

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

UNIVERSITE MOULOD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire

De fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme
D'ingénieur d'état en Electrotechnique
Option : Machines Electriques

THÈME

*Elargissement de la puissance d'un
alternateur synchrone à pôles lisses
200 à 250 KVA*

Proposé par :
D J. BEN TAHA

Dirigé par :
M. BELASSEL

Présenté par :
M^{elle} . TEBRI. Z.
M^{elle} .TEZGUINE L.
M. SADOUDI CH.

Promotion 2011/2012

Remerciements

Nous tenons à remercier notre promoteur M. BELASSEL ainsi que notre Co-promoteur Dj. BENTAHA chef de département technique à l'électro-industries, et les prions de bien vouloir trouver ici l'expression de notre profonde gratitude.

De même nous remercions les enseignants qui nous ont aidé tout au long de notre cursus, pour leur aide et nous leur exprimons à cet égard notre sympathie.

Il nous est agréable d'exprimer nos gratitudees à toutes personnes qui de près ou de loin, nous ont toutes apporté un appui morale ou matériel pour mener à bien ce travail qui a été confié dans le cadre de mémoire de fin d'étude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers parents qui m'ont aidé et soutenu durant toute
ma vie ; je leur dis merci du fond du cœur.*

A mes sœurs HALIMA et KARIMA.

A mes neveux NASSIM et WALID.

A ma nièce ELINA

A tous mes cousins et cousines, oncles et tantes.

*A mes chers amis (es) sans citer de nom pour ne pas
oublier d'autre*



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mestrès chère parentes Zohra et Mohammed.

Mes très chers frères Samir et Rafik

Mes chères sœurs Samia, Sadjia, Rachida et Naima

Mes neveux Wassim et Ramdhan

Mes tantes nana Micha et nana Zineb

Mes Tantes Safia, Nacera et Ourida.

Ma Tante Djedjiga, son mari et ses enfants surtout Nacer

Mes cousin et mes consines surtout Nadine et sa maman Lynda

Mon binôme Zizou et sa famille qui a été comme ma 2^{em} famille

Surtout son grand père dada Amar, dada Rachid et nana Saliha

Mon binôme Chouchou et sa famille

Mes amis(es) Sabrina, Badia, Lisa, Dahbia, Djamel et Boussad en

Particulier ma copine de chambre Sab.

8&12

Dédicaces

2011/2012

LYNDA.T

8 & 12

69 5683

sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRAL

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Machines Synchrones

I-1- Introduction.....	2
I-2- Definition	2
I-3 –Constitution	3
I-3-1-Stator.....	3
I-3-2-Rotor	3
I-3-3-Entrefer.....	3
I-3-4-La carcasse	3
I-3-5-Excitatrice.....	4
I-3-6-Circuit magnétique.....	4
I-3-7-Les enroulements	4
I-3-8-L’arbre.....	4
I-3-9-Les paliers	4
I-4-Classifications des machines synchrones	4
I-4-1-Description de la machine synchrone à pôles saillants.....	5
I-4-2- Description de la machine synchrone à pôles lisses.....	5
I.5.Fonctionnement d’un alternateur avec régulation	
I-5-1-Principaux composants de groupe.....	6
I-5-2-Principe de fonctionnement	7
I- 8-Domaine d’application des machines synchrones.....	8
I-9-Avantages et inconvénients des machines synchrones.....	10

CHAPITRE II : Dimensions principales

II-1-Etablissement de la formule de la longueur	12
II-2-Calcul du diamètre intérieur	14
II-3-Dimensionnement du noyau et du l’enroulement statorique.....	15
II-3-1-Enroulement statorique.....	15
II-3-1-1-Nombre d’encoches par pôles et par phase q_s	15
II-3-1-2-Angle électrique séparant deux encoches consécutives.....	15
II-3-1-3-La zone de phase.....	16

II-3-1-4-Courant nominal en charge	16
II-3-1-5-Nombre de conducteur effectifs dans l'encoche	16
II-3-1-6-Nombre de spire par phase de l'enroulement.....	16
II-3-1-7-Section effective d'un conducteur.....	16
II-3-2- Calcul du noyau statorique	19
II-3-2-1-Dimensionnement de la feuille statorique.....	19
1- Largeur de la dent	19
2-La hauteur du dos de stator.....	19
3-Hauteur de la dent du stator.....	20
II-3-2-2-Dimensionnement des encoches.....	20
1- Hauteur de l'encoche statorique	20
2- largeur inferieure de l'encoche.....	20
3- Largeur supérieure de l'encoche	20
4- Section de l'encoche occupé par l'enroulement principale.....	20
5- Section occupé par l'isolation de l'encoche.....	21
II-3-3-coefficient de remplissage	21
II-4- Calcul de l'entrefer	21
II.5. Calcul du noyau rotorique	22
II-5-1-Diamètre extérieur du rotor.....	22
II-5-2-Dimensionnement de la feuille rotorique	22
II-5-2-1-La hauteur de la culasse rotorique.....	22
II-5-2-2-La hauteur de la dent rotorique	22
II-5-2-3- Largeur de la grosse dent	23
II-5-2-4- Largeur de la petite dent	23
II-5-2-5-Section de la grosse dent.....	23
II-5-2-6-Section de la petite dent.....	24
II-5-2-7-Section totale des dents.....	24
II-5-3-Dimensionnement des encoches	24
II-5-3-1-Hauteur de l'encoche	24
II-5-3-2- section de l'encoche occupée par l'enroulement	24
II-5-3-3-section d'encoches occupées par l'isolation	24

CHAPITRE III : Calculs Électromagnétique

III-1-Calcul du circuit magnétique a vide.....	27
--	----

III-1-1-Détermination du flux utile sous un pôle	27
III-1-2- F.m.m dans l'entrefer	27
III-1-3-F.m.m dans la culasse statorique	28
III-1-4-F.m.m dans les dents statoriques	28
III-1-5-F.m.m dans le stator et l'entrefer	29
III-1-6-Le flux rotorique	29
III-1-7- F.m.m dans la culasse rotorique.....	31
III-1-8- F.m.m dans les dents rotoriques.....	31
III-1-9-F.m.m du rotor	32
III-1-10- F.m.m. d'excitation à vide par pole.....	32
III-1-11-Coefficient de saturation	32
III-1-12-Valeur réduite des f.m.m. et des flux en [ur].....	32
III-2-Paramètres de l'enroulement statorique	38
III-2-1-Resistance d'une phase.....	38
III-2-2- Résistance d'une phase en unité relative	39
III-2-3-Réactance de fuite par phase de l'enroulement statorique	39
III-2-4-Réactance de fuite en unité réduite	40
III-2-5-Réactance de potier	40
III-2-6-Réactance de potier en valeur réduite	40
III-3-calcul du circuit magnétique en charge.....	41
III-3-1-Réaction magnétique d'induit.....	41
III-3-2-Détermination de la F.m.m d'excitation en charge.....	41

CHAPITRE IV : DIMENSIONNEMENT DE L'ENROULEMENT D'EXCITATION

IV.1.Introduction.....	47
IV.2.La f.m.m par pôles de l'enroulement d'excitation	47
IV.3.section de l'enroulement d'excitation.....	47
IV.4.Nombre de spires de l'enroulement d'excitation.....	48
IV.5.Nombre de conducteurs par encoches.....	48
IV.6.Resistance de l'enroulement d'excitation	48
IV.7.Courant d'excitation nominale en charge	49
IV.8. Courant d'excitation maximale	49
IV.9. Coefficient de surcharge	49
IV.10. Puissance d'excitation.....	49

IV.11. Coefficient de remplissage de l'encoche rotorique.....	49
---	----

CHAPITRE V : Calcul des pertes et du rendement

V.1. Les pertes magnétiques	52
V.1.1.Pertes dans les dents du stator.....	52
V.1.2.Pertes dans la culasse du stator	53
V.2. Pertes électriques	53
V.2.1. Les pertes joules statoriques	53
V.2.2.Les pertes d'excitation.....	53
V.2.3. Les pertes électriques supplémentaires	53
V.3. Pertes mécaniques	54
V.3.1. Les pertes par frottements et ventilation	54
V.4. Calcul du rendement de la machine	54

<i>CONCLUSION GENERALE</i>	57
---	----

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE

I.1.INTRODUCTION

La machine synchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotation est directement liée à la pulsation des courants induits.

Elle est généralement utilisée comme génératrice (alternateur), ou comme moteur à vitesse d'entraînement constante, et peut être également utilisé comme compensateur d'énergie afin d'améliorer le facteur de puissance des installations électriques.

L'alternateur transforme l'énergie mécanique que lui fournit la machine qui l'entraîne en énergie électrique. Il est conçu pour produire des tensions et des courants sinusoïdaux ; il constitue le support principal dans la production de l'énergie électrique.

La machine synchrone assure également la conversion énergétique inverse en transformant l'énergie électrique en énergie mécanique en fonctionnement moteur. Il est utilisé pour l'entraînement des engins de grandes puissances comme les navires et les trains à grandes vitesses (TGV).

Dans notre étude la machine étudiée est un alternateur à pôles lisses avec amortisseurs.

I.2.Définition

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas.

Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone.

I.3. Constitution

La machine synchrone comporte :

I.3.1. Stator

C'est la partie fixe de la machine, comporte un circuit magnétique constitué par un ensemble de couronnes de tôles de 0.3 à 0.63 mm d'épaisseur, empilées et serrées dans la carcasse. Ces tôles sont encochées intérieurement afin de constituer après leurs assemblages, des rainures pour loger le bobinage, elles sont isolées sur ou deux faces suivant l'importance du flux, par une couche de vernis pour réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis.

Le stator porte un enroulement triphasé, isolé par une matière spéciale. Cet enroulement est disposé d'une manière à donner aux f.e.m induites une valeur bien déterminée et une forme plus proche de la sinusoïde.

I.3.2. Rotor

Le rotor est la partie la plus importante du point de vue mécanique, car sous l'effet de la vitesse, il est exposé à des grandes contraintes mécaniques. Le rotor est formé selon le type d'alternateur, soit par un bloc massif d'acier coulé, soit par un empilage de tôles clavetées sur l'arbre de la machine, et encochées longitudinalement sur la surface extérieur (pôles lisses).

I.3.3. Entrefer

Il est de quelques millimètres d'épaisseur, sépare les pôles inducteurs du noyau d'induit.

I.3.4. La carcasse

C'est l'enveloppe et le support de la machine, protège cette derrière contre les agents extérieurs et contribue à son refroidissement. Pour les petites et moyennes puissances la carcasse est réalisée en métal coulé (fonte, acier, aluminium...).

I.3.5. Excitatrice

Il existe deux modes d'excitation :

a. Mode d'excitation direct (auto-excité)

L'énergie nécessaire à l'excitation de la machine synchrone est prélevée à l'enroulement de l'induit, le redressement du courant alternatif obtenu depuis l'induit étant assuré par des redresseurs à semi-conducteur à diodes. Il existe deux systèmes :

- 1) Système d'excitation balais-bague assure la liaison électrique entre l'induit et l'inducteur.
- 2) L'excitation de l'inducteur principal est assurée par une excitatrice, dont l'induit est monté

sur l'arbre de l'alternateur, et l'inducteur fixe. Le redressement du courant d'excitation est assuré par un pont redresseur tournant, ce système est dit système sans balais-bague.

b. Mode d'excitation indirecte (indépendante)

L'énergie nécessaire à l'alimentation de l'enroulement d'excitation est fournie par une source indépendante de la machine, par exemple, en utilisant une génératrice à courant continu.

I.3.6. Le circuit magnétique

Le circuit magnétique doit assurer la canalisation des lignes d'induction magnétique, le maintien des conducteurs et la conduction thermique vers les zones de refroidissement (entrefer, carcasse).

I.3.7. Les enroulements

Les enroulements véhiculent les courants électriques à l'intérieur de la machine, tel que :

Ø Les enroulements d'induit

Répartis dans les encoches statoriques, sont les sièges des f.e.m et des courants alternatifs.

Ø Les enroulements d'inducteur

Enroulé autour des pôles saillants de la machine, véhicule le courant d'excitation (courant continu).

I.3.8. L'arbre

C'est l'organe de transmission du mouvement de rotation, il supporte le circuit magnétique, l'enroulement inducteur, les bagues, repose sur deux paliers.

I.3.9. Les paliers

Soutiennent le rotor et assurent sa libre rotation, les mouvements axiaux sont bloqués par calage longitudinal sur l'un des paliers, l'autre est libre pour permettre la dilatation thermique de l'arbre.

I.4. Classification des machines synchrones

Dans les machines synchrones il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique :

- Ø Les machines synchrones à inducteur bobiné, à pôles lisses ou à pôles saillants.
- Ø Les machines synchrones à aimants permanents avec ou sans pièces polaires.

Ø Les machines synchrones à reluctance variable.

Nous dans notre étude on s'intéresse uniquement à la machine synchrone à inducteur bobinée, à pôles lisses et à pôles saillants.

I.4.1. Description de la machine synchrone à pôles saillants

La machine synchrone à pôles saillants se présente sous forme d'une pièce massive en acier avec des enroulements, sur la jante du rotor sont fixés des pôles entourés par des bobines d'excitation branchées en série, les extrémités de l'enroulement d'excitation sont connectées à deux bagues calées. Sur l'arbre du rotor, les balais frottant sur les bagues sont connectés à une source de tension continue.

En générale le courant continu nécessité à l'excitation du rotor est fourni par une génératrice de courant continu montée au bout d'arbre du rotor, ou bien obtenu à l'aide d'un redresseur branché à l'enroulement du stator.

La figure ci-dessus montre en coupe une machine synchrone à pôles saillants à quatre pôles :

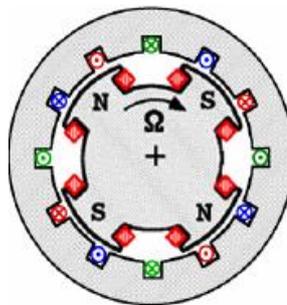


Fig.1. Vue en coupe d'une machine synchrone à pôles saillants.

I.4.2. Description de la machine synchrone à pôles lisses

Le rotor des machines synchrones à pôles lisses est un cylindre en acier ferromagnétique dans lequel ont été fraisées les encoches qui abritent le bobinage inducteur. Ces machines comportent en général deux ou quatre pôles.

Ce type de construction, caractérisé par un entrefer constant, est utilisé pour des machines de fortes puissances destinées à tourner à grandes vitesses.

La figure ci-dessous montre en coupe une machine synchrone bipolaire à pôles lisses.

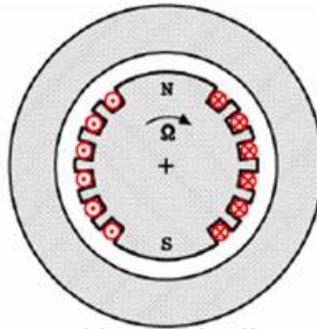


Fig. I.2. Vue en coupe d'une machine synchrone à pôles lisse.

I.5.Fonctionnement d'un alternateur avec régulation :

I.5.1. Principaux composants

Ø L'excitatrice

L'énergie nécessaire pour l'alimentation de l'enroulement d'excitation de la machine principale est fournie par un excitateur à courant alternatif triphasé, le redressement étant assuré par un redresseur rotatif à diode en silicium.

Le système d'excitation est composé de deux ensembles :

- L'induit de l'excitatrice et le pont redresseur sont montés sur l'arbre de l'alternateur, et sont électriquement interconnectés avec l'enroulement d'excitation de l'alternateur.
- L'inducteur de l'excitatrice flasqué sur le palier arrière de l'alternateur est composé de six bobines polaires alimentées en courant continu par le système de régulation.

Ø Le régulateur de tension

Le régulateur de tension génère et régule le courant d'excitation en fonction de la tension de sortie de l'alternateur.

Ø Le régulateur de statisme

Le régulateur de statisme permet la mise en parallèle des groupes électrogène.

Ø Le pont de diode rotatif

Le pont redresseur composé de six diodes est placé à l'arrière de la machine, ce pont (V_2) est alimenté par le courant alternatif de l'induit d'excitateur et le redresse pour alimenter l'inducteur principal.

Ø Le pont de diode fixe

Le pont de diode fixe composé aussi de six diode, permet d'alimenté en courant continu l'inducteur de l'excitatrice, le courant alternatif étant prélevé de l'induit de la machine principale.

Ø Les transformateurs de maintien

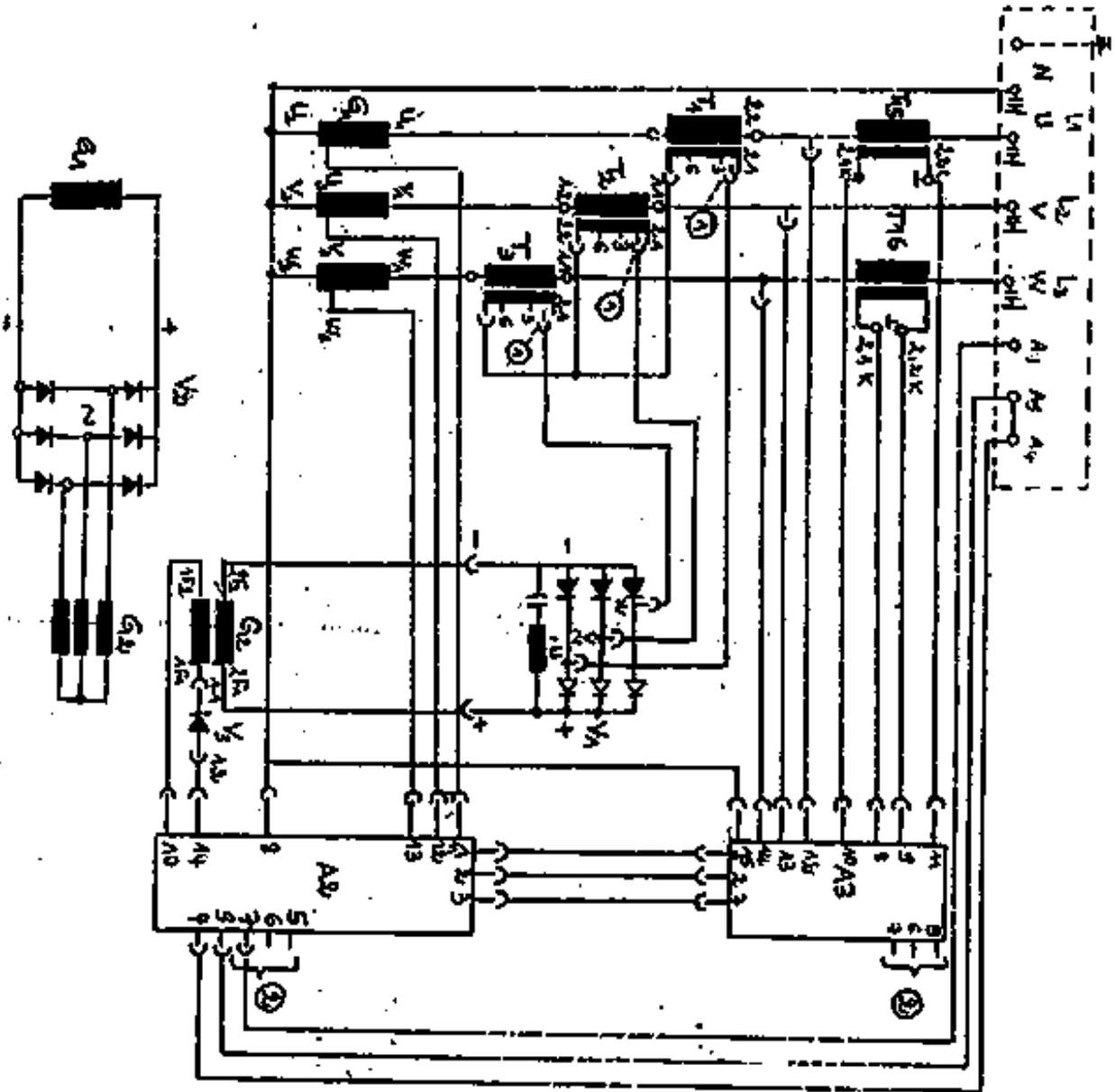
Les transformateurs de courant sont utilisés pour ramener à une valeur facilement mesurable les courants internes des lignes à haute ou à basse tension.ils servent aussi à isoler les appareils de mesure ou de protection des lignes à haute tension. Le primaire de ces transformateurs est monté en série avec la ligne dont on veut mesurer le courant.

I.5.2. Principe de fonctionnement

Le démarrage de la génératrice synchrone n'est pas autonome, pour la mettre en fonctionnement, alors qu'elle n'est pas raccordée au réseau, elle reçoit un couple mécanique à partir d'un moteur thermique qu'est généralement un moteur diesel à une vitesse très proche de la vitesse de synchronisme $\Omega = \omega_0/p$.

la génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme (1500tr/mn), et à partir du flux rémanent qui donne naissance à un champ d'excitation dans l'inducteur de l'excitatrice, ce champ provoque une f.e.m dans l'induit de l'excitatrice qu'est un système triphasé lié à un pont de diodes tournants qui redresse le courant alternatif en courant continu, ce dernier est lié directement à l'inducteur de la machine principale qui induit des f.e.m dans le système triphasé placé au stator.

Schéma électrique d'un alternateur avec régulation



- A₂ Régulateur de tension.
- A₃ module de statisme.
- G₁ machine principale.
- G₂ Excitatrice
- T₁
- T₂ } Transformateur de maintien.
- T₃ }
- T₅ } transformateur de statisme
- T₆ }
- V₁ Redresseur fixe.
- V₂ Redresseur rotatif.
- V₃ Redresseur supplémentaire.

I.6. Domaine d'application des machines synchrones

La quasi-totalité des générateurs des courants alternatifs sont des alternateurs.

L'alternateur transforme en énergie électrique l'énergie mécanique qui lui est fournie par la machine qui l'entraîne ; il est conçu pour produire des tensions et des courants sinusoïdaux. Il constitue le support principal dans la production d'énergie électrique.

Le moteur synchrone effectue la conversion énergétique inverse, il transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

Le moteur synchrone équipe également certains dispositifs dont la vitesse de rotation doit être rigoureusement constante (horloges synchrone.....)

Dans de plus en plus d'applications, et à tous les niveaux de puissances, le moteur synchrone équipé d'un convertisseur électronique adéquat, remplace le moteur synchrone autopiloté ou moteur à courant continu sans balais.

I.7. Avantages et inconvénients des machines synchrones

1. Les avantages

Leurs vitesse est constante quelque soit la charge (ne dépend que de la fréquence).

Elles fonctionnent en compensateur synchrone, ce qui le rend capable d'améliorer le facteur de puissance des installations.

Elles peuvent supporter des chutes de tensions relativement importantes (de l'ordre de 50%, ceci grâce aux possibilités de surexcitation), sans décrocher, en effet, le couple est proportionnel au carré de la tension.

Elles ont un très bon rendement, qui peut aller de 93% jusqu'à 97% pour des puissances nominales allant de 1000 à 3000 MW, le rendement croissant avec la puissance nominale mais dépendant aussi de la vitesse nominale.

L'entrefer mécanique peut être choisi relativement important (du fait qu'on dispose du courant d'excitation pour le magnétiser) ce qui augmente la sécurité mécanique.

2. Les inconvénients

Elles présentent des difficultés de démarrage.

Si le moteur vient à décrocher, il s'arrête et il faut reprendre tout le processus de démarrage.

La présence de l'inducteur à courant continu rend le moteur plus coûteux qu'un moteur asynchrone, il nécessite de plus une alimentation et un réglage de l'excitation.

Utilisation de deux sources de tensions, alternative et continue.

Dans le cas de la machine synchrone, les dimensions principales se sont :

- Ø La longueur du paquet statorique (l_i).
- Ø le diamètre intérieur noté (D_1).

II.1. Etablissement de la formule de la longueur l_i

En régime nominal, la F.e.m. induite de la machine s'écrit :

$$E_n = 4 \cdot K_f \cdot f \cdot K_{en1} \cdot W_1 \cdot \Phi \quad [V] \quad (II.1)$$

Avec

W – le nombre de spires en série d'une phase de l'enroulement statorique.

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

K_{en} – coefficient de l'enroulement statorique.

$$K_{en1} = K_{d1} \cdot K_{r1} \cdot K_{i1} \quad (II.2)$$

K_{d1} – coefficient de distribution donnée par la formule suivante :

$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot q_1 \cdot m_1}\right)} \quad (II.3)$$

K_{r1} – coefficient de raccourcissement qui à comme expression :

$$K_{r1} = \sin\left(\frac{\beta_1 \cdot \pi}{2}\right) \quad (II.4)$$

K_{i1} – coefficient d'inclinaison des encoches défini par :

$$K_{i1} = \frac{\sin(p \cdot \Psi / 2)}{(p \cdot \Psi / 2)} \quad (II.5)$$

f – la fréquence du réseau d'alimentation, elle est donnée comme suite :

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad [Hz] \quad (II.6)$$

n – vitesse de rotation en [tr/mn].

ϕ – Flux utile sous un pôle, il est donné par l'expression

$$\Phi = \tau \cdot \alpha_i \cdot \beta_\delta \cdot L_i \cdot 10^{-6} \quad [Wb] \quad (II.7)$$

Avec :

α_i – coefficient de recouvrement polaire.

On prend $\alpha_i = 0,64$.

B_δ – induction dans l'entrefer, sa valeur est comprise entre $[0,6 \div 0,77]$. voir (figure 1 Annexe).

On prend : $B_\delta = 0,75$ (T).

L_i – longueur de calcul de l'armature magnétique de l'induit en [mm].

τ_1 – Pas polaire donné par la formule suivante :

$$\tau_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.8})$$

D_1 — diamètre intérieur du stator en [mm].

P — nombre de paires de pôles.

Ø On remplace ϕ et τ dans (1) on aura :

$$E_n = 4 \cdot K_f \cdot f \cdot W_1 \cdot \beta_\delta \cdot L_i \cdot 10^{-6} \quad [\text{V}] \quad (\text{II.9})$$

Sachant que la puissance électromagnétique s'écrit :

$$P_e = K_e \cdot \frac{P_n}{\cos(\varphi_n)} \quad [\text{KVA}] \quad (\text{II.10})$$

Avec

P_n — puissance utile en régime nominale en [w].

K_e — coefficient de majoration de la f.e.m. d'induction mutuelle lorsqu'on passe de la marche à vide à la marche en charge de la machine en régime nominal, K_e est compris entre [1,05÷1,08].

$$K_e = \sqrt{\cos^2 \varphi + (\sin \varphi + X_\delta^*)^2} = \frac{E_n}{V_n} \quad (\text{II.11})$$

On prend : $K_e=1,05$.

X_δ^* — Réactance de fuite en unité réduite du stator choisie primitivement.

Sa valeur est donnée en fonction du nombre de paires de pôles :

Pour $2p=4$; $X_\delta^*=0,08$.voire (figure.2. annexe).

Expression du courant nominal :

$$I_n = \frac{A_1 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot m_1 \cdot W_1} \quad [\text{KA}] \quad (\text{II.12})$$

Avec

A_1 — valeur préliminaire de la charge linéaire en [A/m].

$$A_1 = (20000 \div 45000) \quad [\text{A/m}].$$

m_1 — nombre de phase.

Sachant que :

$$P_e = K_e \cdot S_n = K_e \cdot V_{1n} \cdot I_{1n} \cdot m_1$$

et :

$$K_e = \frac{E_n}{V_n} \Rightarrow P_e = E_n \cdot I_n \cdot m_1$$

En remplaçant l'expression du courant I_n dans P_e on aura :

$$P_e = m_1 \cdot E_n \cdot \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A_1}{2 \cdot m_1 \cdot W_1}$$

$$E_n = \frac{2 \cdot W_1 \cdot P_e}{\pi \cdot D_1 \cdot A_1} = 4 \cdot K_{en1} \cdot K_f \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot B_\delta \cdot \alpha_i \cdot \frac{\pi \cdot D_1 \cdot L_i}{2 \cdot p}$$

$$L_i = \frac{P_e}{2 \cdot K_f \cdot K_{en1} \cdot f_1 \cdot \beta_\delta \cdot \pi^2 \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot \frac{\alpha_i}{2 \cdot p}}$$

$$L_i = \frac{P_e}{\pi^2 \cdot \alpha_i \cdot K_{en1} \cdot K_f \cdot A_1 \cdot D_1^2 \cdot \beta_\delta \cdot \frac{n}{60}}$$

$$L_i = \frac{6.1 \cdot 10^{12} \cdot P_e}{K_f \cdot K_{en1} \cdot \beta_\delta \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot \alpha_i \cdot n} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.13})$$

II.2. Calcul du diamètre intérieur du stator

Le diamètre extérieur du stator se calcul à l'aide de la formule suivante :

$$D_1 = K_D \cdot D_{ex1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.14})$$

Avec

D_{ex1} — diamètre extérieur du stator.

K_D est le coefficient du diamètre, il est fonction du nombre de pôles.

Pour $2p=4$ on a K_D est compris entre $[0,64 \div 0,68]$. (figure.5. voir annexe).

Ø Coefficient de longueur l

Après avoir déterminé les dimensions principales, on vérifie le coefficient de longueur λ . la valeur de λ doit tenir compte des contraintes mécanique du rotor.

$$1.8 > \lambda > 1$$

II.3. Dimensionnement du noyau et de l'enroulement statorique

II.3.1. Enroulement statorique

L'enroulement statorique adopté pour notre machine est un enroulement concentrique à deux couches, ces enroulements sont surtout utilisés pour des machines à faible puissance, et surtout pour leur réalisation très simple du point de vue industriel.

II.3.1.1. Nombre d'encoches par pôles et par phase

Le nombre d'encoches qu'occupe chaque phase sous chaque pôle est donnée par la relation suivante

$$q_1 = \frac{Z_1}{2.p.m_1} \quad (\text{II.15})$$

Avec

Z_1 – nombre d'encoches statoriques, dans notre cas $Z_1=48$.

m_1 – nombre de phase statoriques avec $m_1=3$.

Ø **Pas dentaire** : c'est la distance entre les axes de deux encoches successives :

$$t_1 = \frac{\pi.D_1}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.16})$$

II.3.1.2. Angle électrique séparant deux encoches consécutives

$$\gamma = p \cdot \frac{360}{Z_1} \quad (\text{II.17})$$

Ø **Le pas de l'enroulement** :

$$Y_1 = \frac{Z_1}{2.P} \pm \varepsilon \quad (\text{II.18})$$

Si on a :

+ ε : alors le pas est allongé.

- ε : alors le pas est raccourci.

Dans notre cas l'enroulement est a pas raccourci ε vaut 2.

Ø **Le pas d'encoche**:

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

$$\tau_{e1} = \frac{Z_1}{2.p} \quad (\text{II.19})$$

Ø Le pas relatif à l'enroulement :

$$\beta_1 = \frac{y_1}{\tau_{e1}} \quad (\text{II.20})$$

II.3.1.3. La zone de phase

$$\alpha = q_1 \cdot \gamma \quad (\text{II.21})$$

II.3.1.4. Courant nominal en charge I_{1n}

$$I_{1n} = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot V_{1n} \cdot \cos \varphi} \quad [\text{KA}] \quad (\text{II.22})$$

Avec

V_{1n} – tension simple en charge de la machine

$\cos \varphi$ – facteur de puissance de la machine.

II.3.1.5. Nombre de conducteur effectifs dans l'encoche

$$U_{en1} = \frac{a_1 \cdot t_1 \cdot A_1 \cdot 10^{-3}}{I_{1n}} \quad [\text{Conducteur}] \quad (\text{II.23})$$

La valeur de U_{en1} doit être arrondie à un nombre entier.

a_1 – nombre de branches parallèles de l'enroulement statorique. Dans le cas de notre étude $a_1 = 4$, c'est à dire que toutes les bobines d'une phase sont connectées en parallèles.

II.3.1.6. Nombre de spires par phase de l'enroulement

$$W_1 = \frac{U_{en1} \cdot p \cdot q_1}{a_1} \quad [\text{Spires}] \quad (\text{II.24})$$

II.3.1.7. Section effective d'un conducteur

$$S_{eff1} = \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot j_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.25})$$

j_1 – densité du courant en $[\text{A}/\text{mm}^2]$ choisie en fonction de la puissance de la machine du degré de protection et de la classe d'isolation.

Pour une tension inférieure à 600[V], une classe d'isolation F et un degré de protection IP23, j_1 varie de $[2,5 \div 7]$.

Pour pouvoir former des bobines maniables et faciles à placer dans les encoches, on divisera la section du conducteur effectif en un nombre entier « n_{el} » de sections élémentaires dans le cas ou celui-ci dépasserait les 1.8 $[\text{mm}^2]$.

Ainsi, on évitera les grands diamètres qui provoqueraient la circulation des courants périphérique (effet de peau) qui créeraient à leur tour des pertes par échauffement. Bien que le fil est coûteux.

$$S_{el1} = \frac{S_{eff1}}{n_{el}} \quad [mm^2] \quad (II.26)$$

n_{el} — nombre de conducteurs élémentaires.

S_{eff1} : section effective du conducteur.

Ø Vérification de la charge thermique spécifique $A_1 \cdot j_1$:

Après avoir fixé la valeur de la densité du courant, on procède à la vérification de la charge thermique spécifique pour prévoir une éventuelle sur-augmentation de la température au niveau du stator. Elle se fait par le produit de A_1 fois j_1 qui doit vérifier la condition :

$$A_1 \cdot j_1 \leq 2700 \text{ (A/cm.mm}^2\text{)}. \quad (\text{Voire figure.3. annexe}).$$

Ø Vérification des charges électromagnétiques:

Une fois les valeurs préliminaire des paramètres électromagnétiques sont choisies, on procède à la vérification de ces dernières. la variation des valeurs recalculées par rapport à leurs valeurs préliminaire ne doit pas dépasser 10% de ces dernières.

Ø La charge linéaire :

$$A_1 = \frac{I_{1n} \cdot U_{en1} \cdot Z_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad [A/m] \quad (II.27)$$

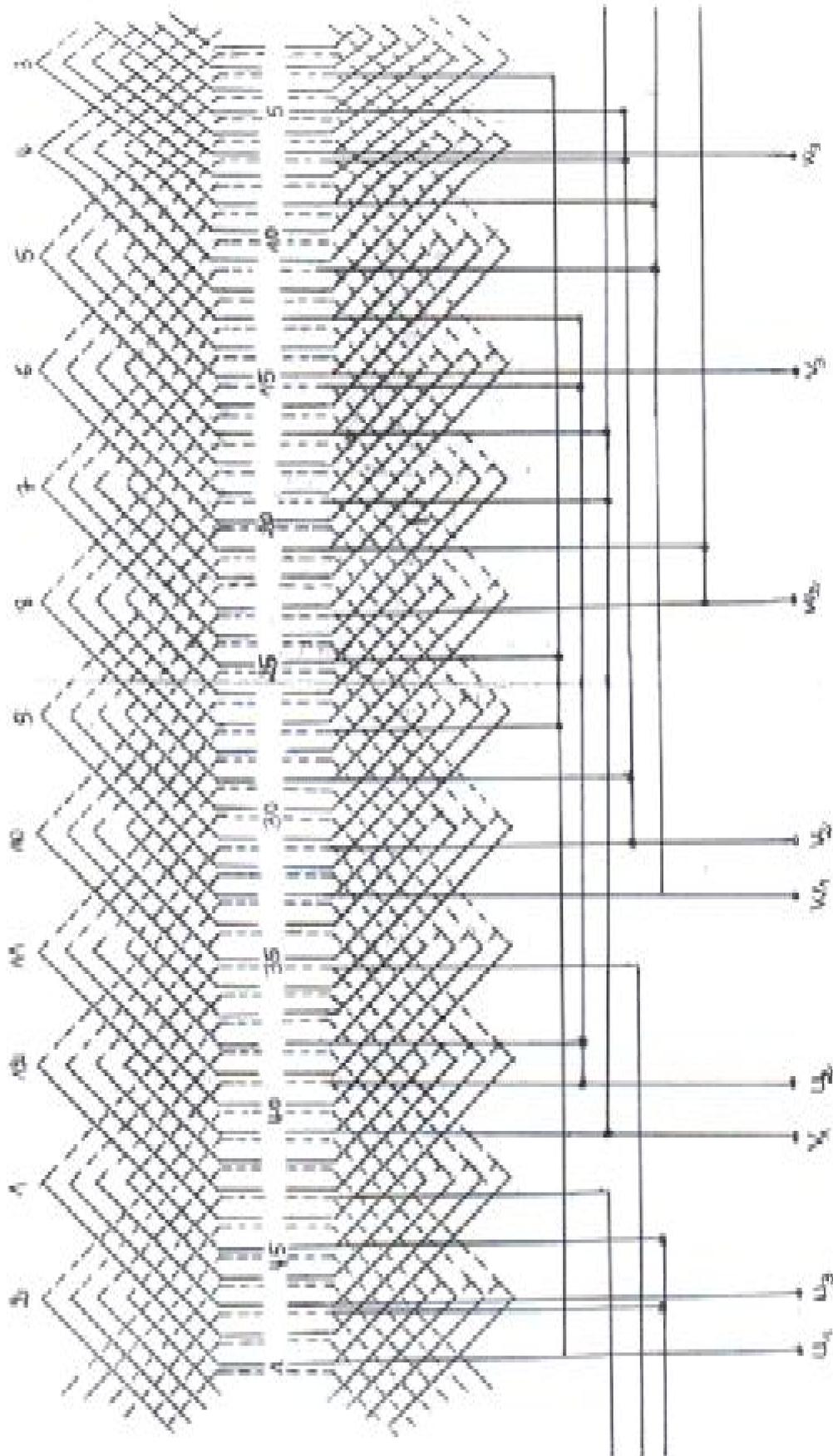
Ø Induction dans l'entrefer :

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau \cdot D_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-6}} \quad [T] \quad (II.28)$$

Ø Densité du courant en $[A/mm^2]$:

$$j_1 = \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot S_{el1} \cdot n_{el}} \quad [A/mm^2] \quad (II.29)$$

S_{el1} — section du conducteur normalisée la plus proche de la section calculée. Ce qui nous autorisera à prendre pour la suite des calculs cette valeur de la section normalisée. (Voir tableau des sections normalisées).



Enroulement concentrique à deux couches

Z =48 encoches, 2p=4, m=3, q=4, —

II.3.2. Calcul du noyau statorique

II.3.2.1. Dimensionnement de la feuille statorique

Pour pouvoir loger l'enroulement induit dans les encoches statoriques, on est appelé à connaître certains détails sur la feuille statorique, ainsi que le type d'encoche utilisées. En fonction de la puissance et de la tension de la machine, les différentes formes d'encoches sont :

- Ø Ouvertes.
- Ø Semi-ouvertes.
- Ø Fermées.
- Ø Semi-fermées.

Dans notre cas d'étude, les encoches utilisées sont des encoches de forme trapézoïdales et de type semi-fermées à fond arrondi sans clavette, dont leur forme géométrique nous permet d'avoir la largeur de la dent constante.

1. Largeur de la dent

Cette largeur est déterminée en fonction de l'induction dans l'entrefer et de l'induction maximale admissible dans la dent pour éviter une forte saturation :

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.30})$$

Avec :

B_{z1} — induction maximale admissible dans la dent statorique en [T].

$$1.3 \leq B_{z1} \leq 2$$

t_1 — pas d'entaine.

K_{fer} — facteur de remplissage du paquet statorique et rotorique.

$K_{fer} = 0,95$ pour l'isolation avec oxydation.

$K_{fer} = 0,97$ pour l'isolation en vernie.

On prend : $K_{fer} = 0,97$.

2. La hauteur du dos du stator

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{c1} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot \beta_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.31})$$

Avec :

B_{c1} – induction magnétique dans la culasse statorique.

On a $1,1 \leq B_{c1} \leq 1,75$.

3. Hauteur de la dent du stator

Elle se calcul à l'aide de la formule suivante :

$$h_{z1} = \frac{(D_{ex1} - D_1)}{2} - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.32})$$

II.3.2.2 Dimensionnement des encoches

1. Hauteur de l'encoche statorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{enc1} = h_{z1} - h_{f1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.33})$$

Avec :

h_{f1} – la hauteur de la fente.

2. largeur inférieure de l'encoche

Elle se calcul comme suite :

$$b_{enc1} = \left[\frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{f1})}{Z_1} \right] - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.34})$$

3. Largeur supérieure de l'encoche

Elle se calcul comme suite :

$$b_{enc2} = \left[\frac{\pi \cdot [D_1 + 2 \cdot (h_{f1} + h_1 + e_1)]}{Z_1} \right] - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.35})$$

Avec :

e_1 – épaisseur du papier isolant de la fermeture d'encoche qui vaut $e_1 = 1$ mm.

h_1 – hauteur trapézoïdales de l'encoche, elle donnée par la formule suivante

$$h_1 = h_{enc1} - e_1 - \frac{b_{enc2}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.36})$$

4. Section de l'encoche occupé par l'enroulement principale

Elle donnée par la formule suivante :

$$S_{enc1} = \frac{(b_{enc2} + b_{enc1})}{2} \cdot h_1 + \left[\frac{\pi \cdot b_{enc2}^2}{8} \right] \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.37})$$

5. Section occupé par l'isolation de l'encoche :

Celle-ci est donnée par la formule suivante

$$S_{iso} = \left[2 \cdot h_1 + \pi \cdot \frac{b_{enc2}}{2} \right] \cdot e + e_1 \cdot b_{enc1} \quad [mm^2] \quad (II.38)$$

Avec

e — épaisseur du papier isolant qui vaut : $e=0,25$.

Ø Autre dimensions :

b_{f1} : largeur de la fente.

h_{k1} : hauteur de la clavette (dans notre étude $h_{k1}=0$)

II.3.3. Coefficient de remplissage

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

$$K_{ra} = \frac{n_{el} \cdot U_{enc1} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1} - S_{iso}} \quad (II.39)$$

Pour les encoches statoriques le coefficient de remplissage il est compris entre [0.7 ;0.75].

II.4. Calcul de l'entrefer

L'entrefer des machines électriques présente une grande importance car un faible entrefer diminue la chute de tension magnétique dans ce dernier, mais il accentue la réaction magnétique ce qui déforme davantage la forme du champ d'excitation en charge, et un grand entrefer réduit les effets de la réaction magnétique d'induit mais il augmente la force magnétomotrice d'excitation.

L'entrefer est donné par la formule suivante :

$$\delta = \frac{36 \cdot 10^{-8} \cdot \tau_1 \cdot A_1}{X_a^* \cdot B_\delta} \quad (II.40)$$

Dans notre cas l'entrefer a été fixé par ENEL a 1,1 mm.

Avec

X_a — réaction inductive de réaction d'induit en unité relative [ur].

II.5. Calcul du noyau rotorique

II.5.1. Diamètre extérieur du rotor

Il est donné par l'expression suivante :

$$D_{ex2} = D_1 - 2 \cdot \delta \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.41})$$

D_1 — diamètre intérieur du stator

Dans le cas des alternateurs à pôles lisses, pour rendre la forme de l'induction plus voisine de la sinusoïde, l'enroulement d'excitation est du type concentrique, il est distribué convenablement dans plusieurs encoches, une partie seulement des encoches est bobinée. Les encoches situées au milieu des bobines ne sont pas utilisées, elles sont supprimées pour former des grandes dents. En agissant sur l'écartement entre les encoches et le nombre de conducteurs par encoches, on aura une forme proche de la sinusoïde.

Dans le cas des alternateurs à pôles saillants, pour que l'induction s'approche de la forme sinusoïdale, on donne aux épanouissements polaires un rayon de courbure plus faible que celui de l'armature de l'induit, ce qui a pour effet de décroître l'induction depuis l'axe des pôles jusqu'aux bords des épanouissements polaires.

II.5.2. Dimensionnement de la feuille rotorique

Les feuilles du paquet rotorique sont fabriquées avec des tôles magnétiques d'épaisseur de 0.5 mm.

II.5.2.1. La hauteur de la culasse rotorique

Elle est donnée par la formule suivante :

$$h_{c2} = \frac{0.5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot \beta \delta}{K_{fer} \cdot B_{c2}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.42})$$

Avec

B_{c2} — induction admissible dans la culasse rotorique.

τ_2 — pas polaire qui se calcul comme suite :

$$\tau_2 = \pi \cdot \frac{D_{ex2}}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.43})$$

Dont :

D_2 : diamètre intérieur du rotor en [mm].

II.5.2.2. La hauteur de la dent rotorique

$$h_{z2} = \frac{(D_{ex2} - D_2)}{2} - h_{c2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.44})$$

Avec

D_{ex2} — diamètre extérieur du rotor.

II.5.2.3. Largeur de la grosse dent

Elle est donnée par la formule suivante :

$$b_{zg} = 4 \cdot t_2 - b_{en2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.45})$$

Avec

b_{en2} — largeur maximale de l'encoche.

t_2 — pas dentaire rotorique, qui est donné par la formule suivante :

$$t_2 = \pi \cdot \frac{D_{ex2}}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.46})$$

II.5.2.4. Largeur de la petite dent

La largeur de la grosse dent se calcule comme suite :

$$b_{zp} = t_{z2} - b_{en2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.47})$$

Dont :

$$t_{z2} = \pi \cdot \frac{(D_{ex2} - b_{en2} - 2 \cdot h_{f2})}{Z} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.48})$$

Avec

h_{f2} — hauteur de la fente de l'encoche rotorique.

Z — nombre d'encoches rotorique totale sans grosse dent.

II.5.2.5. Section de la grosse dent

$$S_{zg} = \frac{\pi \cdot (1 - \rho) \cdot D_{0.2} \cdot L_i}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.49})$$

Avec

ρ — longueur relative de la partie bobinée au pas polaire.

On prend $\rho = 2/3$.

$D_{0.2}$ — diamètre d'une surface qui se situe à la distance de $0.2 h_{z2}$ des bases des dents.

$$D_{0.2} = D_{ex2} - 2 \cdot h_{z2} + 2 \cdot 0.2 \cdot h_{z2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.50})$$

II.5.2.6. Section de la petite dent

Elle se calcule par la formule suivante :

$$S_{zp} = \frac{Z_2}{2.p} \cdot L_i \cdot b_{zp} \cdot (0,715 \cdot \rho) \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.51})$$

II.5.2.7. Section totale des dents

C'est la somme de sections des grosses dents des petites dents.

$$S_z = S_{zp} + S_{zg} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.52})$$

II.5.3. Dimensionnement des encoches

Les encoches rotorique se sont des encoches ovale semi fermé.

II.5.3.1. Hauteur de l'encoche

Elle se calcul comme suite :

$$h_{enc2} = h_{z2} - (h_{f2} + h_{k2}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.53})$$

Avec

h_{k2} — la hauteur de la clavette.

II.5.3.2. section de l'encoche occupé par l'enroulement

$$S_{enc2} = \left[\frac{b_{enz} + b_2}{2} \right] \cdot h_{22} + \left[\pi \cdot \frac{b_2^2}{8} \right] + \left[\frac{b_{en1} + b_{enz}}{2} \right] \cdot h_{21} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.54})$$

Avec

b_2 – diamètre de fond d'encoche.

b_{en1} – largeur minimale de l'encoche.

h_{21} – hauteur du premier trapèze qui vaut $h_{21}=11$ mm.

h_{22} – hauteur du deuxième trapèze qui se calcul comme suite :

$$h_{22} = h_{enc2} - \left(h_{21} + \frac{b_2}{2} \right) \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.55})$$

II.5.3.3 section d'encoches occupées par l'isolation :

$$S_{iso2} = (\pi \cdot r_2 + 2 \cdot h_{22} + 2 \cdot h_{21}) \cdot e + b_{en1} \cdot e_1 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.56})$$

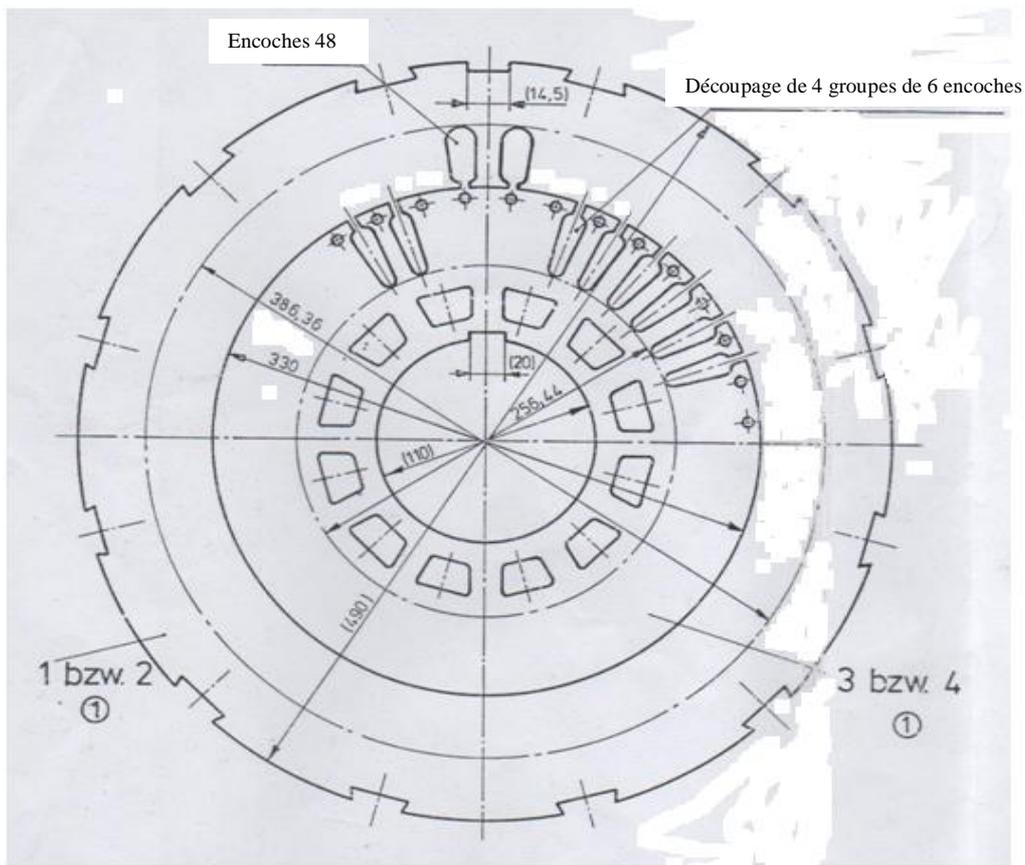


Figure .1. Tôle rotorique et statorique

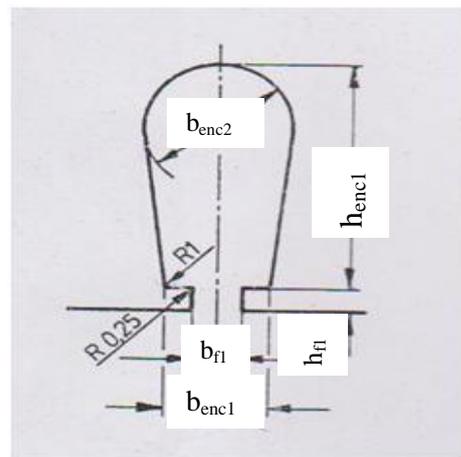
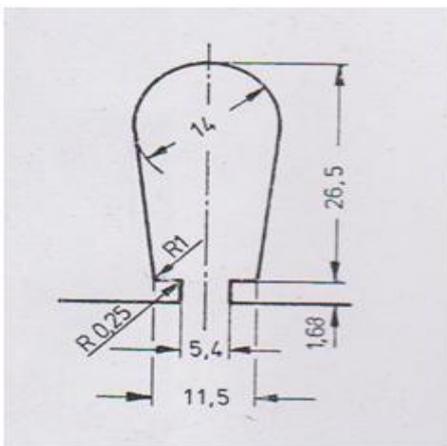


Figure .2. Encoche statorique



Figure.3. Encoche rotorique.

Remarque : Les dimensions des trois courbes sont données sans échelle.

III.1. Calcul du circuit magnétique à vide

Le calcul du circuit magnétique est effectué en marche à vide, pour déterminer le courant d'excitation ou la f.m.m d'excitation qui engendre le champ magnétique d'induction mutuelle.

La loi de la circulation du champ magnétique constitue la base du calcul du circuit magnétique, elle s'énonce comme suite

La circulation du champ magnétique (H) le long d'une ligne fermée est égale au volume du courant (ou f.m.m) couplé avec cette ligne

$$\int H \cdot dl = F$$

H — l'intensité du champ magnétique.

dl — l'élément de longueur de la ligne du champ magnétique.

Pour faciliter ce calcul, on subdivise le circuit magnétique en tronçons élémentaires de sorte que la valeur du champ dans chaque élément soit constante.

L'intégral se ramène à la somme suivante :

$$F = \sum_i^n H_i \cdot L_i$$

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

L_i — représente la ligne moyenne du tronçon choisi.

Le circuit magnétique de la machine est constitué de cinq tronçons :

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

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

Le circuit magnétique d'une machine à pôles lisses présente certaines particularités dans la seule région du rotor. Son calcul en marche à vide est analogue à celui d'une machine à pôles saillants, à condition de prendre les particularités de la machine à pôles lisses.

Les résultats des calculs que nous effectuerons nous permettront de tracer la caractéristique à vide $E_0=f(F_{ex})$ ainsi que les caractéristiques partielles notamment :

$$\Phi_u = f(F_{\delta ZC})$$

$$\Phi_\sigma = f(F_{\delta ZC})$$

$$\Phi_2 = f(F_{ZC})$$

$$\Phi_u = f(F_\delta)$$

III.1.1. Détermination du flux utile sous un pôle

Il se calcule comme suite :

$$\Phi_u = \frac{E_n}{4 \cdot K_f \cdot K_{en1} \cdot W_{1.f1}} \quad [\text{Weber}] \quad (\text{III.1})$$

III.1.2. Fmm dans l'entrefer

La fmm dans l'entrefer est donnée par la formule suivante

$$F_\delta = 0.8 \cdot \delta \cdot B_\delta \cdot K_\delta \cdot 10^3 \quad [\text{A}] \quad (\text{III.2})$$

Avec

K_δ — Coefficient de carter, par lequel il faut multiplier l'entrefer réel pour avoir l'entrefer de calcul, il est donné par la relation suivante

$$K_\delta = K_{\delta1} \cdot K_{\delta2} \cdot \rho + K_{\delta1} \cdot (1 - \rho) \quad (\text{III.3})$$

Dont

$K_{\delta1}$ — coefficient qui tient compte des encoches statoriques, qui se calcule comme suite :

$$K_{\delta1} = 1 + \frac{b_{f1}}{[t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_1}{b_{f1}}]} \quad (\text{III.4})$$

$K_{\delta2}$ — coefficient qui tient compte des encoches rotoriques qui vaut :

$$K_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{f2}}{[t_2 - b_{f2} + \frac{5 \cdot \delta \cdot t_2}{b_{f2}}]} \quad (\text{III.5})$$

Ø Vérification de l'induction dans l'entrefer :

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_n \cdot 10^6}{S_{\delta}} \quad [\text{T}] \quad (\text{III.6})$$

S_{δ} — surface virtuelle de l'entrefer :

$$S_{\delta} = \alpha_i \cdot \tau_1 \cdot (L_i + 2 \cdot \delta) \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III.7})$$

III.1.3.F.m.m dans la culasse statorique

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{c1} = L_{c1} \cdot H_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.8})$$

Avec

H_{c1} — est la valeur du champ correspondant à l'induction B_{c1} qui sera lue sur le tableau de magnétisation des dos des machines à courant alternatif (T2).

L_{c1} — longueur moyenne des lignes de champ dans le dos statorique. Son expression est :

$$L_{c1} = \pi \cdot \frac{(D_{ex1} - h_{c1})}{2 \cdot p} \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.9})$$

a. Induction dans la culasse statorique

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

$$B_{c1} = \frac{\alpha_i \cdot \tau \cdot B_{\delta}}{2 \cdot K_{fer} \cdot h_{c1}} \quad [\text{T}] \quad (\text{III.10})$$

$h_{c1} = 51.82$ [mm].

On a $1,1 \leq B_{c1} \leq 1,75$.

III.1.4.Fmm dans les dents statoriques

Elle est donnée en fonction de l'intensité du champ magnétique dans une section de la dent par la hauteur de celle-ci :

$$F_{z1} = h_{z1} \cdot H_{z1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.11})$$

Avec

H_{z1} — l'intensité du champ magnétique dans la dent qui correspond à B_{z1} . qui sera lue sur le tableau de magnétisation des dents des machines à courant alternatif (T1).

h_{z1} — hauteur de la dent statorique.

a. Induction dans la dent statorique

L'induction est déterminée en partant de la continuité du champ magnétique et de la conservation du flux dans toutes les sections du pas dentaire.

Puisque la perméabilité du fer est infiniment grande devant celle de l'air, on considère que le flux magnétique d'un pas dentaire calculé en fonction de l'induction dans l'entrefer, passe en totalité dans la dent et ne traverse ni les encoches ni les isolants qui séparent les tôles magnétiques.

$$\Phi_{z1} = B_{z1} \cdot K_{\text{fer}} \cdot L_i \cdot b_{z1} \quad (\text{Flux traversant la dent})$$

$$\Phi = B_{\delta} \cdot L_i \cdot t_1 \quad (\text{Flux correspondant à un pas dentaire})$$

Ainsi l'équivalence des flux nous donnent :

$$B_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_{\delta}}{K_{\text{fer}} \cdot b_{z1}} \quad [\text{T}] \quad (\text{III.12})$$

III.1.5.F.m.m dans le stator est de l'entrefer

Elle est calculée par l'expression suivante :

$$F_{\delta zc} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{c1} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.13})$$

III.1.6.Le flux rotorique

Pour déterminer le flux Φ_2 dans la base des dents du rotor il faut ajouter au flux Φ_u le flux de dispersion Φ_{σ} qui se calcul comme suite :

$$\Phi_2 = \Phi_{\sigma} + \Phi_u \quad [\text{Weber}] \quad (\text{III.14})$$

Avec

Φ_u — flux utile par pôles (III.1).

Ø Le flux de dispersion Φ_σ :

Le flux de dispersion se calcule à l'aide des mêmes formules que dans les machines à pôles saillants, il est aussi proportionnel à la tension magnétique $F_{\delta_{zc}}$ et au coefficient de conductivité magnétique λ_ϕ ce dernier est relativement plus petit dans les machines à pôles lisses.

Il est donné par l'expression suivante :

$$\Phi_\sigma = u_0 \cdot \lambda_\phi \cdot L_i \cdot F_{\delta_{zc}} \cdot 10^{-3} \quad [\text{Weber}] \quad (\text{III.15})$$

Avec

u_0 — Perméabilité du vide tel que ;

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

$F_{\delta_{zc}}$ — f.m.m dans le stator et l'entrefer.

λ_ϕ — coefficient de conductivité magnétique il dépend de la forme et du nombre d'encoches du rotor placées sur le parcours du flux de dispersion entre deux grandes dents consécutives de polarités inversées. Il peut être calculé avec la formule suivante :

$$\lambda_\phi = \frac{8 \cdot p}{z_2} \cdot (\lambda_e + \lambda_t) \quad (\text{III.16})$$

λ_e — est le coefficient de conductivité de l'encoche du rotor pour le flux de dispersion,

$$\lambda_e = \left(\frac{h_{11}}{2 \cdot b_{en2}} \right) + \left(\frac{h_2}{b_{en2}} \right) \quad (\text{III.17})$$

Avec

h_2 — dimension suivant la hauteur de l'encoche correspondant à ses parties non occupées par les conducteurs.

$$h_2 = h_{k2} + h_{f2} + e_1 \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.18})$$

h_{11} — dimension suivant la hauteur de l'encoche correspondant à ses parties occupées par les conducteurs.

$$h_{11} = h_{enc2} - e_1 \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.19})$$

λ_t — Est le coefficient de conductivité des têtes des dents du rotor pour le flux de dispersion.

$$\lambda_t = 0.2 + \frac{\delta}{2.t_2} \quad (\text{III.20})$$

III.1.7.F.m.m dans la culasse rotorique

La f.m.m. dans la culasse est donnée par la formule suivante :

$$F_{c2} = L_{c2} \cdot H_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.21})$$

Avec

H_{c2} — est la valeur du champ correspondant à l'induction B_{c2} qui sera lue sur le tableau de magnétisation de base des machines à courant alternatif (T3).

L_{c2} — longueur moyenne des lignes de champ dans le dos. Son expression est :

$$L_{c2} = \left[\frac{(D_{ex2} - 2.h_{z2})}{2} \right] \sin\left(\frac{\pi}{2.p}\right) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.22})$$

a-Induction dans la culasse rotorique

L'induction dans la culasse rotorique est donnée en fonction du flux rotorique :

$$B_{c2} = \frac{\Phi_2 \cdot 10^6}{L_i \cdot (D_{ex2} - 2.h_{z2} - D_2)} \quad [\text{T}] \quad (\text{III.23})$$

III.1.8. Fmm dans les dents rotoriques

Elle se calculé comme suite :

$$F_{z2} = h_{z2} \cdot H_{z2} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.24})$$

Avec

H_{z2} — l'intensité du champ magnétique dans la dent qui correspond à B_{z2} qui sera lue sur le tableau de magnétisation de base des machines à courant alternatif (T3).

h_{z2} — la hauteur des dents rotorique.

a-Induction dans les dents rotoriques

L'induction est donnée par le flux rotorique:

$$B_{z2} = \frac{\Phi_2 \cdot 10^6}{S_z} \quad [\text{T}] \quad (\text{III.25})$$

S_z — section de calcul des dents rotorique.

Remarque :

Dans le cas de forte induction $B_{z2} > 1,8$ tesla, il faut tenir compte de l'inégale répartition du flux déplacé depuis les dents vers les encoches .en introduisant à cette effet le coefficient K_{ev} :

$$K_{ev} = \frac{\pi \cdot D_{0.2} \cdot L_i \cdot (1 - \rho + 0.715\rho^2)}{2 \cdot p \cdot S_{zp}} \quad (\text{III.26})$$

III.1.9.F.m.m du rotor

Elle est donnée comme suite :

$$F_{zc} = F_{z2} + F_{c2} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.27})$$

III.1.10.F.m.m. d'excitation à vide par pole

La f.m.m. d'excitation à vide est la somme des f.m.m. des différent tronçons du circuit magnétique, elle est donnée comme suite :

$$F_{ex} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{c1} + F_{z2} + F_{c2} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.28})$$

III.1.11. coefficient de saturation

$$K_{\delta a} = \frac{F_{ex}}{F_{\delta}} \quad (\text{III.29})$$

III.1.12. Valeur réduite des f.m.m. et des flux en [ur]

Le calcul des caractéristiques magnétiques se fait en unités réduites. la valeur de base du flux est le flux nominale Φ_{no} correspondant a la tension nominale à vide E, et la valeur de base de la f.m.m. correspond à une valeur nominale de la f.m.m. d'excitation (F_{exn}) à vide.

$$F_{ex}^* = \frac{F_{ex}}{F_{exno}}$$

$$F_{\delta zc}^* = \frac{F_{\delta zc}}{F_{exno}}$$

$$F_{zc}^* = \frac{F_{zc}}{F_{exno}}$$

$$F_{\delta}^* = \frac{F_{\delta}}{F_{exno}}$$

$$\Phi_{\sigma}^* = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_{no}}$$

$$\Phi_2^* = \frac{\Phi_2}{\Phi_{no}}$$

Les résultats de calcul sont illustres dans le tableau III.1.

Ø Vérification de la caractéristique à vide :

Il est recommandé de faire une comparaison entre la caractéristique à vide calculée et la caractéristique normalisée des machines synchrones tracé avec à partir des données suivantes :

E^* [UR]	0	0.5	1.0	1.1	1.2	1.3
F_{ex}^* [UR]	0	0.47	1.0	1.17	1.4	2

La différence entre les deux caractéristiques dans la zone de fonctionnement, ne doit pas dépasser 15% dans la zone de fonctionnement.

$\Phi^*, E^* [UR]$	0,5			1			1,1			1,2			1,3		
$\Phi [Wb]$	0,0295			0,059			0,0649			0,0708			0,0767		
variables	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F
Entrefer(F_0)	0,37	/	388,441	0,75	/	787,684	0,82	/	860,869	0,9	/	944,856	0,97	/	1018
Dent du stator(F_{z1})	0,81	259	7,299	1,62	906	25,531	1,78	1440	40,579	1,94	2430	68.477	2,11	5440	153.299
Dos du stator(F_{c1})	0,62	83	28,564	1,24	283	97,393	1,36	365	125,613	1,49	506	174.138	1,61	788	271.187
Dos du rotor(F_{c2})	0,428	58	5,259	0,856	94	8,523	0,941	103	9,338	1,027	114	10,336	1,11	126	11,424
Dent du rotor(F_{z2})	0,661	74	2,633	1,323	220	7,828	1,455	430	15,299	1,587	1580	56,216	1,719	4000	142,32
F_{dzc}	424,304			910,608			1027			1187			1443		
F_{dzc}^*	0.46			0.98			1,11			1, 28			1,56		
F_{zc}	7,891			16,35			24,638			66.552			153,744		
F_{zc}^*	0.0085			0.0176			0.0265			0.072			0.165		
F_{ex}	432,195			926,958			1052			1254			1597		
F_{ex}^*	0.466			1			1.13			1.352			1.72		
F_d^*	0.419			0.849			0.928			1.02			1.098		
Φ_s	0,000215			0,00046			0,00052			0,0006			0,00073		
Φ_s^*	0.0036			0.0078			0.0088			0.01			0.012		
Φ_2	0,03			0,06			0,065			0,071			0,077		
Φ_2^*	0.51			1.017			1.1			1.2			1.3		

Tableau III.1

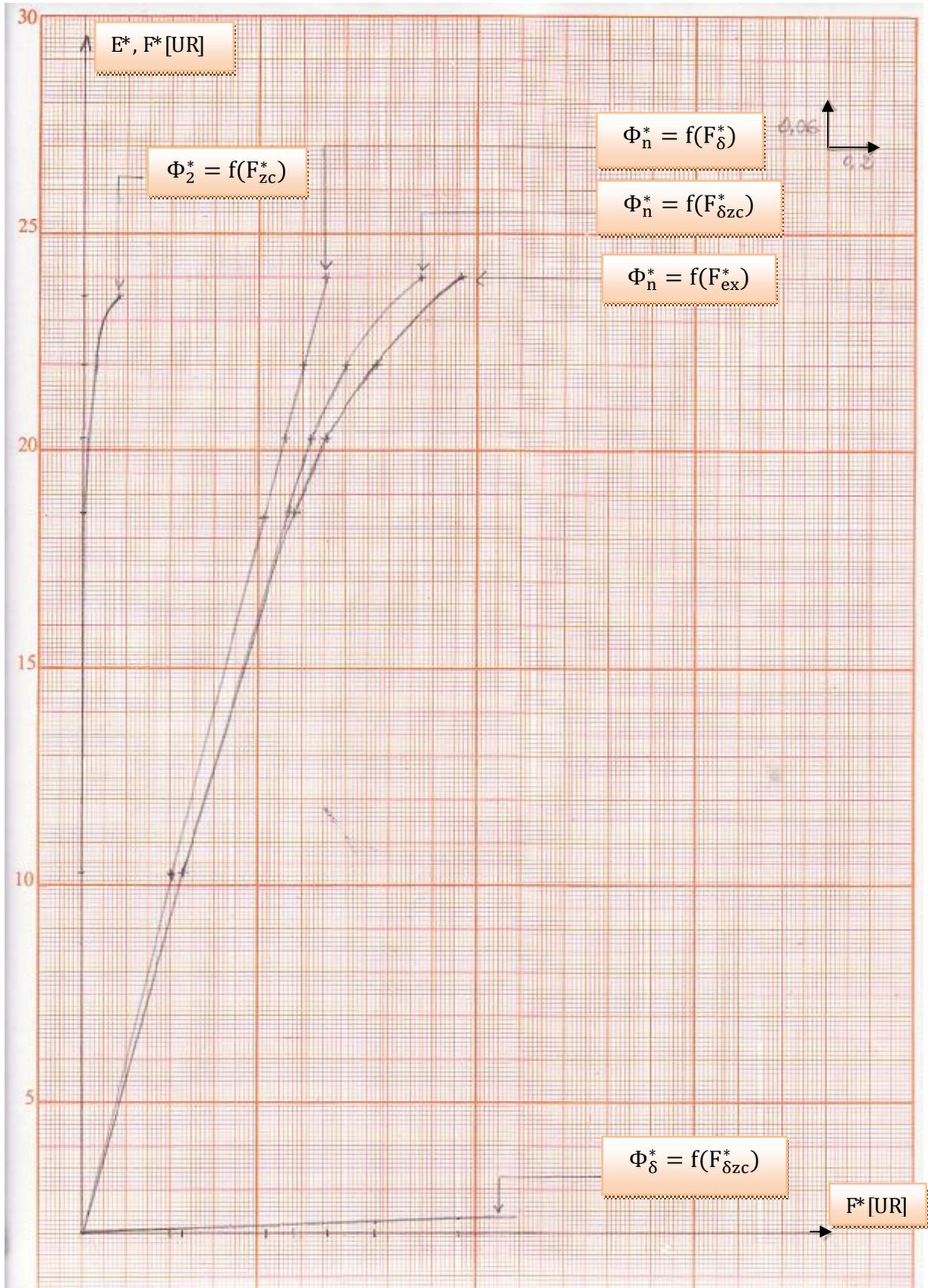


Figure.III.2. Caractéristiques à vide et de magnétisation

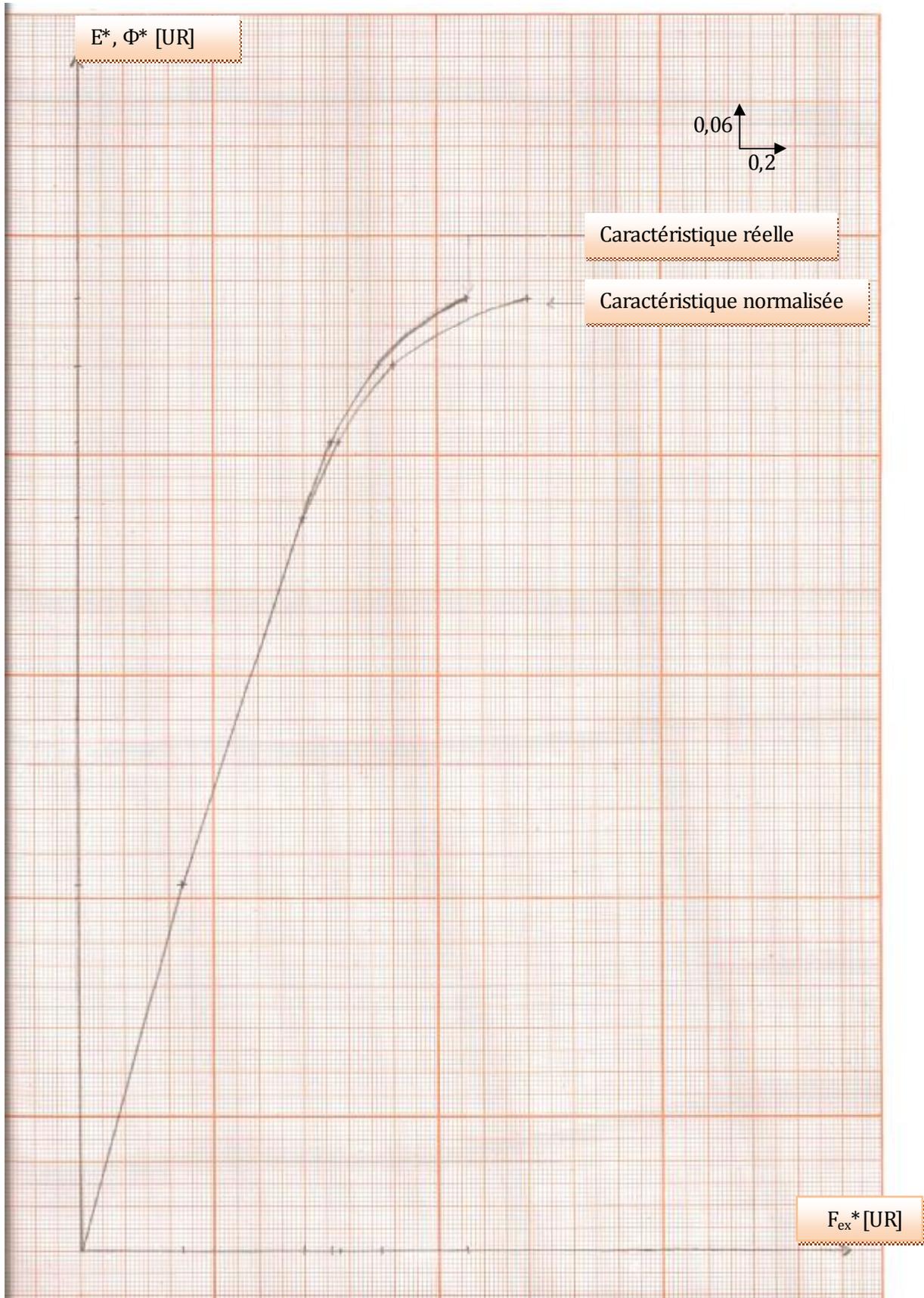


Figure .III.1. Caractéristique réelle et normalisée à vide

III.2. Paramètres de l'enroulement statorique

La détermination des résistances et des réactances de fuite de l'enroulement statorique est nécessaire pour le calcul du régime en charge, des paramètres nominaux et des caractéristiques des machines synchrones.

III.2.1. Résistance d'une phase

La résistance d'une phase est calculée par la relation suivante :

$$R_1 = \frac{\rho_{cu} \cdot W_1 \cdot L_{1moy} \cdot 10^3}{a_1 \cdot n_{el} \cdot S_{el1}} \quad (\Omega) \quad (III.30)$$

Avec

W_1 - nombre de spire d'une phase.

S_{el1} - section normalisée d'un conducteur élémentaire.

ρ_{cu} - résistivité du cuivre à 20°C.

$$\rho_{cu} = 17.20 \cdot 10^{-9} \quad [\Omega \cdot m]$$

L_{1moy} - longueur moyenne d'une spire de l'enroulement statorique qui est donné comme suite :

$$L_{1moy} = 2 \cdot (L_i + L_{1f}) \quad [mm] \quad (III.31)$$

Dont

L_i - longueur virtuelle de la machine.

L_{1f} - longueur moyenne de la partie frontale de la bobine qui est donnée par la formule suivante :

$$L_{1f} = (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{1moy} + 15 \quad [mm] \quad (III.31)$$

Avec

b_{1moy} - largeur moyenne d'une spire :

$$b_{1moy} = T_{1moy} \cdot Y_{1moy} \quad [mm] \quad (III.32)$$

T_{1moy} - pas dentaire moyen :

$$T_{1moy} = \pi \cdot \frac{(D_1 + h_{z1})}{Z_1} \quad [mm] \quad (III.33)$$

$Y_{1\text{moy}}$ — pas moyen qui vaut :

$$Y_{1\text{moy}} = \frac{Z_1}{2.p} \quad [\text{Encoche}] \quad (\text{III.34})$$

III.2.2. Résistance d'une phase en unité relative

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$R_{1r} = R_1 \cdot \frac{I_{1n}}{V_{1n}} \quad [\text{ur}] \quad (\text{III.35})$$

Ø Vérification de R_{1r} :

$$R_{1r} = \frac{(\pi.D_1.A_1.J_1.L_{1\text{moy}}.10^{-2})}{114.10^4.m_1.V_{1n}.I_{1n}} \quad [\text{ur}] \quad (\text{III.36})$$

III.2.3. Réactance de fuite par phase de l'enroulement statorique

Le calcul des réactances de fuites de l'induit nécessite l'étude du flux de dispersion, ce calcul est basé sur la décomposition de ce flux en quatre composantes :

- Ø Flux de dispersion de l'encoche.
- Ø Flux de dispersion des parties frontales.
- Ø Flux de dispersion différentiel.
- Ø Flux de dispersion des têtes des dents.

Chaque composante est caractérisée par un coefficient de fuite qui dépend des dimensions et de la forme d'encoche.

1- Coefficient de dispersion d'encoches

Ce coefficient dépend du rapport des dimensions spécifique à chaque encoche.

$$\lambda_{\text{enc1}} = K_s \cdot \left(\frac{h_{f1}}{b_{f1}} + \frac{e_1}{b_{\text{enc2}}} \right) + \frac{h_{\text{enc1}} \cdot A_{11}}{b_{\text{enc2}}} \quad (\text{III.37})$$

K_s — coefficient qui tient compte du raccourcissement du pas .

$$K_s = 0.75. \beta_1 + 0.25 \quad \text{Pour } \beta \geq 0.667. \quad (\text{III.38})$$

β — C'est la valeur du raccourcissement, dans notre cas $\beta=0,833$.

A_{11} — coefficient qui tient compte du raccourcissement exprimé en fonction

$$A_{11} = 0.25. (K_s - 0.6667) \quad (\text{III.39})$$

2- coefficient de dispersion de la partie frontale

Ce coefficient tient compte du flux de fuite qui se développe dans les parties frontales des enroulements.

$$\lambda_{f1} = 0.34. \frac{q_1}{L_i}. (L_{1f} - 0.64. \beta_1. \tau_1) \quad (\text{III.40})$$

Avec

L_{1f} — longueur des parties frontales de la bobine.

3- Coefficient de dispersion différentiel

Le flux de dispersion différentiel est dû aux lignes du champ se renfermant d'une dent à l'autre à travers l'entrefer.

$$\lambda_{d1} = \frac{0.027. \tau_1. \alpha_i}{K_\delta. q_1. \delta} \quad (\text{III.41})$$

4- Coefficient de dispersion des têtes des dents

$$\lambda_k = 0.04. K_k + 0.07 \sqrt{\frac{(t_1 - b_{f1})}{b_{f1}}} \quad (\text{III.42})$$

La valeur de K_k est donné par la figure 4, $K_k = f(K_{\beta\delta})$ avec :

$$K_{\beta\delta} = \frac{b_{f1}}{\delta. K_\delta} \quad (\text{III.43})$$

5- Coefficient de dispersion globale du stator

$$\lambda_1 = \lambda_{enc1} + \lambda_{d1} + \lambda_{f1} + \lambda_k \quad (\text{III.44})$$

D'où la réactance de fuite du stator :

$$X_\sigma = 1.58. \left(\frac{p.n}{60}\right). \left[\frac{(W_1^2)}{p.q_1}\right]. L_i. \lambda_1. 10^{-8} \quad [\Omega] \quad (\text{III.45})$$

III.2.4. Réactance de fuite en unité réduite

$$X_{\sigma r} = X_{\sigma} \cdot \frac{I_{1n}}{V_{1n}} \quad [\text{ur}] \quad (\text{III.46})$$

Ø Vérification de la réactance de fuite en unité relative

$$X_{\sigma r} = \frac{0.39 \cdot (D_1^2 \cdot A_1^2) \cdot L_i \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-11}}{m_1 \cdot V_{1n} \cdot Z_1 \cdot I_{1n}} \quad [\text{ur}] \quad (\text{III.47})$$

Remarque

La différence entre les valeurs calculés et celles vérifier ne doit pas dépasser les 3%.

III.2.5. Réactance de potier

Pour le calcul de la Fmm d'excitation en charge en utilise le diagramme de potier, et pour cela il faut calculer la réactance de potier, qui se calcul comme suite

$$X_p = X_{\sigma} + 0.025 \quad [\Omega] \quad (\text{III.48})$$

III.2.6. Réactance de potier en valeur réduite

$$X_{pr} = X_p \cdot \frac{I_{1n}}{V_{1n}} \quad [\text{ur}] \quad (\text{III.49})$$

III.3.calcul du circuit magnétique en charge

III.3.1.Réaction magnétique d'induit

Dans une machine synchrone en charge, le champ magnétique est produit par le courant de l'enroulement d'excitation et le système équilibré de courants circulant dans l'enroulement triphasé. Le plus grand rôle dans le phénomène de conversion de l'énergie dans la machine revient au champ d'induction mutuelle dans l'entrefer, ce dernier est créé par la F.m.m de la réaction d'induit et elle est donnée par la formule suivante :

$$F_a = 1.35. I_n. \frac{W_1 \cdot K_{en1}}{p} \quad (\text{III.50})$$

III.3.2. Détermination de la F.m.m d'excitation en charge

Dans cette partie, on calcule la F.m.m d'excitation lorsque la machine débite sur une charge. pour notre cas c'est un alternateur à pôles lisses il convient de se servir de diagramme de Potier qui donne des résultats assez satisfaisants. Pour cela nous avons opté pour deux méthodes de calcul.

Ø 1^{ère} méthode

Pour déterminer la f.m.m d'excitation, il faut se servir des caractéristiques partielles à vide.

$$\Phi_u = f(F_1) \quad \Phi_{f\delta} = f(F_1) \quad \Phi_2 = f(F_2)$$

Pour commencer, on trace le diagramme des tensions $\bar{E}_r = \bar{U} + \bar{R}\bar{I} + jX_p\bar{I}$, on trouve la valeur de la F.e.m résultante proportionnelle au flux utile dans l'entrefer \bar{E}_r , cela se fait en traçant \bar{U}_n sur l'axe des ordonnées et \bar{I}_n en déphasage d'un angle φ_n avec \bar{U}_n et on néglige la valeur de $\bar{R}\bar{I}$, car R est très petite.

On projette le vecteur \bar{E}_r (1) sur l'axe des ordonnées de la caractéristique de magnétisation, on trouve la valeur de $\bar{\Phi}_{rm}$ le flux dans l'entrefer qui est égal à la valeur relative de E_r , $|\bar{\Phi}_{rm}| = |\bar{E}_r|$

Avec

$$\bar{\Phi}_{rm} = \bar{\Phi}_2 - \bar{\Phi}_{f\delta} \quad (\text{III.51})$$

On trace un arc de cercle de rayon $|E_r|$, et on trace la perpendiculaire à E_r , c'est le vecteur $\bar{\Phi}_{rm}$ (2), en utilisant la caractéristique $\Phi_u = f(F_1)$, on détermine pour $|\Phi_u| = |\Phi_{rm}|$ la f.m.m résultante $|F_{1r}|$ (3) correspondant à la tension magnétique du stator et de l'entrefer. Cette F.m.m. ne

tient pas encore compte de la tension magnétique F_2 du rotor et elle diffère de la f.m.m. résultante F_{r_m} par la tension magnétique.

$$\overline{F}_{1r} = \overline{F}_{r_m} - \overline{F}_2 \quad (\text{III.52})$$

On projette la valeur de $\overline{\Phi}_{r_m}$ sur la courbe $\Phi_u = f(F_1)$, puis on trace la perpendiculaire à (OY) pour lire la valeur de $|F_{1r}|$ sur l'axe (OX), puis on trace \overline{F}_{1r} en phase avec Φ_{r_m} (4).

On calcul

$$F_{afm} = F_a \cdot K_a = F_a \cdot \left(\frac{1}{K_f}\right) \quad (\text{III.53})$$

Avec

K_a — coefficient de réaction d'induit

$$K_a = \frac{(\pi^2 \cdot \rho)}{8 \cdot \sin(\rho \cdot \frac{\pi}{2})} \quad (\text{III.54})$$

Tel que \overline{F}_{afm} est en phase avec \overline{I} , on trace le vecteur ($-\overline{F}_{afm}$), on trouve la F.m.m $|F_{1f}|$ (5) comme résultante avec

$$\overline{F}_{1f} = \overline{F}_{1r} - \overline{F}_{afm} \quad (\text{III.55})$$

F_{1f} — est la F.m.m qui engendre le flux de dispersion $\Phi_{f\delta}$.

F_{afm} — est F.m.m de l'enroulement d'excitation équivalente à F_a .

On trace un arc de rayon \overline{F}_{1f} jusqu'à l'axe (OX) puis on le projette sur la courbe de magnétisation $\Phi_{f\delta} = f(F_1)$ (6), puis on projette sur l'axe (OY) pour avoir la valeur de $|\Phi_{f\delta}|$, on trace $\overline{\Phi}_{f\delta}$ en phase avec \overline{F}_{1f} (7). En additionnant le flux d'induction mutuelle $\overline{\Phi}_{r_m}$ et le flux de dispersion $\overline{\Phi}_{f\delta}$, on trouve le flux total dans le rotor $\overline{\Phi}_2$ (8).

$$\overline{\Phi}_2 = \overline{\Phi}_{r_m} + \overline{\Phi}_{f\delta} \quad (\text{III.56})$$

Et d'après les caractéristiques de magnétisations du rotor $\Phi_2 = f(F_2)$, on détermine la tension magnétique F_2 (9) du rotor qui a le sens du flux $\overline{\Phi}_2$ (10). Et enfin, en se servant de l'équation :

$$\overline{F}_{1f} = \overline{F}_{f_m} - \overline{F}_2 \quad (\text{III.57})$$

On détermine la F.m.m d'excitation totale (11).

$$\vec{F}_{fm} = \vec{F}_{1f} + \vec{F}_2 \quad (\text{III.58})$$

Ø 2^{ème} méthode

Utilisation de la caractéristique à vide de la machine, $E^* = f(F_{ex}^*)$.

En construisant ce diagramme, on prendra sur l'axe des ordonnées OY (axe des imaginaires) dans le sens positif, le vecteur de la tension nominale en unité relative.

$\vec{U}_n=1$ on trace ensuite le vecteur du courant nominal qui est aussi en unité relative, $I_n=1$ en retard de phase par rapport à \vec{U}_n d'un angle $\varphi_n=36.86$ (pour déterminer l'angle φ_n on trace un cercle de rayon \vec{U}_n , l'intersection de ce dernier avec le prolongement du point 0.8 nous donne l'angle souhaité). En ajoutant le vecteur de tension $X_p^* = I_n \cdot X_p / U_n$ au vecteur \vec{U}_n , on obtient le vecteur de la force électromotrice résultante \vec{E}_{1n} , qui est proportionnelle au flux de l'entrefer Φ_{\square} , traçons un arc de cercle de centre (O) de rayon \vec{E}_{1n} et qui coupe (OY). Ensuite, on projette le point sur la courbe de magnétisation suivant l'axe des abscisses (OX) (axe des réels), qui est à son tour projeté sur (OX) suivant l'axe (OY), cette distance représente la F.m.m résultante \vec{F}_{1r} , correspondante à la F.é.m \vec{E}_{1n} . Du point (O) on trace le vecteur \vec{F}_{1r} , qui est perpendiculaire à \vec{E}_{1n} et a comme module la valeur de F.m.m F_{1r} . De l'extrémité de ce dernier on trace le vecteur de la F.m.m de l'enroulement d'excitation \vec{F}_{afm} qui est parallèle au vecteur \vec{I}_n , et a comme module la valeur du la \vec{F}_{afm} .

La somme des vecteurs \vec{F}_{1r} et \vec{F}_{afm} nous donne le vecteur de la F.m.m d'excitation \vec{F}_{fm} , pour connaître sa valeur numérique on trace un arc de cercle de centre O, et de rayon \vec{F}_{fm} , et qui coupe OX cette distance représente la valeur de la \vec{F}_{fm} .

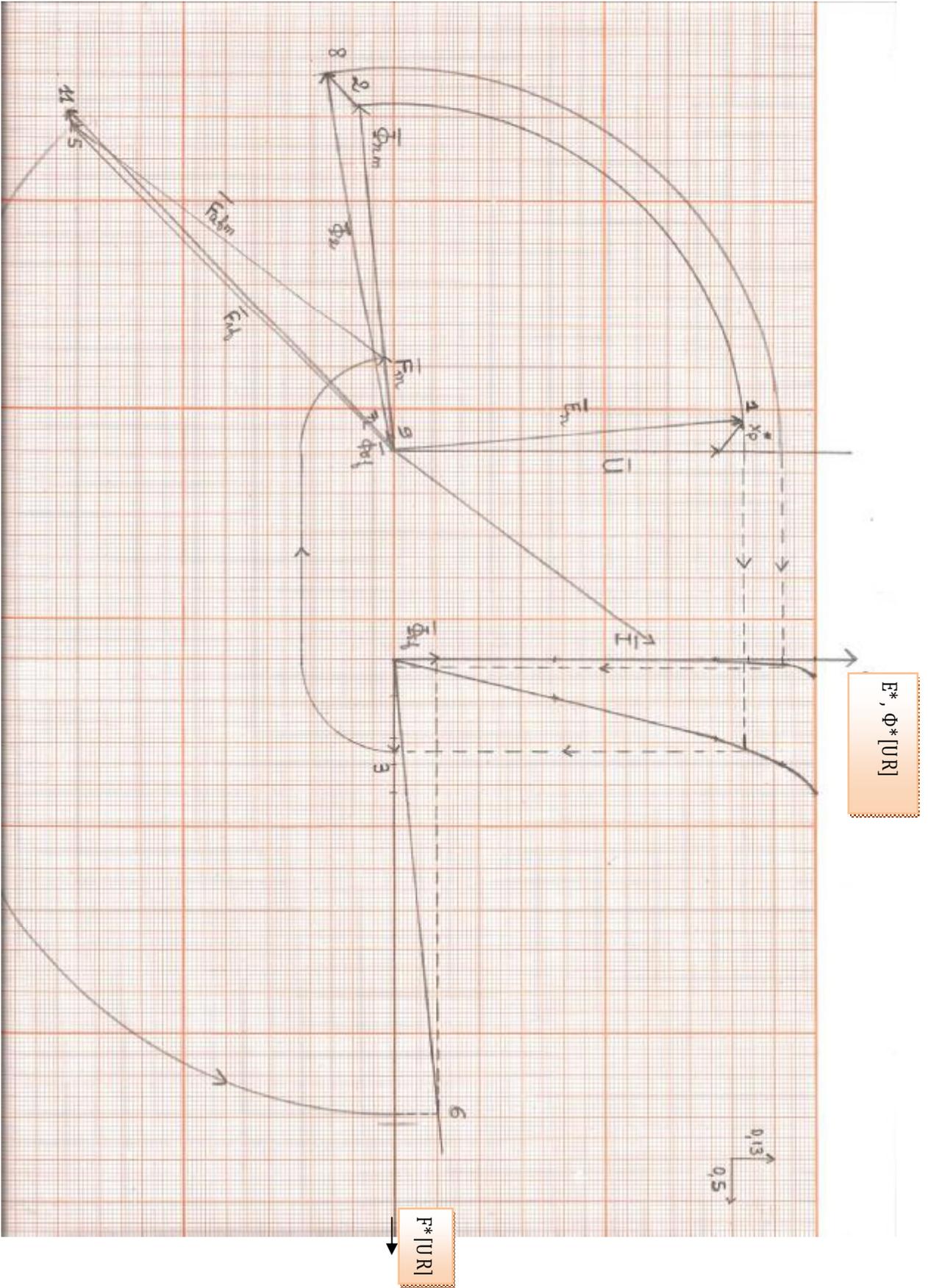


Figure III.3. Construction de diagramme poitier en utilisant les caractéristiques de magnétisation

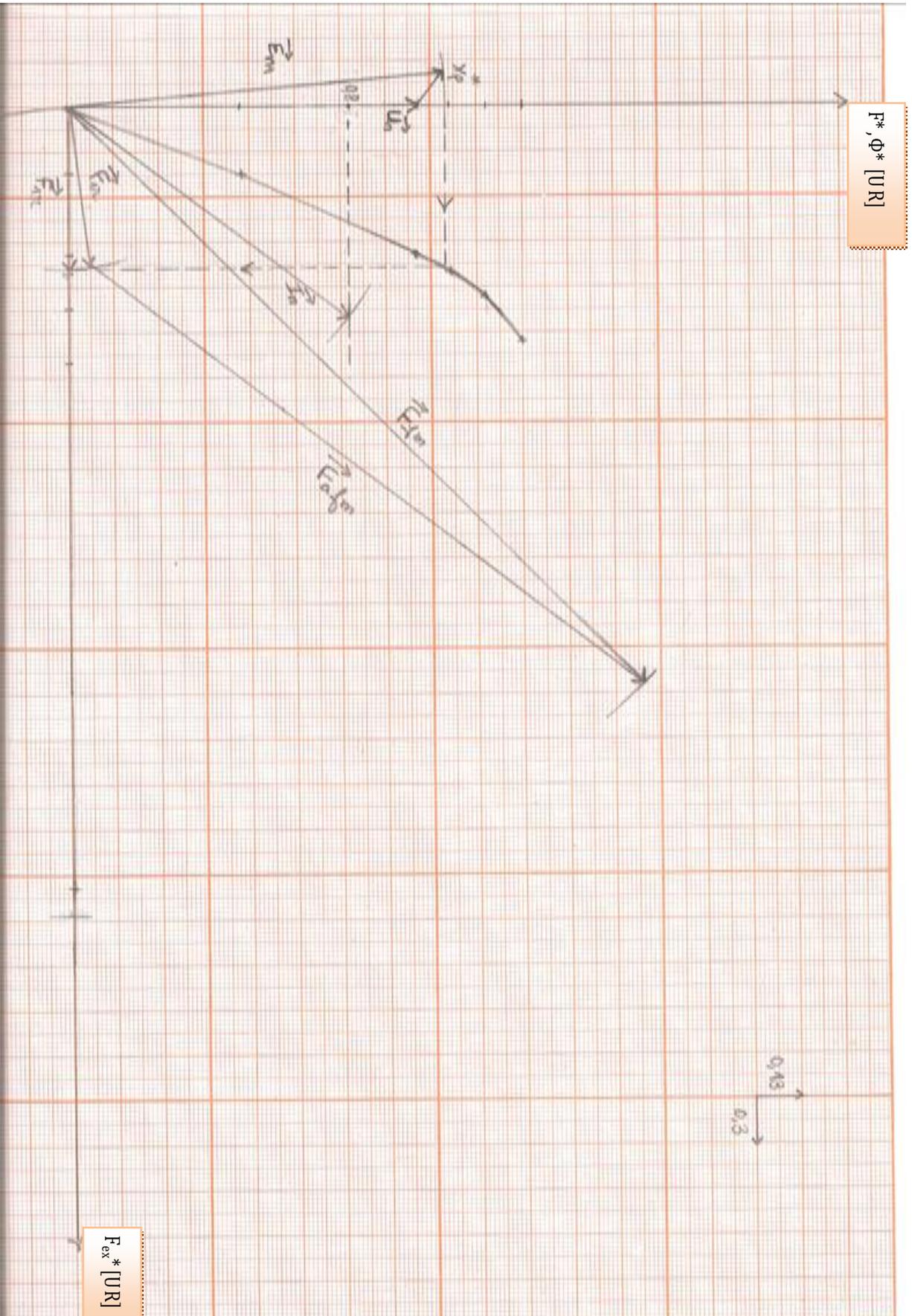


Figure.III.4.Construction de diagramme de Poitier

IV.1.Introduction

Après avoir déterminé la force magnétomotrice d'excitation en charge, il faut dimensionner l'enroulement d'excitation qui puisse compenser les chutes de tensions magnétiques dans l'entrefer et dans le circuit magnétique.

L'enroulement d'excitation des alternateurs à pôles lisses est un enroulement concentrique à une seule couche et à pas totale. Il est alimenté avec une tension continue. Afin de rendre la forme du champ d'excitation plus voisine de la sinusoïdale, l'enroulement est repartie dans plusieurs encoches.

IV.2.La f.m.m par pôles de l'enroulement d'excitation

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$F_{ex} = I_{ex} \cdot W_{ex} \quad [A] \quad (IV.1)$$

Avec

I_{ex} — Courant d'excitation.

W_{ex} — Nombre de spire de l'enroulement d'excitation.

Ø Coefficient de bobinage de l'enroulement d'excitation.

$$k_{enr2} = K_{r2} \cdot K_{d2} \cdot K_{in2} \quad (IV.2)$$

$K_{r2} = 1$ (Pas de raccourcissement).

$K_{in2} = 1$ (Pas d'inclinaison des encoches).

K_{d2} — Coefficient de distribution de l'enroulement donné comme suite :

$$K_{d2} = \frac{\sin\left(\rho \frac{\pi}{2}\right)}{q_2 \sin\left(\rho \frac{\pi}{2}\right)} \quad (IV.3)$$

ρ — C'est le rapport de la partie bobinée au pas polaire, il est compris entre (0.65 ÷ 0.75).

q_2 — Nombre d'encoches bobinées par pôles, il est donné par la formule suivante :

$$q_2 = \rho \frac{Z}{2.p} \quad (IV.4)$$

IV.3.section de l'enroulement d'excitation

Selon la loi d'ohm, la tension aux bornes de l'enroulement d'excitation est :

$$U_{ex} = R_{ex} \cdot I_{ex} \quad [\text{V}] \quad (\text{IV.5})$$

$$R_{ex} = R \frac{l}{S_{ex}} \quad [\Omega] \quad (\text{IV.6})$$

U_{ex} : tension aux bornes de l'enroulement d'excitation. U_{ex} est compris entre [12 ÷ 200].

Dans notre cas : $U_{ex} = 45 \text{ V}$.

ρ_{cu} — résistivité du cuivre à 20°.

S_{ex} — section de l'enroulement d'excitation.

l — longueur de l'enroulement d'excitation.

$$l = 2 \cdot p \cdot l_{exm} \cdot W_{ex} \quad (\text{IV.7})$$

l_{exm} : longueur moyenne d'une spire de l'enroulement d'excitation

$$l_{exm} = 2.5 \cdot (L_i + L_{2f}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{IV.8})$$

L_{2f} — Longueur de la partie frontale, elle est exprimée sous la forme :

$$L_{2f} = (1,16 + 0,14p)b_{moy} + 15 \quad [\text{mm}] \quad (\text{IV.9})$$

b_{moy} — La largeur moyenne d'une spire.

$$b_{moy} = T_{2moy} \cdot Y_{2moy} \quad [\text{mm}] \quad (\text{IV.10})$$

T_{2moy} — Pas dentaire moyen.

$$T_{2moy} = \pi \frac{(D_{ex2} - h_{z2})}{Z_2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{IV.11})$$

Y_{2moy} — le pas moyen.

$$Y_{2moy} = \frac{Z_2}{2 \cdot p} \quad [\text{encoches}] \quad (\text{IV.12})$$

$$R_{ex} = \rho_{cu} \frac{2p \cdot l_{exm} \cdot W_{ex} \cdot 10^3}{S_{ex}} [\Omega] \quad (IV.13)$$

$$U_{ex} = \rho_{cu} \frac{2p \cdot l_{exm} \cdot W_{ex} \cdot 10^3}{S_{ex}} I_{ex} [V] \quad (IV.14)$$

On remplace :

$$I_{ex} \cdot W_{ex} = F_{ex}$$

$$U_{ex} = \frac{2p \cdot \rho_{cu} \cdot mt_2 \cdot l_{exm} \cdot F_{ex} \cdot 10^3}{S_{ex}} [V]$$

$$S_{ex} = \frac{2p \cdot \rho_{cu} \cdot l_{exm} \cdot F_{ex} \cdot 10^3}{U_{ex}} [mm^2]$$

Finalement S_{ex} devient :

$$S_{ex} = \frac{2p \cdot \rho_{cu} \cdot mt_2 \cdot l_{exm} \cdot F_{ex} \cdot 10^3}{U_{ex}} [mm^2] \quad (IV.15)$$

Avec

mt_2 – coefficient de température qui ramène R_{ex} à la température de fonctionnement.

$mt_2 = 1,2$.

IV.4. Nombre de spires de l'enroulement d'excitation

Il est calcul comme suite :

$$W_{ex} = \frac{F_{ex}}{S_{ex} \cdot J_{ex}} \quad (\text{Spires}) \quad (IV.16)$$

Ou

J_{ex} – densité du courant de l'enroulement d'excitation, il est compris entre $[2.5 \div 7]$.

IV.5. Nombre de conducteurs par encoches

$$U_{enc2} = \frac{2 \cdot W_{ex}}{q_2} \quad (\text{Conducteur}) \quad (IV.17)$$

IV.6. Resistance de l'enroulement d'excitation

$$R_{ex} = \rho_{cu} \frac{2p \cdot mt_2 \cdot W_{ex} \cdot l_{exm} \cdot 10^3}{S_{ex}} [\Omega] \quad (IV.18)$$

IV.7. Courant d'excitation nominale en charge

$$I_{ex} = \frac{F_{ex}}{w_{ex}} \quad [A] \quad (IV.19)$$

IV.8. Courant d'excitation maximale

$$I_{exmax} = \frac{U_{ex}}{R_{ex}} \quad [A] \quad (IV.20)$$

IV.9. Coefficient de surcharge

$$K_{ex} = \frac{I_{exmax}}{I_{ex}} \quad (IV.21)$$

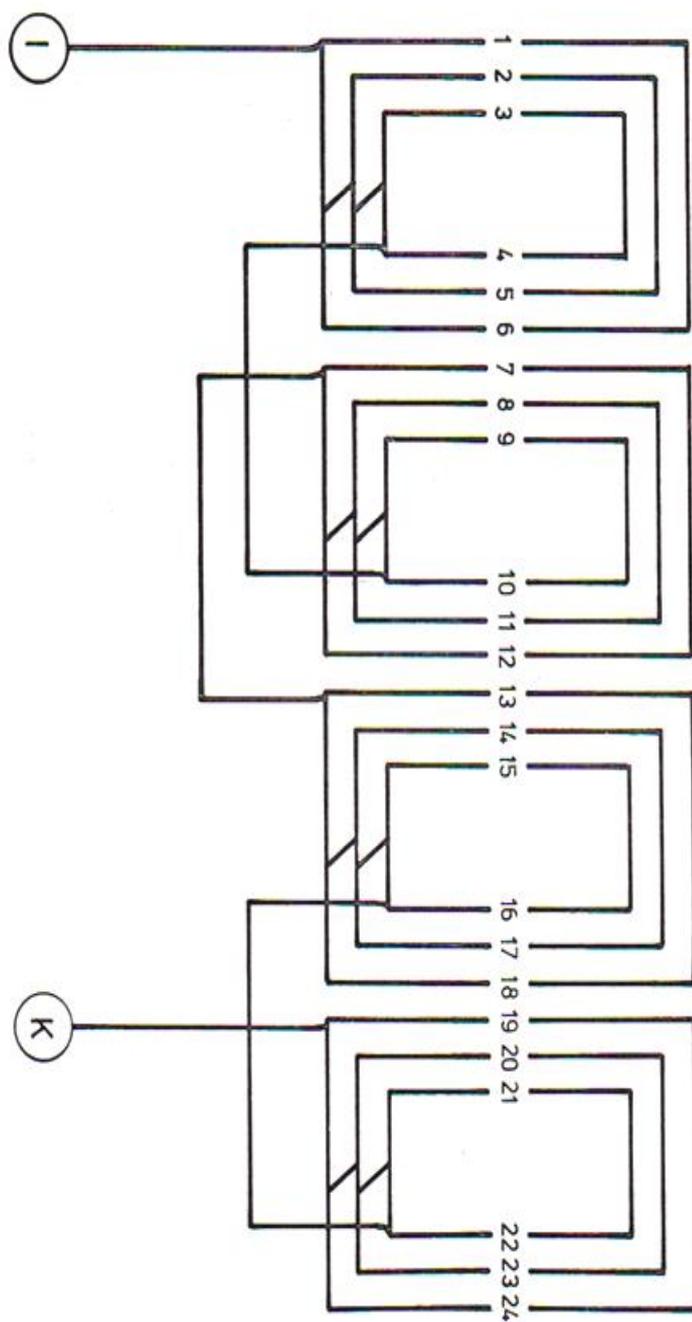
IV.10. Puissance d'excitation

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex} \quad [W] \quad (IV.22)$$

IV.11. Coefficient de remplissage de l'encoche rotorique

$$K_{remp2} = \frac{n_{el2} \cdot U_{enc2} \cdot d_{iso2}^2}{S_{enc2} - S_{iso2}} \quad (IV.23)$$

Pour les encoches rotorique, le coefficient de remplissage doit être compris dans l'intervalle $[0,7 \div 0,75]$.



Enroulement concentrique à une seule couche

$Z = 24$ encoches, $q=6$, $m=1$, $2p = 4$

Une machine électrique tournante est le siège de perte d'énergie, car la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique n'est pas totale.

En effet, une partie d'énergie sera dissipée dans la machine sous diverses formes.

On peut classer ces pertes comme suite

- Pertes magnétiques principales (pertes fer).
- Pertes électriques.
- Pertes mécaniques.
- Pertes supplémentaires.

V.1. Les pertes magnétiques

Elles se composent des pertes par hystérésis et des pertes par courant de Foucault.

Ø Pertes par hystérésis

Transformées en chaleur, les pertes par hystérésis représentent l'énergie nécessaire à l'aimantation cyclique du fer. Elles sont proportionnelles à l'aire du cycle d'hystérésis, au nombre de cycle d'aimantation et indépendantes de l'épaisseur des tôles.

Ø Pertes par courant de Foucault

L'aimantation cyclique alternative crée des f.e.m induites dans le fer. Les courants qui en résultent provoquent les pertes par courant de Foucault. Afin de réduire ces dernières, on découpe les parties du fer en tôles minces isolées les unes des autres et dont les plans sont disposés parallèlement aux lignes d'induction.

La grande partie de ces pertes est localisées au niveau de la culasse et les dents.

V.1.1. Pertes dans les dents du stator

Elles sont exprimées par la formule suivante

$$P_{fzz} = K_{sup} \cdot (P_{1/50}) \cdot m_{z1} \quad (V.1)$$

$P_{1/50}$ — pertes spécifiques, elles sont définies comme les pertes par kilogramme de tôle de l'acier soumise à une induction de 1tesla et une fréquence de 50 Hz.

K_{sup} — coefficient tenant compte des pertes supplémentaires.

Dont $K_{sup} \in [1,7 \div 1,8]$

m_{z1} — masse totale des dents du stator.

$$m_{z1} = \gamma_T \cdot Z_1 \cdot \left(\frac{b_{enc2}^2}{4} + h_1 \cdot b_{z1} + (h_{f1} \cdot b_{enc1}) \right) \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot 10^{-9} \quad [\text{Kg}] \quad (\text{V.2})$$

γ_T — Masse volumique des tôles.

$$\gamma_T = 7,8 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

V.1.2. Pertes dans la culasse du stator

Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{fc} = K_{sup} \cdot (P_{1/50}) \cdot m_{c1} \quad [\text{W}] \quad (\text{V.3})$$

K_{sup} — c'est le coefficient qui tient compte des pertes supplémentaires.

$$K_{sup} \quad \square \quad [1,3 \div 1,6].$$

m_{c1} — Masse totale de la culasse statorique.

$$m_{c1} = \gamma_T \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_{ex1}^2 - (D_{ex1} - h_{c1})^2] \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot 10^{-9} \quad [\text{Kg}] \quad (\text{V.4})$$

V.2. Pertes électriques

Ont les appels les pertes par effet joule dans l'enroulement induit et inducteur. Elles sont proportionnelles au carré du courant qui traverse les conducteurs.

V.2.1. Les pertes joules statoriques

$$P_{js} = m \cdot (R_1 \cdot I_n^2) \quad [\text{W}] \quad (\text{V.5})$$

V.2.2. Les pertes d'excitation

Ce sont les pertes dans l'enroulement du rotor sont données par l'expression suivante :

$$P_{ex} = R_{ex} \cdot I_{ex}^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{V.6})$$

V.2.3. Les pertes électriques supplémentaires

Elles sont données par la formule suivant:

$$P_{sup} = 0.005 \cdot P_e \cdot 10^3 \quad [\text{W}] \quad (\text{V.7})$$

Ou : P_e — c'est la puissance électromagnétique en [VA]

V.3. Pertes mécaniques

Elles contiennent les pertes par frottements aux paliers, les pertes par frottement des balais sur les bagues, les pertes par frottements dans l'air et les pertes par ventilation.

V.3.1. Les pertes par frottements et ventilation

Elles sont exprimées par la formule suivante :

$$P_{m1} = 8 \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100} \right)^3 \quad [\text{W}] \quad (\text{V.8})$$

V.4. Calcul du rendement de la machine

Il assurant la transformation électromécanique de l'énergie, il est défini par le rapport de la puissance utile transformée à la puissance absorbée par la machine.

Ce rendement est donné par la formule suivante :

$$\eta = \frac{S_n \cdot 10^3 \cdot \cos \varphi}{S_n \cdot 10^3 \cdot \cos \varphi + P_{\text{som}}} \quad (\text{V.9})$$

Avec

P_{som} — c'est la somme des pertes électriques, magnétiques et mécaniques.

$$P_{\text{som}} = P_{fz} + P_{fc} + P_{js} + P_{ex} + P_{\text{sup}} + P_{m1} \quad (\text{V.10})$$

Tableau comparatif de la machine principale : ($2p=4$, $m=3$, $n=1500\text{tr/mn}$) :

Tension nominale $U_n(\text{V})$	400			
La puissance électromagnétique(KVA)	210		262.5	
Puissance nominale (KVA)	200		250	
De 200 à 250 KVA	stator	rotor	stator	rotor
Le courant nominal $I_n(\text{A})$	285	-	360.844	-
La longueur du paquet L_i (mm)	330	330	475.16	475.16
Diamètre intérieur D_{int} (mm)	330	110	330	110
Diamètre extérieur D_{ex} (mm)	490	327.6	490	327.6
Diamètre iso (mm)	1.68	1.479	1.885	1.685
Nombre de spires par bobines	26	57	20	41
Nombre de bobines	12	12	12	12
Nombre de conducteurs par encoches	13	19	10	14
Nombre de conducteurs élémentaire	6	9	6	9
La résistance(Ω)	0.0135	0.329	0.01	0.357
La tension d'excitation $U_{\text{ex}}(\text{V})$	45			
Le courant d'excitation $I_{\text{ex}}(\text{A})$	83.5		125.992	

Tableau comparatif de l'excitatrice : ($2p=6, m=3, \delta = 1\text{mm}$)

Machine principale	200 KVA		250 KVA	
excitatrice	14(KVA)		17.5(KVA)	
	stator	rotor	stator	rotor
La tension nominale U_n (V)	54	66	60	66
Le courant nominal I_n (A)	107	123	115	153
La longueur du paquet L_i (mm)	60	60	80	80
Nombre de spires W	300	10	350	8
Nombre de bobines polaires	6	-	6	-
Diamètre intérieur (mm)	242	95	242	95
Diamètre nu (mm)	1.25	1.32	1.25	1.4
Nombre de conducteurs par encoches	-	5	-	4
Nombre de conducteurs élémentaire	-	8	-	8

Remarque :

Les données de l'excitatrice à utiliser pour la machine calculée est de puissance 17.5 KVA, sont prélevées sur une excitatrice existante de Leroy Somer fournie par l'électro-industrie (ex ENEL).

Conclusion générale

Le travail que nous a été demandé étant achevé, ce projet nous a permis d'acquérir de nouvelles connaissances dans le domaine de la construction des machines électriques, notamment les alternateurs, et de mettre en application les lois et les notions acquises pendant notre formation.

Nous estimons que les résultats obtenus sont satisfaisants du fait qu'ils se trouvent dans les marges fixées par les constructeurs, à savoir :

- Ø Les inductions dans les différentes parties de la machine.
- Ø Le coefficient de remplissage.
- Ø Le rendement de la machine.

Il est à signaler que nos calculs ont été faits à l'aide d'un logiciel Mathcad 14, ce qui nous a permis un gain de temps considérable et une optimisation des résultats.

On constate également que le domaine de la construction s'avère réservé et secret, ce qui explique le manque de documentation dans les bibliothèques.

Nous souhaitons que notre machine soit réalisée pour confronter les résultats théoriques aux résultats pratiques.

Enfin, notre travail est terminée, Nous laissons le soin aux promotions à venir de compléter le travail en dimensionnent l'excitatrice.

Cahier des charges:

puissance apparente:	$S_n := 250$	KVA
Puissance nominale:	$P_n := 200$	(kW)
Nombre de phases:	$m_1 := 3$	
La fréquence :	$f_1 := 50$	(Hz)
Tension nominale par phase:	$U_{1n} := 400$	(V)
tension simple:	$V_{1n} := \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.94$	(V)
Vitesse synchrone:	$n := 1500$	$\left(\frac{\text{tr}}{\text{mn}} \right)$
degré de protection:	IP23	

I.1. Dimensions principales:

1. La puissance électromagnétique P_e :

Facteur de majoration de la tension: $K_e := 1.05$

Facteur de puissance: $\cos\varphi := 0.8$

$\varphi := \arccos(0.8)$ $\varphi = 0.644$ rad

Nombre de paire de pole: $p := 2$

$$P_e := K_e \cdot \frac{P_n}{\cos\varphi} \qquad P_e = 262.5 \qquad (\text{KVA})$$

Coefficient de recouvrement polaire : $\alpha_1 := 0.64$

Facteur de la forme de la courbe d'induction: $K_f := 1.11$

Le nombre d'encoches statoriques: $Z_1 := 48$

2. Nombre d'encoches par pôles et par phase:

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

Les diamètres du stator:

Le diamètre extérieur du stator: $D_{ex1} := 490$ (mm)

Le diamètre intérieur du stator: $D_1 := 330$ (mm)

épaisseur de l'entrefer: $\delta := 1.1$ (mm)

3. Le pas dentaire statorique:

$$t_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} \quad t_1 = 21.598 \quad (\text{mm})$$

4. Angle électrique entre deux encoches voisines:

$$\gamma := p \cdot \frac{360}{Z_1} \quad \gamma = 15 \quad (\text{degre})$$

5. La zone de phase:

$$\alpha := q_1 \cdot \gamma \quad \alpha = 60$$

6. Le pas d'encoches:

$$\tau_{e1} := \frac{Z_1}{2 \cdot p} \quad \tau_{e1} = 12 \quad \text{encoches}$$

7. Le pas d'enroulement:

$$\varepsilon := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \quad \varepsilon := 2$$

$$y_1 := \frac{Z_1}{2 \cdot p} - \varepsilon \quad y_1 = 10 \quad (\text{encoches})$$

8. Le pas relatif a l'enroulement:

$$\beta_1 := \frac{y_1}{\tau_{e1}} \quad \beta_1 = 0.833$$

9. Coefficient de distribution:

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

10. Coefficient de raccourcissement:

$$k_{r1} := \sin\left(\frac{\beta_1 \cdot \pi}{2}\right) \quad k_{r1} = 0.966$$

11. Coefficient d'inclinaison:

$$\Psi := 0.052 \quad (\text{rad})$$

$$k_{i1} := \frac{\sin\left(p \cdot \frac{\Psi}{2}\right)}{\left(\frac{\Psi}{2} \cdot p\right)}$$

$$k_{i1} := 0.999$$

12. Le facteur de bobinage de l'enroulement statorique:

$$K_{en1} := k_{d1} \cdot k_{i1} \cdot k_{r1} \quad K_{en1} = 0.924$$

La charge linéaire:

$$A_1 := 41900 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}}\right)$$

Induction dans l'entrefer:

$$B_\delta := 0.75 \quad (\text{T})$$

13. La longueur du paquet statorique:

$$L_i := \frac{6.1 \cdot 10^{12} \cdot P_e}{\alpha_i K_{en1} \cdot K_f \cdot A_1 \cdot D_1^2 \cdot B_\delta \cdot n} \quad L_i = 475.16 \quad (\text{mm})$$

14. coefficient de longueur:

$$\lambda := \frac{L_i}{D_1} \quad \lambda = 1.44$$

I.2.Enroulement statorique:

1.Courant nominale dans une phase:

$$I_{1n} := \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot V_{1n} \cdot \cos\phi} \quad I_{1n} = 360.844 \quad (\text{A})$$

2. Le pas polaire:

$$\tau_1 := \pi \cdot \frac{D_1}{2p} \quad \tau_1 = 259.181 \quad (\text{mm})$$

3.Nombre de conducteur effectifs dans une encoche:

$$a_1 := 4$$

$$U_{en1} := \frac{a_1 \cdot \tau_1 \cdot A_1 \cdot (10)^{-3}}{I_{1n}} \quad U_{en1} = 10.032 \quad (\text{spires})$$

$$\text{round}(U_{en1}) = 10$$

4. Nombre de spires par phase:

$$W_1 := \frac{\text{round}(U_{en1}) \cdot p \cdot q_1}{a_1} \quad W_1 = 20 \quad (\text{spires})$$

Densité de courant statorique:

$$j_1 := 5.93 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

5.La section effective d'un conducteur:

$$S_{eff1} := \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot j_1} \quad S_{eff1} = 15.213 \quad (\text{mm}^2)$$

6.La section élémentaire:

$$\text{nombre de conducteur élémentaire: } n_{el1} := 6$$

$$S_{el11} := \frac{S_{eff1}}{n_{el1}} \quad S_{el11} = 2.535 \quad (\text{mm}^2)$$

$$d_{nu} := \sqrt{\frac{4 \cdot S_{el11}}{\pi}} \quad d_{nu} = 1.797$$

$$d_{\text{mm}} := 1.8 \quad (\text{mm}) \quad d_{\text{is}} := 1.885 \quad (\text{mm}) \quad S_{\text{el1}} := 2.54$$

$$j_{\text{lv}} := \frac{I_{\text{In}}}{a_1 \cdot S_{\text{el1}} \cdot n_{\text{el1}}} \quad j_1 = 5.919 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

I.3. Tôle magnétique statorique:

coefficient du remplissage du paquet des statorique: $K_{\text{fer}} := 0.97$

Largeur inférieur de l'encoche:

$$b_{\text{enc1}} := 11.5 \quad (\text{mm})$$

Largeur supérieur de l'encoche:

$$b_{\text{enc2}} := 14 \quad (\text{mm})$$

Largeur de la fente:

$$b_{\text{f1}} := 5.4 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de la dent:

$$h_{z1} := 28.18 \quad (\text{mm})$$

1. La hauteur du dos du stator:

$$h_{c1} := \frac{(D_{\text{ex1}} - D_1)}{2} - h_{z1} \quad h_{c1} = 51.82 \quad (\text{mm})$$

La hauteur de la fente:

$$h_{\text{f1}} := 1.68 \quad (\text{mm})$$

2. La hauteur de l'encoche statorique:

$$h_{\text{enc1}} := h_{z1} - h_{\text{f1}} \quad h_{\text{enc1}} = 26.5 \quad (\text{mm})$$

3. La largeur de la dent statorique:

$$b_{z1} := \left[\frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_{f1})}{Z_1} \right] - b_{enc1} \quad b_{z1} = 10.318 \quad (\text{mm})$$

4. Induction dans la dent statorique:

$$B_{z1} := \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z1}} \quad B_{z1} = 1.618 \quad (\text{T})$$

5. Induction dans la culasse statorique:

$$B_{c1} := \frac{\alpha_i \cdot \tau_1 \cdot B_\delta}{2 \cdot K_{fer} \cdot h_{c1}} \quad B_{c1} = 1.238 \quad (\text{T})$$

6. La section de l'encoche occupée par l'enroulement

$$e_1 := 1 \quad (\text{mm})$$

$$e := 0.25 \quad (\text{mm})$$

$$h_1 := h_{enc1} - e_1 - \frac{b_{enc2}}{2} \quad h_1 = 18.5 \quad (\text{mm})$$

$$S_{enc1} := \frac{[(b_{enc1} + b_{enc2}) \cdot h_1]}{2} + \frac{\pi \cdot (b_{enc2})^2}{8} \quad S_{enc1} = 312.844 \quad (\text{mm}^2)$$

$$S_{iso1} := \left(2 \cdot h_1 + \frac{\pi \cdot b_{enc2}}{2} \right) \cdot e + e_1 \cdot b_{enc1} \quad S_{iso1} = 26.248 \quad (\text{mm}^2)$$

7. Coefficient de remplissage de l'encoche:

$$K_{remp1} := \frac{n_{el1} \cdot U_{en1} \cdot (d_{is})^2}{S_{enc1} - S_{iso1}} \quad K_{remp1} = 0.746$$

I.4. Calcul du noyau rotorique

Données principales:

Nombre d'encoches rotoriques: $Z_2 := 24$ (encoches)

Nombre de phases: $m_2 := 1$

Nombre de voie parallèles: $a_2 := 1$

Les diamètre du rotor:

Diamètre extérieur: $D_{ex2} := 327.6$ (mm)

Diamètre intérieur: $D_2 := 110$ (mm)

1. Le pas d'entaille rotorique:

$$t_2 := \pi \cdot \frac{D_{ex2}}{Z_2} \quad t_2 = 42.883 \quad (\text{mm})$$

2. pas polaire:

$$\tau_2 := \pi \cdot \frac{D_{ex2}}{2 \cdot p} \quad \tau_2 = 257.296 \quad (\text{mm})$$

Largeur de la fente:

$$b_{f2} := 5.5 \quad (\text{mm})$$

Hauteur de la fente:

$$h_{f2} := 1 \quad (\text{mm})$$

Largeur de la clavette:

$$h_{k2} := 1.58 \quad (\text{mm})$$

Rayon du fond d'encoche:

$$r_2 := 8 \quad (\text{mm})$$

Hauteur de l'encoche:

$$h_{enc2} := 33 \quad (\text{mm})$$

Largeur minimale de l'encoche:

$$b_{en1} := 11 \quad (\text{mm})$$

Largeur maximale de l'encoche:

$$b_{\text{en}2} := 18.5 \quad (\text{mm})$$

3. Hauteur de la dent:

$$h_{z2} := h_{\text{enc}2} + (h_{f2} + h_{k2}) \quad h_{z2} = 35.58 \quad (\text{mm})$$

4. Hauteur de la culasse rotorique:

$$h_{c2} := 0.5 \cdot (D_{\text{ex}2} - D_2) - h_{z2} \quad h_{c2} = 73.22 \quad (\text{mm})$$

5. La largeur de la petite dent rotorique:

$$Z := 36$$

$$t_{z2} := \pi \cdot \frac{(D_{\text{ex}2} - b_{\text{en}2} - 2 \cdot h_{f2})}{Z} \quad t_{z2} = 26.8 \quad (\text{mm})$$

$$b_{z2} := t_{z2} - b_{\text{en}2} \quad b_{z2} = 8.3 \quad (\text{mm})$$

6. La largeur de la grosse dent rotorique:

$$b_{zg} := 4 \cdot t_2 - b_{\text{en}2} \quad b_{zg} = 153.031 \quad (\text{mm})$$

7. La section de l'encoche:

$$b_2 := 2 \cdot r_2 \quad b_2 = 16$$

$$h_{21} := 11 \quad (\text{mm})$$

$$h_{22} := h_{\text{enc}2} - \left(h_{21} + \frac{b_2}{2} \right) \quad h_{22} = 14 \quad (\text{mm})$$

$$S_{\text{enc}2} := \frac{(b_{\text{en}2} + b_2)}{2} \cdot h_{22} + \left[\pi \cdot \frac{(b_2)^2}{8} \right] + \frac{(b_{\text{en}1} + b_{\text{en}2})}{2} \cdot h_{21} \quad S_{\text{enc}2} = 504.281 \quad (\text{mm}^2)$$

$$S_{\text{iso}2} := (\pi \cdot r_2 + 2 \cdot h_{22} + 2 \cdot h_{21}) \cdot e + b_{\text{en}1} \cdot e_1 \quad S_{\text{iso}2} = 29.783$$

8. Section de la grosse dent rotorique:

$$\text{longueur relative de la partie bobinée au pas polaire: } \rho := 0.666$$

$$D_{02} := D_{ex2} - 2 \cdot h_{z2} + 2 \cdot 0.2 \cdot h_{z2} \quad D_{02} = 270.672 \quad (\text{mm})$$

$$S_{zg} := \frac{\pi \cdot (1 - \rho) \cdot D_{02} \cdot L_i}{2 \cdot p} \quad S_{zg} = 3.374 \times 10^4 \quad (\text{mm}^2)$$

9. Section de la petite dent rotorique:

$$S_{zp} := \frac{Z_2}{2 \cdot p} \cdot L_i \cdot b_{zp} \cdot (0.715 \cdot \rho) \quad S_{zp} = 1.127 \times 10^4 \quad (\text{mm}^2)$$

10. Section section totale des dents:

$$S_z := S_{zp} + S_{zg} \quad S_z = 4.501 \times 10^4 \quad (\text{mm}^2)$$

II.1.circuit magnétique statorique à vide:

1.Détermination du flux utile sous un pole:

$$E_n := K_e \cdot V_{1n} = 242.487$$

$$\Phi_u := \frac{E_n}{4 \cdot K_f \cdot K_{en1} \cdot W_1 \cdot f_1} \quad \Phi_u = 0.059 \quad (\text{wb})$$

2. Induction dans la culasse statorique:

$$B_{c1} := \frac{\alpha_i \cdot \tau_1 \cdot B_\delta}{2 \cdot K_{fer} \cdot h_{c1}} \quad B_{c1} = 1.238 \quad (\text{mm}^2)$$

3. Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse statorique:

$$L_{c1} := \pi \cdot \frac{(D_{ex1} - h_{c1})}{2 \cdot p} \quad L_{c1} = 344.146 \quad (\text{mm})$$

4. La force magnétomotrice dans la culasse du stator:

$$H_{c1} := 283 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$F_{c1} := L_{c1} \cdot H_{c1} \cdot 10^{-3} \quad F_{c1} = 97.393 \quad (\text{A})$$

5. Induction dans la dent statorique:

$$B_{z1} := \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{\text{fer}} \cdot b_{z1}} \quad B_{z1} = 1.618 \quad (\text{T})$$

6. La force magnétomotrice dans la dent du stator:

$$H_{z1} := 906 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$F_{z1} := h_{z1} \cdot H_{z1} \cdot 10^{-3} \quad F_{z1} = 25.531 \quad (\text{A})$$

7. Coefficient qui prend en considération l'existence des encoches dans le stator:

$$K_{\delta 1} := 1 + \frac{b_{f1}}{\left[t_1 - b_{f1} + \frac{(5 \cdot \delta \cdot t_1)}{b_{f1}} \right]} \quad K_{\delta 1} = 1.141$$

8. Coefficient qui prend en considération l'existence des encoches dans le rotor:

$$K_{\delta 2} := 1 + \frac{b_{f2}}{\left[t_2 - b_{f2} + \frac{(5 \cdot \delta \cdot t_2)}{b_{f2}} \right]} \quad K_{\delta 2} = 1.069$$

9. Coefficient de CARTER:

$$K_\delta := K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \cdot \rho + K_{\delta 1} \cdot (1 - \rho) \quad K_\delta = 1.193$$

10. La force magnétomotrice dans l'entrefer:

$$F_\delta := 0.8 \cdot B_\delta \cdot K_\delta \cdot \delta \cdot 10^3 \quad F_\delta = 787.684 \quad (\text{A})$$

11. Tension magnétique de l'armature du stator et de l'entrefer:

$$F_{\delta zc} := F_\delta + F_{z1} + F_{c1} \quad F_{\delta zc} = 910.608$$

12. flux de dispersion:

$$u_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad \left(\frac{\text{H}}{\text{m}} \right)$$

a. Coefficient de conductivité de l'encoche du rotor pour le flux de dispersion:

$$h_2 := h_{k2} + h_{f2} + e_1 \quad h_2 = 3.58 \quad (\text{mm})$$

$$h_{11} := h_{\text{enc}2} - e_1 \quad h_{11} = 32 \quad (\text{mm})$$

$$\lambda_e := \left(\frac{h_{11}}{2 \cdot b_{\text{en}2}} \right) + \left(\frac{h_2}{b_{\text{en}2}} \right) \quad \lambda_e = 1.058$$

b. coefficient de conductivité des têtes de dents du rotor pour le flux de dispersion:

$$\lambda_t := 0.2 + \frac{\delta}{2 \cdot t_2} \quad \lambda_t = 0.213$$

c. coefficient de conductivité magnétique

$$\lambda_\Phi := \frac{8 \cdot p}{Z_2} \cdot (\lambda_e + \lambda_t) \quad \lambda_\Phi = 0.847$$

$$\Phi_\sigma := \mu_0 \cdot \lambda_\Phi \cdot I_i \cdot F_{\delta_{zc}} \cdot 10^{-3} \quad \Phi_\sigma = 4.608 \times 10^{-4} \quad (\text{wb})$$

II.2.circuit magnétique rotorique à vide

1.flux dans la base des dent du rotor:

$$\Phi_2 := \Phi_\sigma + \Phi_u \quad \Phi_2 = 0.06 \quad (\text{wb})$$

2. L'induction dans la culasse rotorique:

$$B_{c2} := \frac{\Phi_2 \cdot 10^6}{L_i \cdot (D_{\text{ex}2} - 2 \cdot h_{z2} - D_2)} \quad B_{c2} = 0.856 \quad (\text{T})$$

3. Longueur moyenne des lignes du champ dans la culasse rotorique:

$$L_{c2} := \left[\frac{(D_{\text{ex}2} - 2h_{z2})}{2} \right] \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2p}\right) \quad L_{c2} = 90.665 \quad (\text{mm})$$

4. La force magnétomotrice dans la culasse du rotor:

$$H_{c2} := 94 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$F_{c2} := L_{c2} \cdot H_{c2} \cdot 10^{-3} \quad F_{c2} = 8.523 \quad (\text{A})$$

5. L'induction dans les dents rotoriques:

$$B_{z2} := \frac{\Phi_2 \cdot 10^6}{S_z} \quad B_{z2} = 1.323 \quad (\text{T})$$

6. La force magnétomotrice dans les dents du rotor:

$$H_{z2} := 220 \quad \left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$$

$$F_{z2} := h_{z2} \cdot H_{z2} \cdot 10^{-3} \quad F_{z2} = 7.828 \quad (\text{A})$$

7. Fmm du rotor:

$$F_{zc} := F_{z2} + F_{c2} \quad F_{zc} = 16.35$$

8. Fmm d'excitation a vide:

$$F_{ex} := F_{\delta zc} + F_{zc} \quad F_{ex} = 926.958 \quad (\text{A})$$

9. Coefficient de saturation de la machine:

$$K_u := \frac{F_{ex}}{2 \cdot F_{\delta}} \quad K_u = 0.588$$

10. Calculs de résistance active et de la réactance de fuite de l'enroulement statorique:**a. Résistance active de phase:**

$$\rho_{cu} := 17.2 \cdot 10^{-9}$$

$$Y_{1\text{moy}} := \frac{Z_1}{2 \cdot p} \quad Y_{1\text{moy}} = 12$$

$$T_{1\text{moy}} := \pi \cdot \frac{(D_1 + h_{z1})}{Z_1} \quad T_{1\text{moy}} = 23.443 \quad (\text{mm})$$

$$b_{1\text{moy}} := T_{1\text{moy}} \cdot Y_{1\text{moy}} \quad b_{1\text{moy}} = 281.314 \quad (\text{mm})$$

$$L_{1f} := (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{1\text{moy}} + 15 \quad L_{1f} = 420.092 \quad (\text{mm})$$

$$L_{1\text{moy}} := 2 \cdot (L_i + L_{1f}) \quad L_{1\text{moy}} = 1.791 \times 10^3 \quad (\text{mm})$$

$$R_1 := \frac{(\rho_{cu} \cdot W_1 \cdot L_{1moy} \cdot 10^3)}{a_1 \cdot n_{el1} \cdot S_{el1}} \quad R_1 = 0.01 \quad (\Omega)$$

a.1.résistance active en unités réduite:

$$R_{1r} := R_1 \cdot \frac{I_{1n}}{V_{1n}} \quad R_{1r} = 0.016 \quad (ur)$$

a.2.vérification de (R_{1r}):

$$R_{1r} := \frac{(\pi \cdot D_1 \cdot A_1 \cdot j_1 \cdot L_{1moy} \cdot 10^{-2})}{114 \cdot 10^4 \cdot m_1 \cdot V_{1n} \cdot I_{1n}} \quad R_{1r} = 0.016 \quad (ur)$$

b.Calcul de la réactance de fuite par phase de l'enroulement statorique:**b.1.coefficient de dispersion de l'encoche:**

$$K_s := 0.75 \cdot \beta_1 + 0.25 \quad K_s = 0.875$$

$$A_{11} := 0.25 \cdot (K_s - 0.6667) \quad A_{11} = 0.052$$

$$\lambda_{enc1} := K_s \cdot \left(\frac{h_{f1}}{b_{f1}} + \frac{e_1}{b_{enc2}} \right) + \frac{h_{enc1} \cdot A_{11}}{b_{enc2}} \quad \lambda_{enc1} = 0.433$$

b.2.coefficient de dispersion des parties frontales:

$$\lambda_{f1} := 0.34 \cdot \frac{q_1}{L_i} \cdot (L_{1f} - 0.64 \cdot \beta_1 \cdot \tau_1) \quad \lambda_{f1} = 0.807$$

b.3.coefficient de dispersion différentiel:

$$\lambda_{d1} := \frac{0.027 \cdot \tau_1 \cdot \alpha_i}{K_\delta \cdot q_1 \cdot \delta} \quad \lambda_{d1} = 0.853$$

b.4. coefficient de dispersion des tetes de dents:

$$K_{\beta\delta} := \frac{b_{f1}}{\delta \cdot K_\delta} \quad K_{\beta\delta} = 4.113$$

$$K_k := 0.05$$

$$\lambda_k := 0.04 \cdot K_k + 0.07 \sqrt{\frac{(t_1 - b_{f1})}{b_{f1}}} \quad \lambda_k = 0.123$$

b.5. coefficient de dispersion globale du stator:

$$\lambda_1 := \lambda_{enc1} + \lambda_{d1} + \lambda_{f1} + \lambda_k \quad \lambda_1 = 2.216$$

b.6. Réactance de fuite du stator:

$$X_{\sigma} := 1.58 \cdot \left(\frac{p \cdot n}{60} \right) \left[\frac{(W_1)^2}{p \cdot q_1} \right] \cdot L_i \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-8} \quad X_{\sigma} = 0.042$$

b.7. Réactance de fuite en unités réduites en [ur]:

$$X_{\sigma r} := X_{\sigma} \cdot \frac{I_{1n}}{V_{1n}} \quad X_{\sigma r} = 0.065$$

b.8. vérification de la réactance de fuite :

$$X_{\sigma r} := \frac{0.39 \cdot (D_1 \cdot A_1)^2 \cdot L_i \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-11}}{m_1 \cdot V_{1n} \cdot Z_1 \cdot I_{1n}} \quad X_{\sigma r} = 0.065$$

c. Réactance de potier:

$$X_p := X_{\sigma} + 0.025 \quad X_p = 0.067$$

c.1. Réactance de potier en valeur réduite:

$$X_{pr} := X_p \cdot \frac{I_{1n}}{V_{1n}} \quad X_{pr} = 0.104 \quad (\text{ur})$$

II.3. circuit magnétique en charge:**1. F.m.m de l'induit:**

$$F_a := 1.35 \cdot I_{1n} \cdot \frac{W_1 \cdot K_{en1}}{p} \quad F_a = 4.502 \times 10^3$$

2. facteur de forme du champ d'excitation:

$$K_a := \frac{(\pi^2 \cdot \rho)}{8 \cdot \sin\left(\rho \cdot \frac{\pi}{2}\right)} \quad K_a = 0.949$$

3.F.m.m d'induit réduite à l'enrouement d'excitation:

$$F_{afm} := F_a \cdot K_a \qquad F_{afm} = 4.274 \times 10^3$$

Première méthode:

la Fmm en charge: 5190.96 (A)

Deuxième méthode:

la Fmm en charge: 4977.76 (A)

III. Dimensionnement de l'enrouement d'excitation:**III.1. Nombre d'encoche par pôles et par phases:**

$$\rho := \frac{2}{3} = 0.667$$

$$q_2 := \rho \cdot \frac{Z}{2 \cdot p} \qquad q_2 = 6$$

III.2. Coefficient de bobinage de l'enrouement d'excitation:

$$K_{r2} := 1$$

$$K_{in2} := 1$$

$$K_{d2} := \frac{\sin\left(\rho \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{q_2 \cdot \sin\left(\rho \cdot \frac{\pi}{q_2 \cdot 2}\right)} \qquad K_{d2} = 0.831$$

$$K_{enr2} := K_{r2} \cdot K_{d2} \cdot K_{in2} \qquad K_{enr2} = 0.831$$

III.3. Longueur d'une spire:

$$Y_{2moy} := \frac{Z_2}{2 \cdot p} \qquad Y_{2moy} = 6$$

$$T_{2moy} := \pi \cdot \frac{(D_{ex2} - h_{z2})}{Z_2} \qquad T_{2moy} = 38.225$$

$$b_{moy} := T_{2moy} \cdot Y_{2moy} \qquad b_{moy} = 229.352$$

$$L_{2f} := (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{\text{moy}} + 15 \quad L_{2f} = 345.267$$

$$l_{\text{exm}} := 2.5 \cdot (L_1 + L_{2f}) \quad l_{\text{exm}} = 2.051 \times 10^3 \quad (\text{mm})$$

III.4. Section de l'enroulement d'excitation:

$$mt_2 := 1.2$$

$$U_{\text{ex}} := 45 \quad (\text{v})$$

la Fmm en charge: $F_{\text{exc}} := 5190.96 \quad (\text{A})$

$$S_{\text{ex}} := \frac{2 \cdot p \cdot \rho_{\text{cu}} \cdot mt_2 \cdot l_{\text{exm}} \cdot F_{\text{exc}} \cdot 10^3}{U_{\text{ex}}} \quad S_{\text{ex}} = 19.534 \quad (\text{mm}^2)$$

III.5. Nombre de spires de l'enroulement d'excitation:

$$J_{\text{ex}} := 6.45 \left(\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right)$$

$$W_{\text{ex}} := \frac{F_{\text{exc}}}{S_{\text{ex}} \cdot J_{\text{ex}}} \quad W_{\text{ex}} = 41.201 \quad (\text{spires})$$

$$\text{round}(W_{\text{ex}}) = 41$$

III.6. Nombre de conducteur par encoches:

$$U_{\text{enc2}} := \frac{2 \cdot \text{round}(W_{\text{ex}})}{q_2} \quad U_{\text{enc2}} = 13.667$$

$$\text{round}(U_{\text{enc2}}) = 14$$

III.7. Resistance de l'enroulement d'excitation:

$$R_{\text{ex}} := \frac{\rho_{\text{cu}} \cdot 2p \cdot W_{\text{ex}} \cdot mt_2 \cdot l_{\text{exm}} \cdot 10^3}{S_{\text{ex}}} \quad R_{\text{ex}} = 0.357$$

III.8. Courant d'excitation en charge:

$$I_{\text{ex}} := \frac{F_{\text{exc}}}{W_{\text{ex}}} \quad I_{\text{ex}} = 125.992 \quad (\text{A})$$

III.9. Courant d'excitation maximale:

$$I_{\text{exmax}} := \frac{U_{\text{ex}}}{R_{\text{ex}}} \quad I_{\text{exmax}} = 125.992 \quad (\text{A})$$

III.10.Coefficient de surcharge:

$$K_{ex} := \frac{I_{exmax}}{I_{ex}} \quad K_{ex} = 1$$

III.11.Puissance d'excitation:

$$P_{ex} := U_{ex} \cdot I_{ex} \quad P_{ex} = 5.67 \times 10^3$$

III.12.coefficient de remplissage de l'encoche rotorique:

Nombre de conducteur élémentaire: $n_{el2} := 9$

$$d_{iso} := 1.685$$

$$K_{remp2} := \frac{n_{el2} \cdot U_{enc2} \cdot (d_{iso})^2}{S_{enc2} - S_{iso2}} \quad K_{remp2} = 0.736$$

IV. Calcul des pertes et du rendement:**1. Pertes magnétiques:****1.1. Pertes dans les dents statoriques:**

$$P \left(\frac{1}{50} \right) := 2.5 \quad \left(\frac{W}{Kg} \right)$$

$$K_{sup} := 1.75$$

$$\gamma_T := 7.8 \cdot 10^3 \quad \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$m_{z1} := \gamma_T \cdot Z_1 \cdot \left[\frac{(b_{enc2})^2}{4} + (h_1 \cdot b_{z1}) + (b_{enc1} \cdot h_{f1}) \right] \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot 10^{-9} \quad m_{z1} = 44.73$$

$$P_{f.zz} := K_{sup} \cdot P \left(\frac{1}{50} \right) \cdot m_{z1} \quad P_{f.zz} = 195.694 \quad (W)$$

1.2. Pertes dans la culasse statoriques:

$$K_{\text{supc}} := 1.5$$

$$m_{c1} := \gamma_T \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left[D_{\text{ex1}}^2 - (D_{\text{ex1}} - h_{c1})^2 \right] \cdot L_i \cdot K_{\text{fer}} \cdot 10^{-9} \quad m_{c1} = 135.808 \quad (\text{Kg})$$

$$P_{\text{fc}} := K_{\text{supc}} \cdot P \cdot \left(\frac{1}{50}\right) \cdot m_{c1} \quad P_{\text{fc}} = 509.281 \quad (\text{W})$$

2. Pertes électriques:**2.1. Pertes joules statoriques:**

$$P_{\text{js}} := m_1 \cdot (R_1 \cdot I_{1n}^2) \quad P_{\text{js}} = 3.947 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

2.2. Pertes d'excitation:

$$P_{\text{ex}} := R_{\text{ex}} \cdot I_{\text{ex}}^2 \quad P_{\text{ex}} = 5.67 \times 10^3 \quad (\text{w})$$

2.3. Pertes électrique supplémentaires:

$$P_{\text{sup}} := 0.005 \cdot P_e \cdot 10^3 \quad P_{\text{sup}} = 1.313 \times 10^3 \quad (\text{W})$$

3. Pertes mécaniques:**3.1. Pertes par frottement et ventilation:**

$$P_{\text{m1}} := 8 \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_1}{100}\right)^3 \quad P_{\text{m1}} = 646.866 \quad (\text{W})$$

4. La somme des pertes:

$$P_{\text{som}} := P_{\text{f.zz}} + P_{\text{fc}} + P_{\text{js}} + P_{\text{ex}} + P_{\text{sup}} + P_{\text{m1}} \quad P_{\text{som}} = 1.228 \times 10^4 \quad (\text{W})$$

5. calcul de rendement:

$$\eta := \frac{S_n \cdot 10^3 \cdot \cos(\varphi)}{S_n \cdot 10^3 \cdot \cos(\varphi) + P_{\text{som}}} \quad \eta = 0.942$$

Tableau des sections normalisées

D_{nu} [mm]	D_{iso} [mm]	S_{eff} [mm²]
0.75	0.815	0.442
0.80	0.865	0.503
0.85	0.915	0.567
0.90	0.965	0.636
0.95	1.015	0.709
1.00	1.080	0.785
1.06	1.140	0.883
1.12	1.200	0.985
1.18	1.260	1.094
1.25	1.330	1.227
1.32	1.405	1.368
1.40	1.485	1.539
1.50	1.585	1.767
1.60	1.685	2.011
1.70	1.785	2.270
1.80	1.885	2.540
1.90	1.995	2.830

B[T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/M]									
0.4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0.5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0.6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0.7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0.8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0.9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1.0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1.1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1.2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1.3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1.4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1.5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1.6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1.7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1.8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1.9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2.0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2.1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2.2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2.3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

**Tableau de magnétisation des dents de machines à courant alternatif
de l'acier 2013(T-1)**

B[T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/M]									
0.4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0.5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0.6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0.7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0.8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0.9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1.0	185	188	191	191	199	203	206	209	213	217
1.1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1.2	262	267	272	277	283	289	235	301	307	313
1.3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1.4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1.5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	720
1.6	750	788	826	864	902	490	982	1020	1070	1110
1.7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1.8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1.9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5530	5560
2.0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

**Tableau de magnétisation des dos de machines à courant alternatif
de l'acier 2013 (T-2)**

B[T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/M]									
0.4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0.5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0.6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0.7	78	78	80	81	82	83	84	85	86	87
0.8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0.9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1.0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1.1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1.2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1.3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1.4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1.5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1.6	1700	1860	2020	2100	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1.7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1.8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11200	11800	12400
1.9	13000	13600	14200	14800	15600	15600	17300	18100	18900	19800
2.0	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2.1	60000	67000	74000	81000	88000	95000	102000	169000	116000	123000
2.2	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2.3	290000	298000	306000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

Tableau de magnétisation de base de l'acier 2013(T-3)

Bibliographie

[1]A.IVANOV- SMOLENSKI

Machinesélectriques. Volume II

Editions Mir Moscou1983

[2]M. KOSTENKO et PIOTROVSKI

Machines électriques, tome II. Machines à courant alternatif

3^{eme} Edition Mir, Moscou 1979

[3]PHILIPPE BARRET

Machine électrique <Théorie et mise en œuvre >

Ellipse Edition marketing S.A 2002

[4]N.M KATMAN Moscou 1984

Calcul et construction des machines électriques

Edition atomique

[5]M^rM.T. BELASSEL

Cour de module 432 : Construction des machines électriques

[6]WWW.Wikipedia.com