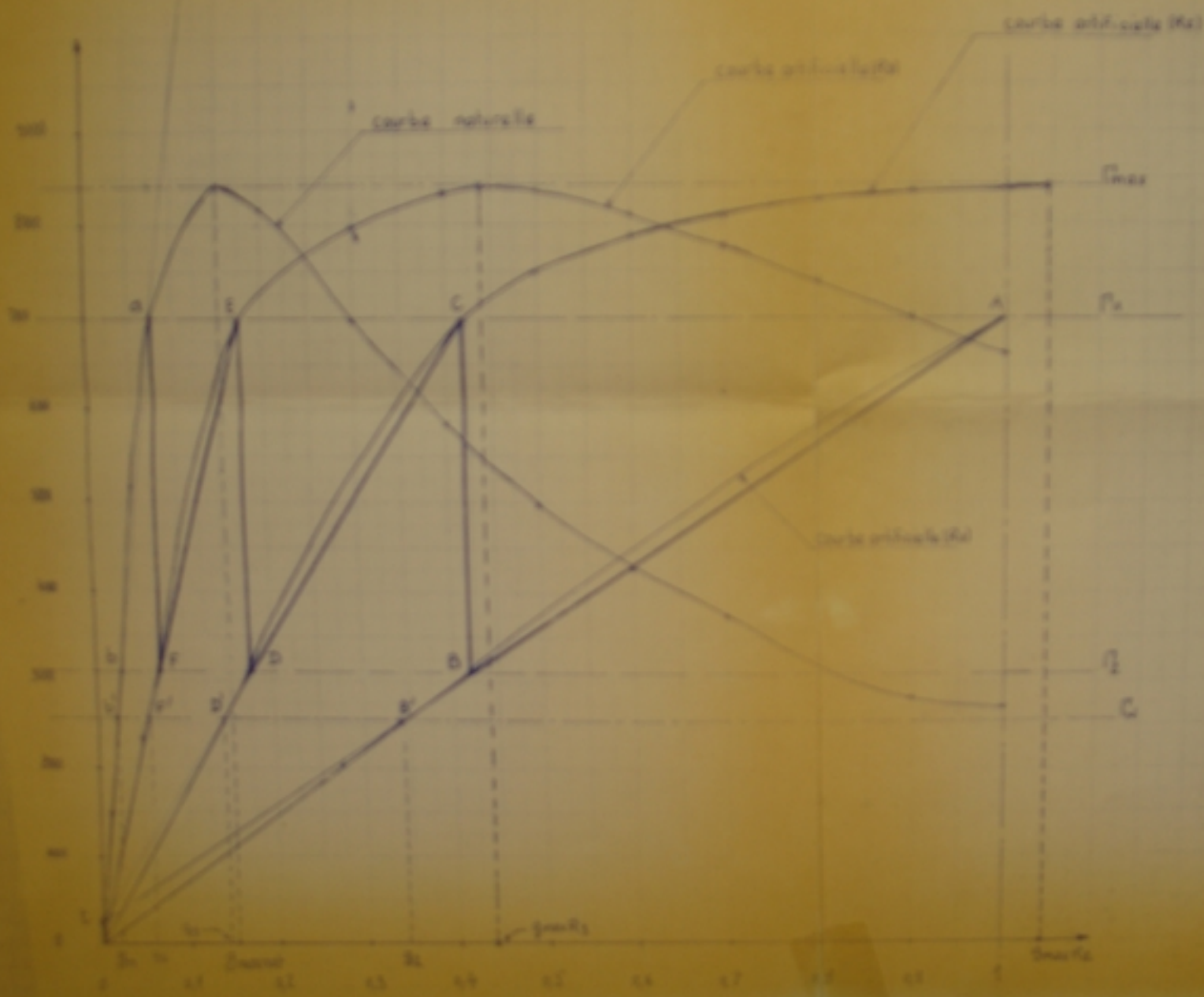
A partir d'une caractéristique, couple-vitesse, propre ou naturelle c'est à dire correspondant au rotor court-circuité, on peut obtenir une infinité d'autres caractéristiques dites artificielles en insérant des résistances additionnelles dans le circuit rotorique. Ces nouvelles caractéristiques présentent la même valeur du couple maximal que la caractéristique naturelle; la position de ce maximal est par contre fonction de la résistance insérée dans le rotor et se déplace vers la droite (voir schéma donnant les quatre temps de démarrage) lorsque la résistance totale du circuit rotorique augmente.

7.2.1. Caractéristique naturelle: $\Gamma = f(g)$

Pour le calcul de Γ et g on suppose certaines conditions vérifiées telles que :

- les f.e.m, les courants, les flux varient sinusoidalement dans le temps
- le champ magnétique dans l'entrefer, dans le joug du stator et du rotor se distribue sinusoidalement.
- les enroulements du rotor et du stator sont symétriques et l'entrefer uniforme
- l'hystérésis et les courants de Foucault n'existent pas dans le rotor
- les pertes mécaniques (de frottement et ventilation) peuvent être

skiva d'arrant le quatre temps de démarrage



admisses égales à zéro et donc $\Gamma_{em} = \Gamma_{mec}$

— la saturation n'influe pas sur les inductances du stator et du rotor.

Moyennant ces conditions, on peut utiliser les formules suivantes pour le calcul du couple et du glissement.

$$\Gamma = \Gamma_{max} \frac{2+q}{\frac{g}{g_{max}} + \frac{g_{max}}{g} + q} \quad (1); \quad \text{ou} \quad q = \frac{r_1}{r_2} \cdot 2g_{max}$$

$$g_{max nat} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (2);$$

r_2' : résistance du rotor réduite

r_1 : résistance du stator

x_1 : réactance de fuite du stator

x_2' : réactance de fuite réduite du rotor.

$$g_{max nat} = \frac{0,0332}{\sqrt{(0,024)^2 + (0,114 + 0,1)^2}}; \quad g_{max nat}: \text{glissement max naturel}$$

$$g_{max nat} = 0,154$$

Connaissant $g_{max nat}$, on détermine q .

$$q = \frac{0,024}{0,0332} \cdot 2 \cdot 0,154; \quad q = 0,222$$

le couple max (Γ_{max}) ayant déjà été trouvé $\Gamma_{max} = 8435,34 \text{ N.m}$

Pour le tracé de la caractéristique naturelle il suffit de donner des valeurs à g (0, ..., 1) et calculé les couples correspondant à partir de la formule (1), tout calcul fait on obtient le tableau suivant:

g	0,0125	0,05	0,154	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Γ [m.N]	1484,8	5168	8435,34	8182	6985	5849	4963	4284,4	3758	3341,5	3005	2728

7.2.2. Caractéristiques artificielles:

Elles diffèrent de la caractéristique naturelle à cause de l'existence des résistances additionnelles dans le circuit du rotor

$$R_t = r_2 + r_{add} \quad ; \quad R_t : \text{résistance totale du rotor}$$

r_{add} ; résistance additionnelle

7.3. Calcul des résistances additionnelles:

7.3.1. Principe:

On se fixe d'abord une valeur minimale du couple au-dessous de laquelle il ne doit pas descendre au cours du démarrage pour que celui-ci soit suffisamment rapide. Pour réaliser un bon démarrage, on prend pour cette valeur celle du couple Γ_2 qui doit être prise plus grande que le couple Γ_N de $(10 \div 20)\%$. On choisit dans notre cas $\Gamma_2 = \Gamma_N + 20\% \Gamma_N = \Gamma_N \left(1 + \frac{20}{100}\right) = 1,2 \Gamma_N$.

la valeur de Γ_N étant de: $\Gamma_N = 2579 \text{ m.N}$. De là la valeur de Γ_2 devient: $\Gamma_2 = 1,2 \cdot 2579 = 3094,8 \text{ m.N} \approx 3100 \text{ m.N}$

On se donne ensuite la valeur maximale du couple $\bar{\alpha}$ ne pas dépasser pour que le courant ne prenne à aucun moment une valeur excessive. Cette valeur Γ_1 a été fixé à $\Gamma_1 = 7000 \text{ m.N}$.

7.3.2. Calcul du nombre de temps de démarrage:

Il est donné par la formule suivante:

$$m_d = \frac{\log \frac{1}{g_n \cdot \Gamma_{2rel}}}{\log \frac{\Gamma_{1rel}}{\Gamma_{2rel}}} \quad ; \quad \Gamma_{1rel} = \frac{\Gamma_1}{\Gamma_N}$$

$$\Gamma_{2rel} = \frac{\Gamma_2}{\Gamma_N}$$

$$\Gamma_{1rel} = \frac{7000}{2579} = 2,71 \quad ; \quad \Gamma_{2rel} = \frac{3100}{2579} = 1,2$$

m_d devient alors :

$$m_d = \frac{\log \frac{1}{0,021 \cdot 2,71}}{\log \frac{2,71}{1,2}}$$

$m_d = 3,52$ on prend $m_d = 4$. Donc le nombre de temps

de démarrage étant de quatre, cela veut dire que le moteur en un premier temps démarre avec toutes les résistances en série avec celle du rotor, une temporisation puis passage au deuxième temps un groupement des résistances a été court-circuité une deuxième temporisation puis passage au premier temps il ne reste en série avec la résistance du rotor qu'un groupement de résistance une troisième temporisation puis passage au quatrième temps celui où toutes les résistances sont court-circuitées. Les différentes temporisations entre les différents temps sont obtenues à l'aide de relais temporisés R_1, R_2, R_3 . La commande se fait automatiquement par contacteurs (voir schéma électrique).

7.3.3. Calcul des résistances additionnelles :

Il faudra donc qu'au décollage ($g = g_1 = 1$) la résistance totale d'un des enroulements rotoriques ait une valeur convenable R_1 qu'il s'agit de calculer de manière que Γ_1 ait la valeur que nous avons choisie. Alors le moteur démarre, accélère ; le glissement diminue et se fixe à une valeur g_2 , tandis que le couple prend la valeur Γ_2 . En passant sur le plot suivant du Rhéostat, si chaque phase du circuit rotorique prend la nouvelle valeur R_2 convenable, inférieure à R_1 , le couple reprend la valeur maximale Γ_1 le rotor accélère à nouveau,

son glissement diminue et passe de la valeur g_2 à la valeur g_3 quand le couple reprend sa valeur Γ_2 . Et de proche en proche on arrive au régime normal avec suppression du Rhéostat.

La méthode utilisée est la méthode graphique. Le principe de cette est le suivant :

On trace la caractéristique naturelle. On trace la droite passant par les points a et b points d'intersections respectifs de la courbe naturelle avec Γ_1 et Γ_2 . Cette droite coupe la droite $g=0$ au point t. Du point t on trace la droite tA. Cette dernière coupe la droite $\Gamma_2 = 3100$ en B d'où l'on trace la droite BC. On joint C à t d'où le point D. On trace DE on joint E à t d'où le point F. De ce dernier on trace Fa. d'où on revient sur la droite t a. les droites ta, tE, tC, tA coupe la droite $\Gamma_4 = 2579$ respectivement en b', F', D', et B' de ces points on abaisse les perpendiculaires sur la droite $\Gamma=0$ on obtient respectivement les glissements g_1, g_4, g_3 et g_2

On suppose que :

$$\frac{g_4}{g_n} = \frac{g_{\max R_3}}{g_{\max \text{nat}}} ; \quad \frac{g_3}{g_n} = \frac{g_{\max R_2}}{g_{\max \text{nat}}} ; \quad \frac{g_2}{g_n} = \frac{g_{\max R_1}}{g_{\max \text{nat}}}$$

$g_{\max R_i}$: glissement maximal correspondant aux résistances additionnelles

les valeurs des glissements, g_2, g_3, g_4 sont tirées de la construction

on trouve : $g_n = 0,021$; $g_4 = 0,06$; $g_3 = 0,1425$; $g_2 = 0,3425$

A partir de ces valeurs et connaissant $g_{\max \text{nat}}$, on peut déterminer les différents g_{\max} correspondant aux différentes résistances additionnelles.

A partir du rapport: $\frac{g_4}{g_n} = \frac{g_{\max R_3}}{g_{\max \text{nat}}}$ on tire $g_{\max R_3}$.

$$g_{\max R_3} = \frac{g_4}{g_n} \cdot g_{\max \text{nat}} ; g_{\max R_3} = \frac{0,06}{0,021} \cdot 0,154$$

$$g_{\max R_3} = 0,44$$

du rapport: $\frac{g_3}{g_n} = \frac{g_{\max R_2}}{g_{\max \text{nat}}}$ on tire $g_{\max R_2}$.

$$g_{\max R_2} = \frac{g_3}{g_n} \cdot g_{\max \text{nat}} ; g_{\max R_2} = \frac{0,1425}{0,021} \cdot 0,154$$

$$g_{\max R_2} = 1,045$$

le rapport: $\frac{g_2}{g_n} = \frac{g_{\max R_1}}{g_{\max \text{nat}}}$ nous donne la valeur de $g_{\max R_1}$.

$$g_{\max R_1} = \frac{g_2}{g_n} \cdot g_{\max \text{nat}} ; g_{\max R_1} = \frac{0,3425}{0,021} \cdot 0,154$$

$$g_{\max R_1} = 2,53.$$

D'autre part la valeur du glissement maximal dû aux résistances additionnelles est donnée par:

$$g_{\max R_i} = \frac{R'_i}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2}} \quad (3) \quad \text{où: } R'_i : \text{valeur réduite de } R_i$$

i : étant l'indice $i=1,2,3$.

le rapport de $\frac{(3)}{(2)}$ nous donne: $\frac{g_{\max R_i}}{g_{\max \text{nat}}} = \frac{R'_i}{r'_2} = \frac{R_i}{r_2} \quad (4)$

Puisque $R'_i = k_{\text{réduction}} \times R_i$

$$r'_2 = k_{\text{réduction}} \times r_2 \quad \text{le même } k_{\text{réduction}} = 1,66$$

de la relation (4) on détermine les différentes résistances R_1, R_2, R_3 .

- calcul de R_1 :

$$R_1 = \frac{g_{\max R_1}}{g_{\max \text{nat}}} \cdot r_2 = \frac{2,53}{0,154} \cdot 0,02$$

$$R_1 = 0,328 \Omega$$

$$R_1 = r_2 + r_{\text{add}_1} \Rightarrow r_{\text{add}_1} = R_1 - r_2 = 0,328 - 0,02 = 0,308 \Omega$$

- calcul de R_2 :

$$R_2 = \frac{g_{\max R_2}}{g_{\max \text{nat}}} \cdot r_2 = \frac{1,045}{0,154} \cdot 0,02$$

$$R_2 = 0,135 \Omega$$

$$R_2 = r_2 + r_{\text{add}_2} \Rightarrow r_{\text{add}_2} = 0,135 - 0,02 = 0,115 \Omega$$

- calcul de R_3 .

$$R_3 = \frac{g_{\max R_3}}{g_{\max \text{nat}}} \cdot r_2 = \frac{0,44}{0,154} \cdot 0,02$$

$$R_3 = 0,057 \Omega$$

$$R_3 = r_2 + r_{\text{add}_3} \Rightarrow r_{\text{add}_3} = 0,057 - 0,02 = 0,037 \Omega$$

7.3.4. Tracé des caractéristiques artificielles :

Pour pouvoir tracer les caractéristiques artificielles dues aux différentes résistances R_1, R_2, R_3 on applique la formule (1) dans laquelle on remplace g_{\max} par $g_{\max R_i}$ et q sera donné par $q = \frac{r_{21}}{r_2} \cdot g_{\max R_i}$. tout calcul fait on obtient les différents tableaux.

- caractéristique artificielle due à la résistance R_1 :

g	0,0125	0,05	0,154	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Γ [N.m]	231,61	879,313	2368,89	2912,49	3909,0	4706,3	5353,2	5883,63	6322,34	6687,56	6993,15	7249,8

- caractéristique artificielle due à la résistance R_2 :

g	0,0125	0,05	0,154	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Γ [N.m]	347,83	1318,38	3506,78	4274,67	5607,14	6571,86	7259,6	7739	8061,62	8268,24	8381,95	8430,68

- caractéristique artificielle due à la résistance R_3 :

δ	0,0125	0,05	0,154	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Γ [N.m]	620	2328,42	5785,77	6757,4	7985,52	8406,35	8383,3	8136,04	7787	7401,53	7013,61	6640

7.4. Commande électrique:

Elle se fait automatiquement par contacteurs. Un sectionneur à fusibles incorporés permet d'isoler l'installation. Le moteur est protégé par relais thermiques. Le démarrage se fait en quatre temps. Le schéma des circuits de puissance et de commande de l'installation est représenté par le schéma suivant.

Conclusion

Le moteur asynchrone d'induction est le moteur de base de l'industrie moderne. Il possède certaines caractéristiques électriques et mécaniques déterminées par le principe même de son fonctionnement, mais un grand nombre de variantes d'exécution permettent de l'adapter à des conditions d'utilisation particulières.

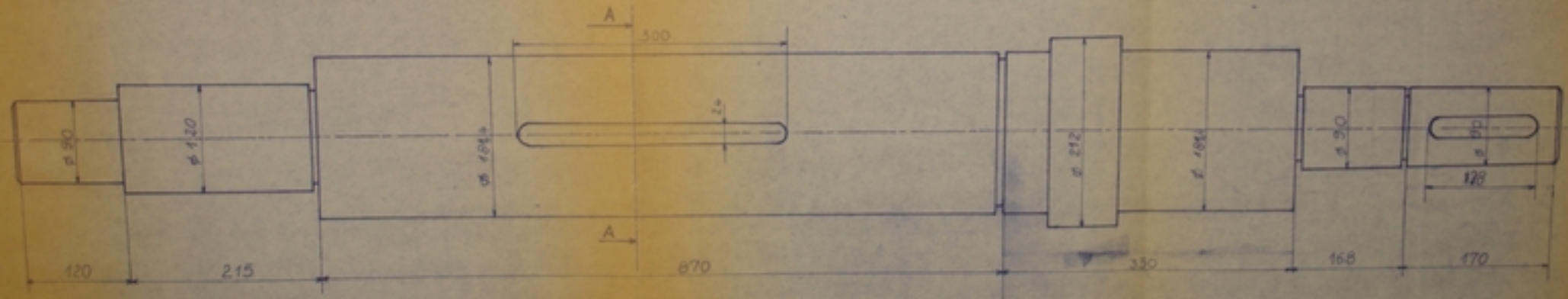
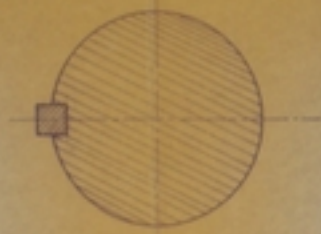
L'emploi des moteurs à rotors bobinés s'impose là où les moteurs à rotors en court-circuit ne peuvent donner entière satisfaction. Ils sont employés pour l'entraînement des machines ou des installations nécessitant un fort couple de démarrage.

L'introduction des résistances additionnelles dans le circuit rotorique permet de réduire le courant de démarrage.

Comparés aux données du cahier de charge, les valeurs trouvées restent dans les marges tolérées par la construction électrique.

Si cette ouvrage vous apporte l'aide que vous pouvez y chercher notre but aura été atteint et ce sera notre meilleure récompense.

Coupe AA



M. GUERZIZ
A. BOUZID
Echelle: 1/4
Pièce N°:

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
ARBRE

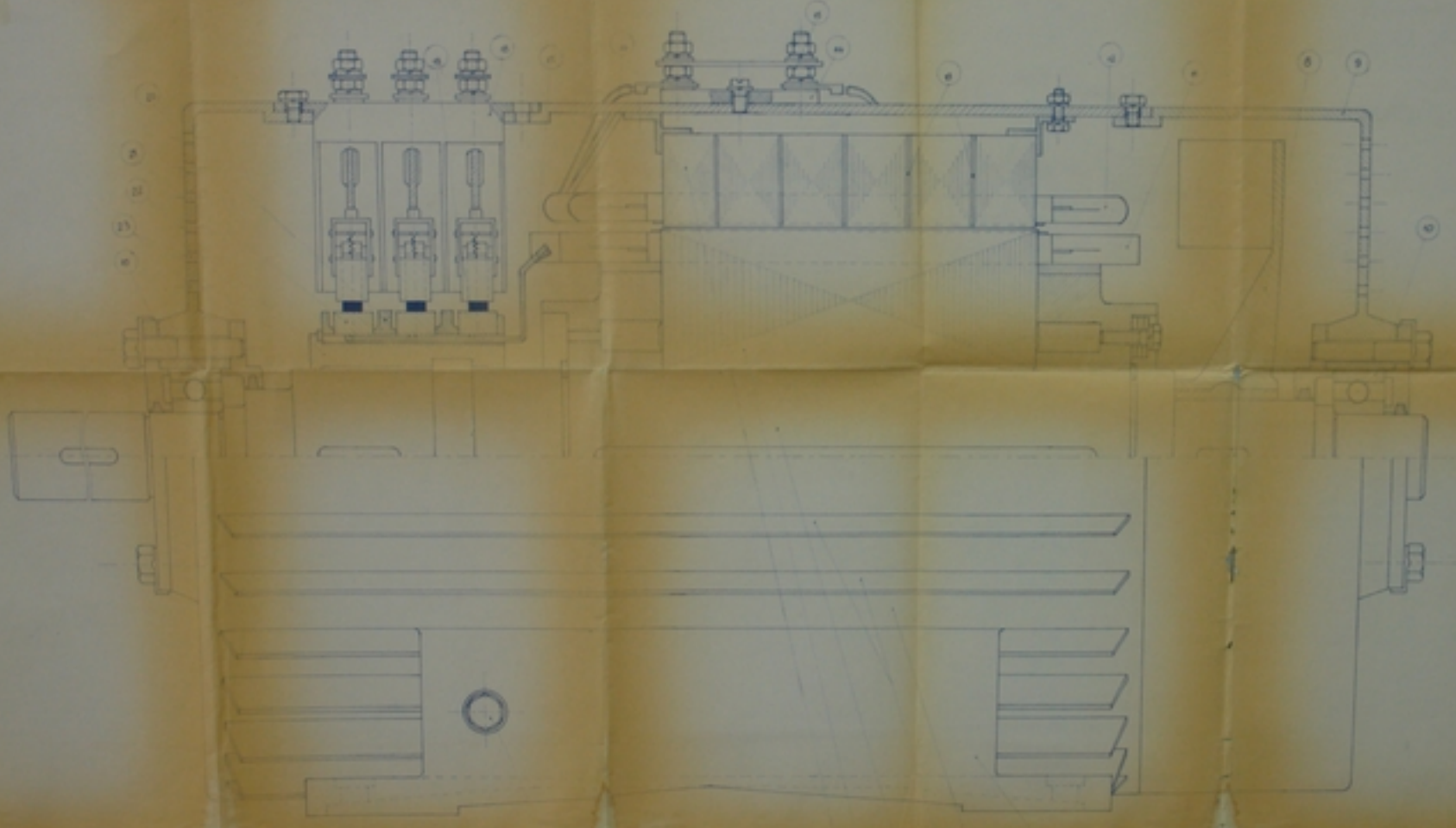
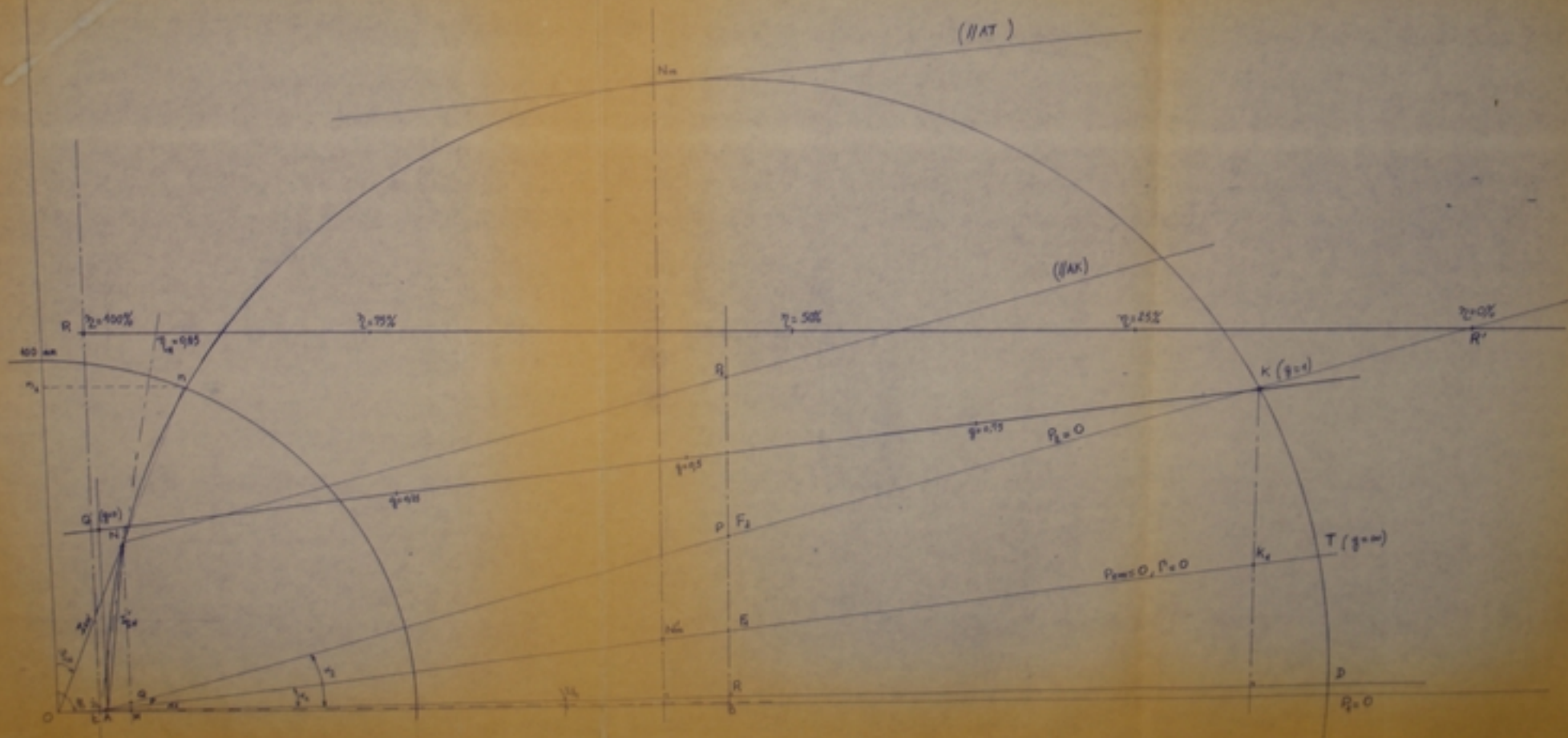


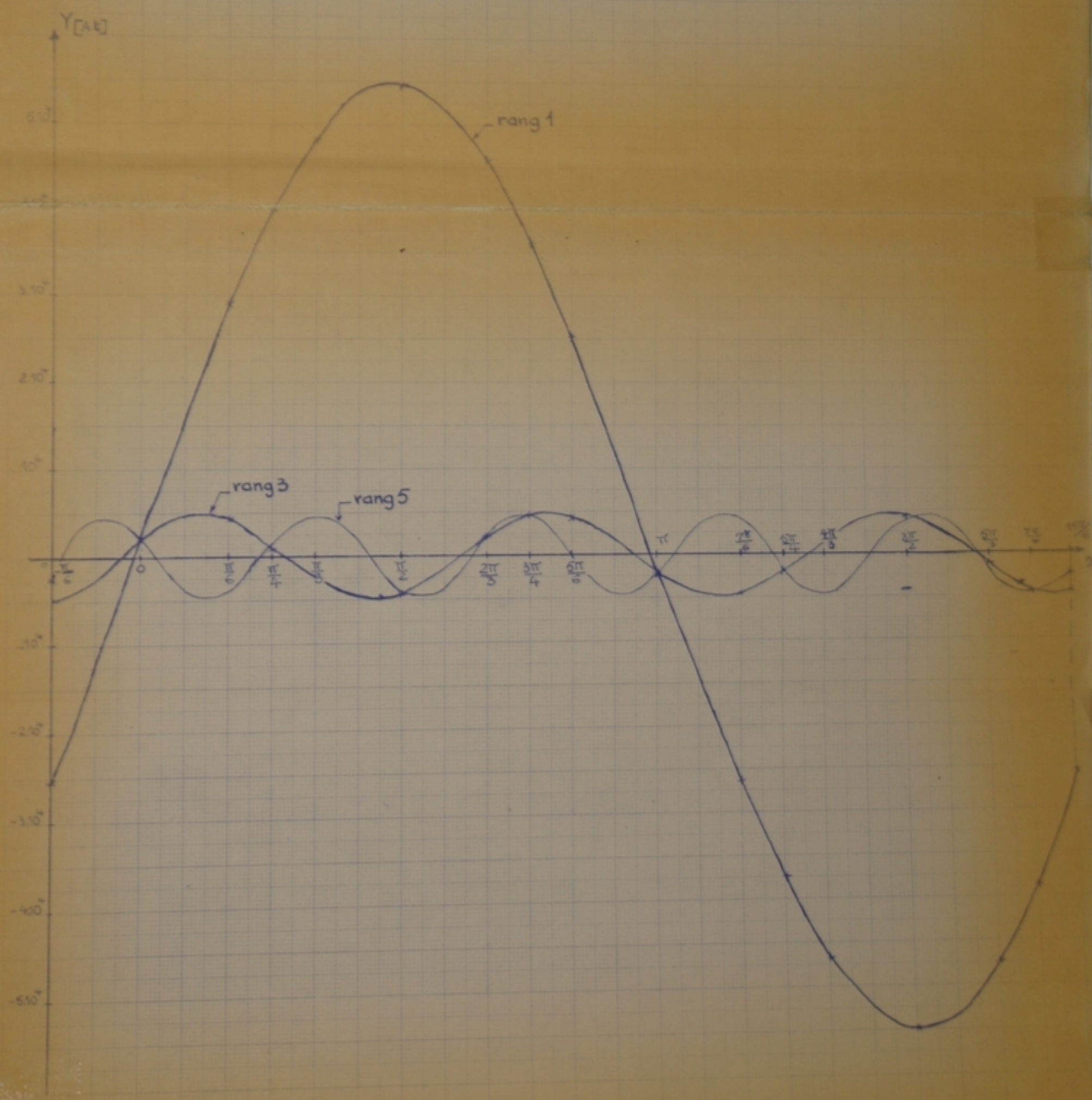
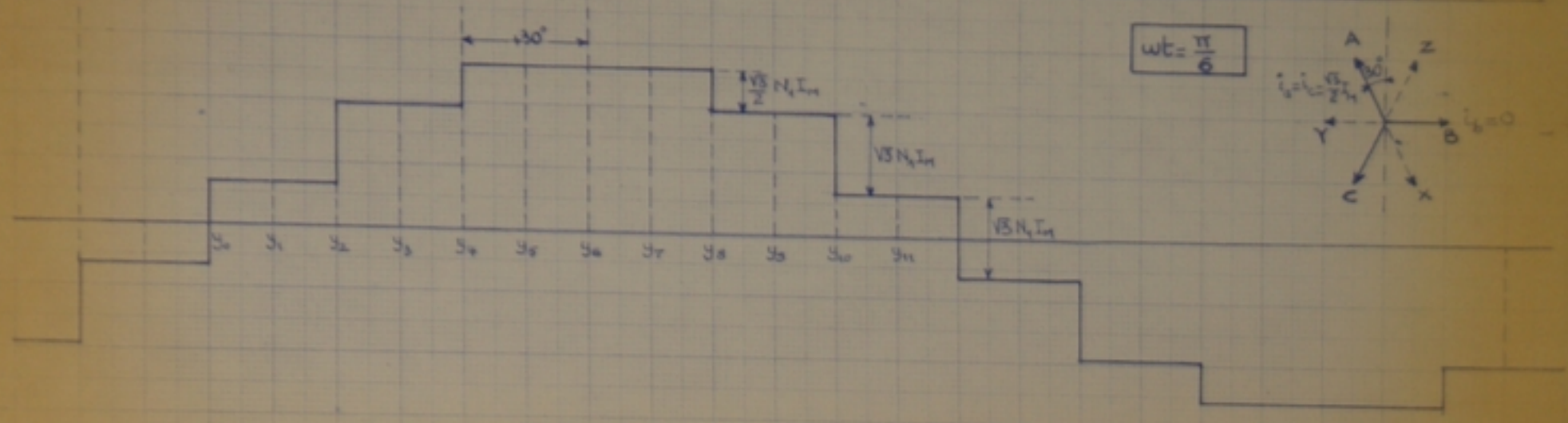
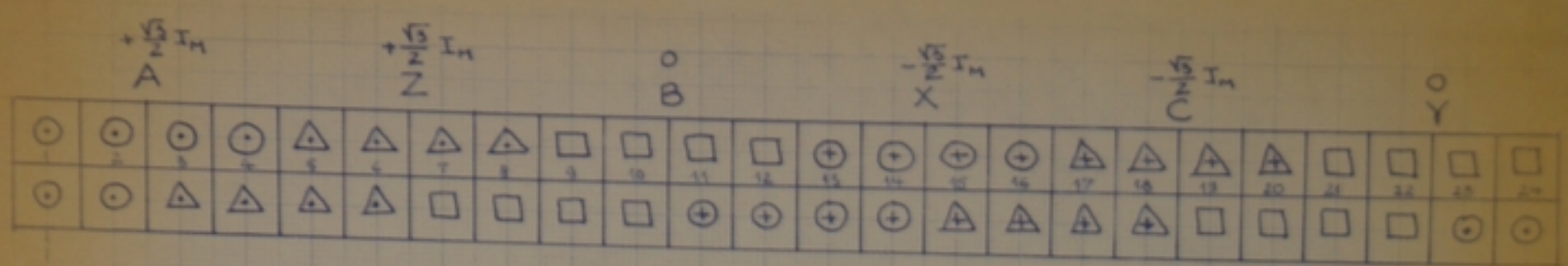
Fig. 1. - [Illegible text]

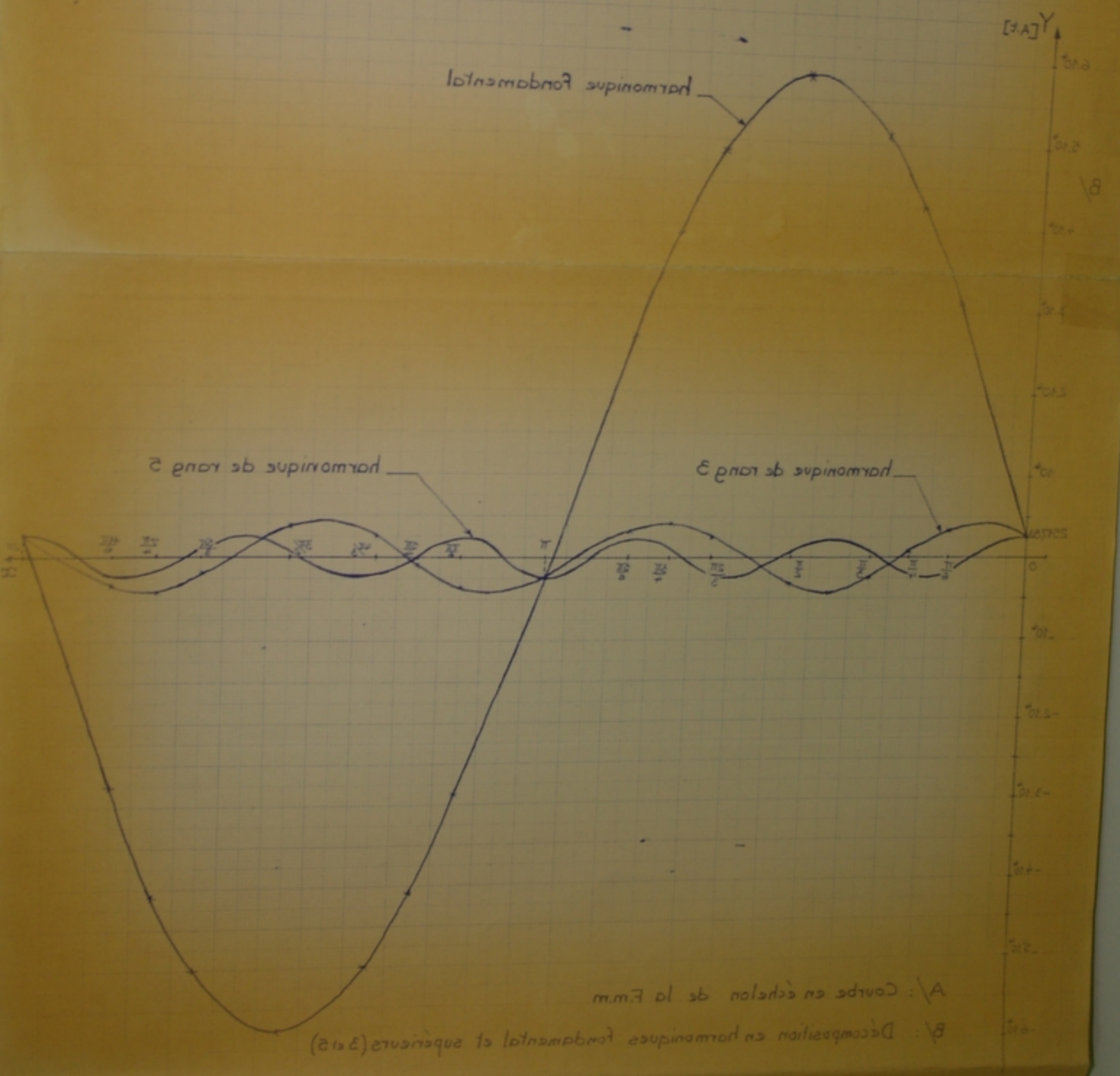
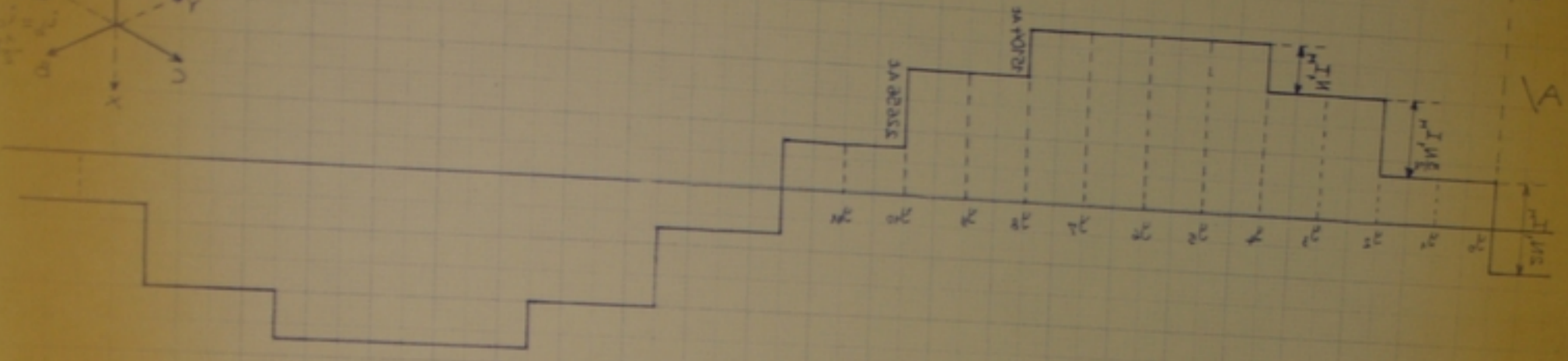
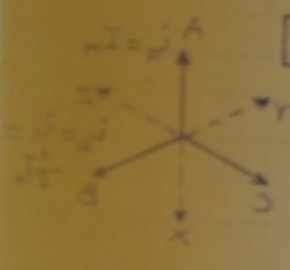
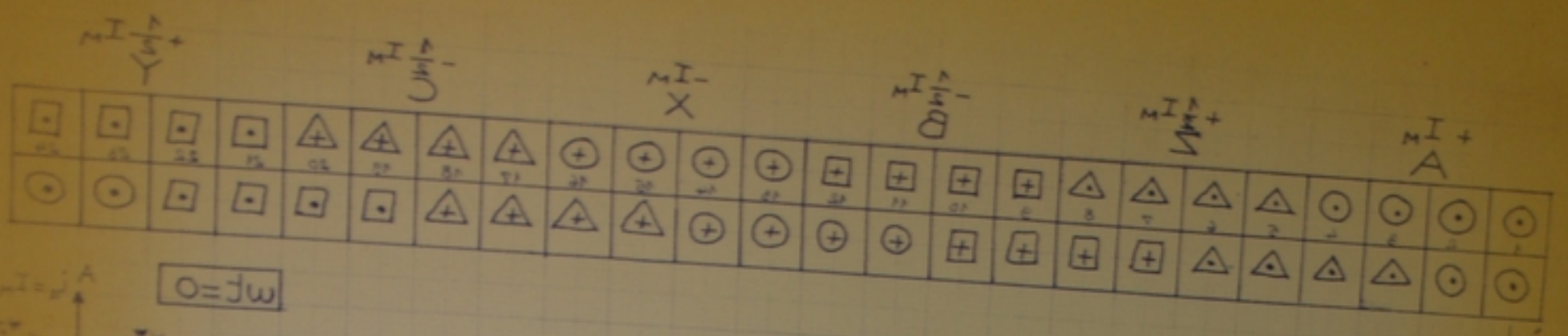
1	Boiler	1
2	Boiler	1
3	Boiler	1
4	Boiler	1
5	Boiler	1
6	Boiler	1
7	Boiler	1
8	Boiler	1
9	Boiler	1
10	Boiler	1
11	Boiler	1
12	Boiler	1
13	Boiler	1
14	Boiler	1
15	Boiler	1
16	Boiler	1
17	Boiler	1
18	Boiler	1
19	Boiler	1
20	Boiler	1

1. [Illegible]
 2. [Illegible]
 3. [Illegible]
 4. [Illegible]
 5. [Illegible]
 6. [Illegible]
 7. [Illegible]
 8. [Illegible]
 9. [Illegible]
 10. [Illegible]
 11. [Illegible]
 12. [Illegible]
 13. [Illegible]
 14. [Illegible]
 15. [Illegible]
 16. [Illegible]
 17. [Illegible]
 18. [Illegible]
 19. [Illegible]
 20. [Illegible]

DIAGRAMME du CERCLE

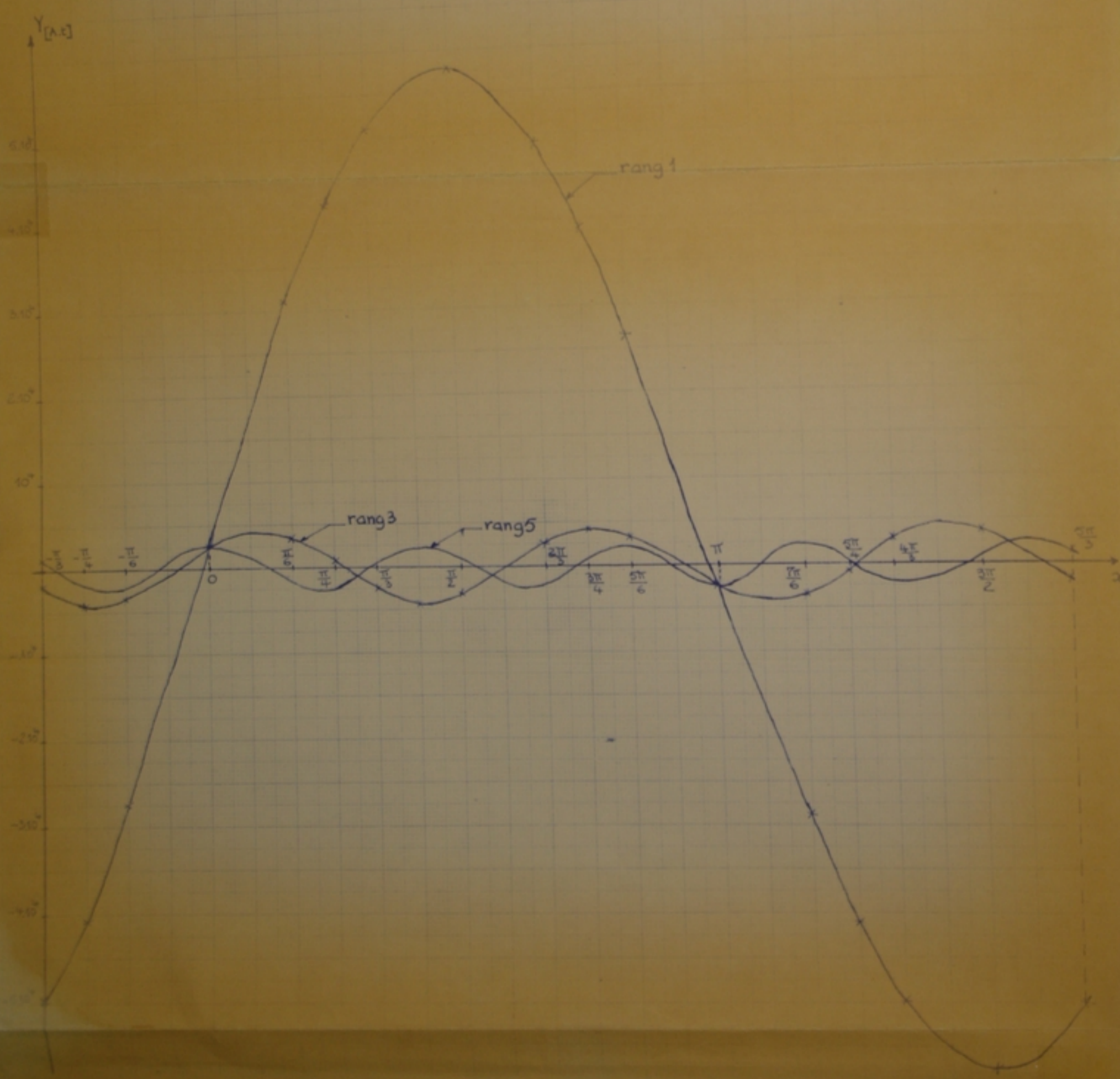
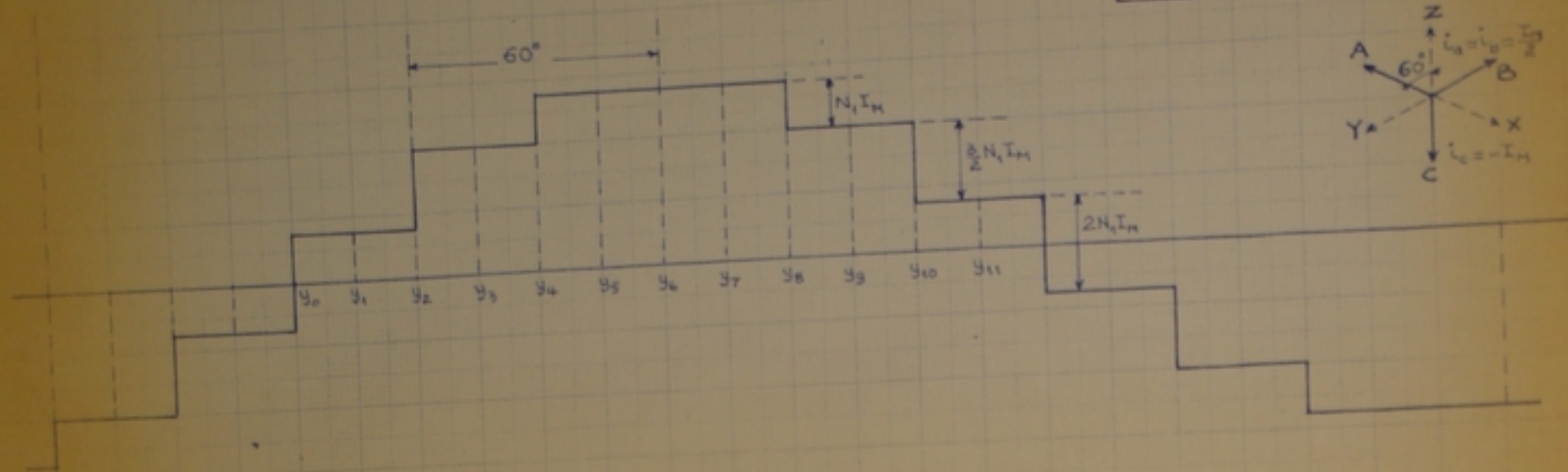
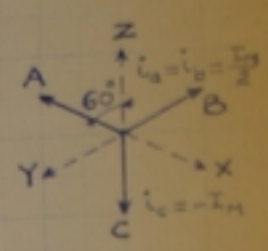


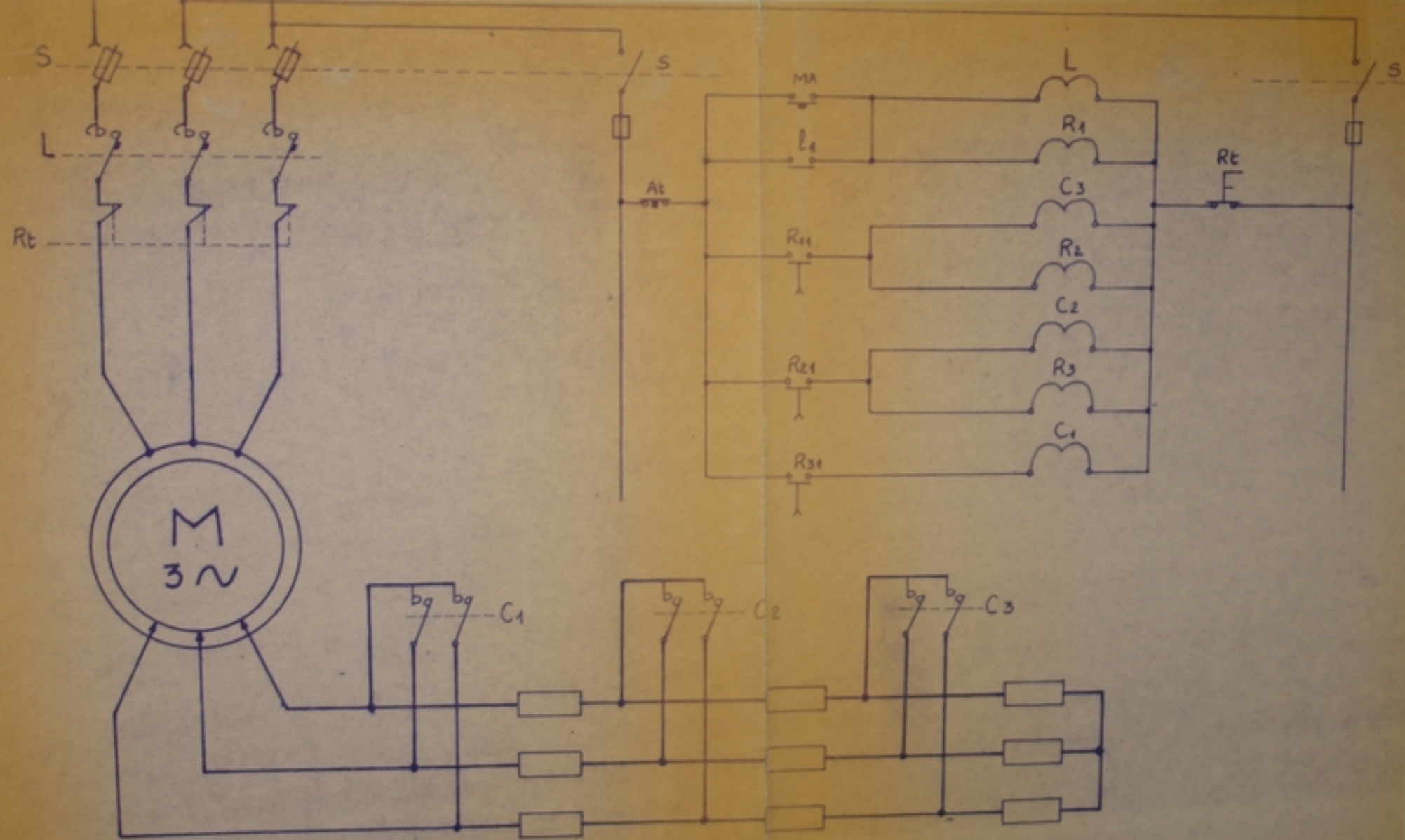




$+\frac{1}{2}I_m$ A		$+I_m$ Z		$+\frac{1}{2}I_m$ O		$-\frac{1}{2}I_m$ X		$-I_m$ C		$-\frac{1}{2}I_m$													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙

$\omega t = \frac{\pi}{3}$





schémas des circuits de puissance et de commande du moteur
 démarrant automatiquement en quatre temps