

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique
Département d'Electrotechnique



Mémoire

de fin d'études

En vue de l'obtention

du diplôme de Master Professionnel

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Thème

*Etude et dimensionnement de machines
synchrones à pôles lisses et
à pôles saillants 35 kVA*

Proposé par :

M^r. Dj. BENTAHA
(Electro-Industries)

Dirigé par:

M^r. A. DICHE

Étudié par :

M^{elle}. Idja Fatma

M^{elle}. Djaroun Lynda

Promotion : 2011/2012

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir donné le courage et la volonté de mener à terme ce présent travail .


Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre gratitude à l'ensemble des personnes qui ont contribué chacun à sa manière , à l'accomplissement de notre formation .

En premier, toute notre reconnaissance à notre promoteur **Mr. DICHE AREZKI** , Maitre Assistant -classe A- au département d'Electrotechnique, qui nous a dirigé et beaucoup aidé afin de mener à bien ce travail .

Nos sincères remerciements à notre encadreur **Mr. BENTAHA DJILALI**, et toute l'équipe de **L'ENEL** pour leurs aide inestimable et leurs précieux conseils.

Merci à l'ensemble des membres de jury qui nous font l'honneur d'évaluer notre travail .

Merci à tous



Je dédie ce travail à :

A mes très chers parent : ALI et OUARDIA en témoignage d'affection et de reconnaissance pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leurs soutiens.

A ma grand-mère : Tassadite.

A mes très chers frères : Mohamed et Idir.

A mes très chères sœurs idéales : Malika, Samira, Anissa et Lila.

A ma très chère sœur : Fatiha, son marie et leurs enfants Abderrahmane, Lylia et Anaisse.

A ma très chère sœur : Lynda et son marie Ahcen.

A mes oncles en particulier : Slimane et sa famille.

A ma tante Ouiza et sa famille.


A mon très cher ami : Sofiane.

A mes meilleurs amis : Lyes, Kader, Saïd, Salim, Dhawia, Djamila, Drifa, Nora, Dahbia, Djimi, Madiha, Samiha, Khalida, Lynda, Djouhar, Lila, Kamilia.

A ma très cher binôme : Lynda et sa famille.

A toute la promotion ETH 2012.

FATMA
FATMA



Je dédie ce travail à :

A mes très chers parent : BELAID et Ouardia en témoignage d'affection et de reconnaissance pour leurs sacrifices, leurs encouragements et leurs soutiens.

A ma grand-mère : YEMA OUIZA

A mes très chers frères : Kaki, Saïd.

A mon très cher frère : Kamel, sa femme Baya et leur fils Rayane

A mes très chers sœurs idéales : Hassina, Kahina, Noria et leurs maries Madjid, Dahmane et Karim.

A mes nièces : Amel, Chaïma et Leticia.

A mon marie : Hacem et sa famille.

A mes tentes : Tassadite, Hadjila et Khalti Tarkia.

A mon oncle : Belaid, sa femme Fatiha et leurs enfants.

A mes meilleurs amis : Lyes, Kader, Saïd, Salim, Dhawia, Djamila, Drifa, Nora, Dahbia, Djimi, Madiha, Samiha, Khalida, Lynda, Djouhar, Lila, Kamilia.

A ma très cher binôme : Fatma et sa famille.

A toute la promotion ETH 2012.

LYNDA
LYNDA

Sommaire

Introduction générale

CHAPITRE I : Généralité sur l'alternateur

I-Introduction.....	01
I-1-Définition.....	01
I-2-Intérêt.....	01
I-3-Symboles électriques.....	01
I-4-Description.....	02
I-4-1-Les circuits électrique.....	02
I-4-2-La vitesse de synchronisme.....	03
I-5-Classification des alternateurs.....	03
I-5-1-Les machines à pôles saillants.....	03
I-5-2-Les machines à pôles lisses.....	04
I-5-3-Les machines à aimant permanent.....	04
I-6-Principe de fonctionnement.....	05
I-6-1-Force électromotrice d'un alternateur.....	05
I-6-2-Réaction magnétique d'induit.....	06
I-6-3-Chute de tension.....	06
I-7-Caractéristiques d'un alternateur.....	06
I-7-1-Essai à vide : Caractéristique $E_V(I)$	06
I-7-2-Essai en charge : Caractéristique externe $V(I)$	07
I-7-3-Essai en court-circuit : Caractéristique $I_{CC}(I_e)$	07
I-8-Modèles d'un alternateur.....	08
I-8-1-Modèle de Behn Eschenburg.....	08
I-8-1-1-Schéma équivalent d'une phase.....	08
I-8-1-2-Construction du diagramme de Behn Eschenburg.....	08
I-8-2-Modèle de Potier.....	10
I-8-3-Modèle de Blondel.....	12
I-8-4-Modèles de Fresnel.....	12
I-9-Refroidissements des alternateurs.....	13
I-9-1-Hydrogène.....	13
I-9-2-Refroidissement à l'eau des barres de rotor.....	14
I-10-Utilisation.....	15
I-11-Bilan des puissances	15
I-11-1-Puissance absorbée.....	15
I-11-2-Puissance utile.....	15
I-11-3-Bilan des pertes.....	16
I-11-4-Rendement.....	16
I-12-Avantages et Inconvénients.....	16
a- Avantages.....	16

b-Inconvénients.....	16
I-13-Conclusion.....	16

CHAPITRE II: dimensionnement de circuit magnétique de l'alternateur a pôles lisses et saillants

II-Introduction.....	17
II-1-Dimensions principales du stator.....	17
II-1-1-Etablissement de la formule de la longueur virtuelle.....	17
II-1-2-Dimensionnement de l'enroulement statorique.....	19
II-1-2-1-Nombre d'encoche par pole et par phase.....	19
II-1-2-2-L'angle électrique entre deux encoches voisines.....	19
II-1-2-3-Calcul de la puissance utile.....	19
II-1-2-4-Nombre de conducteur effectif dans l'encoche.....	20
II-1-2-5-Le nombre de spire d'une branche parallèle d'une phase.....	20
II-1-2-6-Section transversale de conducteur effectif de l'enroulement statorique.....	20
II-1-3-Dimensionnement de la feuille statorique.....	20
II-1-3-1-Hauteur du dos du stator (h_{c1}).....	20
II-1-3-2-Largeur de la dent (b_{z1}).....	21
II-1-3-3-Hauteur de la dent (h_z).....	21
II-1-3-4-La hauteur de l'encoche de stator.....	21
II-1-3-5-La largeur maximale de l'encoche (b_{en2}).....	21
II-1-3-6-La largeur minimale de l'encoche (b_{en1}).....	21
II-1-3-7-Section de l'encoche occupée par l'enroulement.....	21
II-1-3-8-Coefficient de remplissage(K_{rem}).....	22
II-1-4-Calcul de l'entrefer	22
II-1-4-1-Valeur minimale de l'entrefer.....	22
II-1-4-2-Valeur maximale de l'entrefer.....	22
II-2-Dimensionnement du noyau du rotor a pôles saillants.....	22
II-2-1-Largeur de l'arc de l'épanouissement polaire (b_{ep}).....	22
II-2-2-Rayon de l'épanouissement polaire	22
II-2-3-Largeur de la corde de l'épanouissement polaire (b_{ep}).....	23
II-2-4-Hauteur de l'épanouissement polaire (h_{ep}).....	23
II-2-5-Largeur de pole.....	23
II-2-6-Largeur de la fenêtre polaire (h_c).....	23
II-2-7-Hauteur de dos de rotor (h_{cr}).....	23
II-2-8-Hauteur bobinée du pole (h_p)	24
II-2-9-Diamètre intérieur du noyau rotorique.....	24
II-2-10-Dimensionnement de l'enroulement amortisseur.....	24
II-2-10-1-Section des barres de l'amortisseur.....	24
II-2-10-2-Diamètre de la barre.....	25
II-2-10-3-Vérification de la section des barres.....	25
II-2-10-4-Longueur de la barre.....	25
II-2-10-5-Le pas dentaire.....	25
II-2-11-Dimensionnement de l'encoche de rotor.....	25
a) Diamètre de l'encoche.....	25
b) Largeur de la fente.....	26
c) Hauteur de la fente	26
d) Section de la bague court-circuitant des barres.....	26

II-3-Dimensionnement de noyau de rotor a pole lisse.....	26
II-3-1-Longueur du paquet rotorique	26
II-3-2-Nombre d'encoche rotorique.....	26
II-3-3-Pas polaire rotorique.....	26
II-3-4-Pas d'entaine rotorique.....	27
II-3-5-Angle géométrique entre deux encoches voisines.....	27
II-3-6-Diamètre extérieur.....	27
II-3-7-Diamètre intérieur.....	27
II-3-8-Dimensionnement de la feuille rotorique.....	27
- Hauteur de la dent	27
- Largeur de la dent rotorique	27
- Hauteur de la clavette	27
- Hauteur de la fente	28
- Hauteur de la culasse rotorique	28
- Largeur moyenne de l'encoche	28
- La largeur minimale de l'encoche	28
- Calcule de la section totale de l'encoche	28
- Calcule de la section occupée par l'isolation.....	28
- Calcule de la section de l'encoche occupée par les conducteurs	28
II-4-Conclusion	31

CHAPITRE III: Paramètre de la machine a pôles lisses et a pôles saillant

III-Introduction.....	32
III-1-Calcul du circuit magnétique à vide.....	32
III-1-1-Détermination du flux sous un pôle.....	32
III-1-2-Fmm dans l'entrefer.....	32
a)Coefficient d'entrefer (K_{δ}).....	32
III-1-3-Fmm dans les dents statorique(F_z).....	33
a) Induction dans les dents du stator (B_z).....	33
III-1-4-Fmm dans la culasse du stator (F_{c1}).....	34
a)Induction dans la culasse statorique B_{c1}	34
III-1-5-La Fmm dans les dents du rotor.....	34
III-1-6-Coefficient de saturation magnétique du stator (K_s).....	34
III-1-7-Fmm dans les pôles (F_{pm}).....	35
a)Flux dans le pole.....	35
b) Induction dans le pole.....	36
III-1-8-la Fmm dans le dos du rotor (F_{c2}).....	36
a)l'induction dans le dos du rotor (B_{c2}).....	36
b) La Fmm (F_{c2}).....	36
III-1-9-Somme des Fmm du circuit magnétique par paire de pôles(F_{ex}).....	37
III-1-10-Valeurs réduites des F.m.m et des flux.....	37
III-2-Calcul des résistances actives de fuites de l'enroulement statorique.....	40
III-2-1-Résistances actives par phase de l'enroulement statorique (R_1).....	40
III-2-2-Réactance de fuite par phase de l'enroulement statorique (X_{σ}).....	41
a)Coefficient de conductibilité magnétique de dispersion de l'encoche.....	41

b) Coefficient de conductibilité magnétique de dispersion différentielle (λ_{dl}).....	41
c) Coefficient de dispersion des parties frontales (λ_{fl}).....	41
d) Coefficient de dispersion entre les cornes des dents (λ_k).....	42
e) Coefficient de dispersion globale du stator (λ_1).....	42
f) Réactance de fuite en unité réduite ($X_{\sigma r}^*$).....	42
III-3-Calcul du circuit magnétique en charge.....	42
III-3-1- Caractéristique partielles.....	42
III-3-2- Diagramme de BLONDEL.....	43
a) Construction du diagramme de BLONDEL.....	43
b) La F.m.m du stator F_{an}	43
III-4-Calcul de circuit magnétique à vide pour une machine à pôles lisse.....	46
III-4-1-Fmm d'excitation à vide par pôle.....	46
III-4-2-Coefficient de saturation ($K_{\delta a}$).....	46
III-4-3-Calcul de flux rotorique.....	46
III-4-4-Valeur relatives des Fmm et des flux.....	47
III-5-Diagramme de potier.....	50
III-6-Détermination de la force magnétomotrice en charge.....	51
III-7-Conclusion.....	55

CHAPITRE IV : Choix de dimensionnement du système d'excitation

IV-Introduction.....	56
IV-1-Dimensionnement de l'enroulement d'excitation.....	56
IV-1-1-La F mm par pôle de l'enroulement d'excitation.....	56
IV-1-2-Section de l'enroulement d'excitation.....	57
IV-1-3-Nombre de spire de l'enroulement d'excitation.....	58
IV-1-4-Nombre de conducteurs par encoches.....	58
IV-1-5-Résistance de l'enroulement d'excitation.....	58
IV-1-6-Courant d'excitation nominale en charge.....	58
IV-1-7-Courant d'excitation maximale.....	58
IV-1-8-Coefficient de surcharge.....	59
IV-1-9-Puissance d'excitation.....	59
IV-1-10-Coefficient de remplissage de l'encoche rotorique.....	59
IV-2-Comparaison entre les deux types de la machine synchrone.....	59
IV-2-1-Paramètres de dimensionnement.....	59
• Machine synchrone à pôles lisses.....	59
• Machine synchrone à pôles saillants.....	59
IV-2-2-Utilisation.....	60
• Machine à pôles lisses.....	60
• Machine à pôles saillants.....	60
IV-2-3 : Performances des deux types de la machines.....	60
IV-11-Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

Les machines synchrones jouent un rôle prépondérant dans la conversion électromécanique de l'énergie.

La construction des machines électriques tournantes est un domaine vaste et complexe, ceci s'explique par le grand nombre de paramètres qui interviennent dans le calcul.

L'établissement du projet d'une machine électrique commence par le choix des dimensions et des matériaux de ses parties actives et constructives, et en premier lieu ses dimensions principales qui sont le diamètre et la longueur. Une fois ce choix est fait, on exécute les calculs électriques et électromagnétiques. Ensuite, si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, on apporte des corrections nécessaires sur les dimensions du départ, puis on refait les calculs jusqu'à l'obtention d'une variante qui répond au cahier de charge.

Il est donc très important d'établir des relations qui existent entre les dimensions principales d'une part, et les données de cahier des charges, ainsi que les charges électromagnétiques, d'autre part.

Dans le cadre de notre travail, il nous est confié le calcul en vue de réalisation d'une machine synchrone triphasé (à pôles lisses et à pôles saillants) de moyenne puissance (35 kVA), tout en se rapportant au cahier des charges proposé par l'entreprise Electro-Industrie (ex E.N.E.L).

Le mémoire est réparti comme suit :

- Le premier chapitre consiste en les généralités sur l'alternateur.
- Le deuxième chapitre est consacré pour dimensionnement du circuit magnétique de la machine synchrone (pôles lisses et à pôles saillants).
- Le troisième chapitre est consacré pour les paramètres de la machine synchrone.
- Le quatrième chapitre traite le choix de dimensionnement du système d'excitation pour les deux types de la machine synchrone (à pôles lisses et à pôles saillants).

Cahier des charges

La puissance apparente	$S_n=35\text{kVA}$
Le coefficient de major de la Fém.	$K_e=1.05$
Coefficient de recouvrement virtuel	$\alpha_i=0.7$
Coefficient du forme de champ magné dans l'entrefer	$K_f=1.125$
Nombre d'encoches statorique	$Z_1=36$ encoches
Facteur de puissance	$\cos\phi=0.8$
Tension nominale	$U_n=400$ Volt
Nombre de paire de pôles	$p=2$
Fréquence	$f=50$ Hz
vitesse de rotation	$N=1500$ trs/min
Diamètre intérieur de stator	$D_{int}=210$ mm
Diamètre extérieur de stator	$D_{ext}=310$ mm
Résistivité de cuivre à 20°C	$\rho=17.2 \cdot 10^{-9}$ ohms.m
L'induction magnétique dans les dents statorique	$B_{z1}=1.65$ T
L'induction magnétique dans le dos statorique	$B_{c1}=1.6$ T
L'induction magnétique dans les dents rotorique	$B_{z2}=1.65$ T
L'induction magnétique dans le dos rotorique	$B_{c2}=1.7$ T
L'induction magnétique dans l'entrefer	$B_{\delta}=0.78$ T
La charge linéaire	$A=380000$ A/m

Chapitre I

Généralités sur l'alternateur

I -Introduction :

La machine synchrone est l'une des machines principales parmi les machines tournantes. Elle est utilisée comme un moteur, mais surtout elle joue un rôle principal dans le domaine de la production de l'énergie électrique:70% de l'énergie électrique mondiale est produite par des machines synchrones (alternateur).L'inconvénient la machine synchrone de ne pas fonctionner seule sans artifices. En effet à la vitesse rapide du champ tournant, les pôles réels du rotor ne peuvent pas s'accrocher aux pôles fictifs du stator à cause de l'inertie du rotor. [1]

I-1- : Définition :

Un alternateur synchrone est une machine électrique tournante fonctionnant en mode génératrice et produisant de l'énergie électrique alternative. [1]

I-2- : Intérêt :

L'alternateur convertit une puissance mécanique, qu'il absorbe sous la forme d'une rotation, en puissance électrique, qu'il délivre sous forme alternative, et ce au travers d'un principe simple et avec des rendements extrêmement importants puisque proches de100 %.[1]

Il se décline en différentes puissances, et peut à ce titre être intégré dans des systèmes Embarqués (groupes électrogènes, alternateur de voiture) aussi bien que dans des installations de puissance (barrages hydroélectriques, centrales thermiques, centrales nucléaires, etc.).À titre indicatif, un alternateur pédagogique de 1500 W pèse environ 30 kg pour quelques centaines de cm³, quand un alternateur de centrale peut délivrer plusieurs dizaines de MVA et avoir des diamètres de plusieurs dizaines de mètres.

I-3- : Symboles électriques :

Les symboles électriques utilisés pour représenter un alternateur synchrone triphasé à rotor bobiné sont reportés sur la Fig I-1 Remarquons que l'inscription GS dans l'induit signifie génératrice synchrone, et que le symbole dans l'inducteur signifie courant continu.

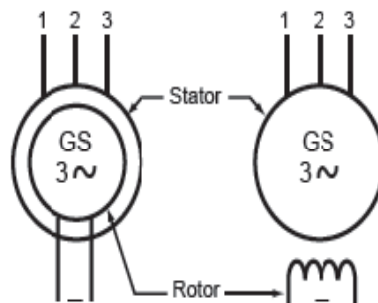


Fig I-1 : Symboles électriques d'un alternateur synchrone triphasé à rotor Bobiné.

I-4 : Description :

Un alternateur se compose d'un inducteur mobile ou rotor et d'un induit fixe ou stator. Cette différence par rapport à la génératrice à courant continu où l'inducteur est fixe et l'induit mobile se justifie par les grandes valeurs que peuvent prendre les tensions et courants dans les alternateurs. La disposition inverse reste cependant possible. [2]

I-4-1 : Les circuits électriques :

- L'inducteur : Dans le cas des machines dites à pôles saillants il est formé de noyaux polaires fixés sur un cylindre en acier coulé. Ces noyaux sont terminés par des pièces polaires généralement feuilletées et portent des bobines connectées en série destinées à recevoir le courant continu d'excitation j qui assure la magnétisation du circuit magnétique. Dans le cas d'un inducteur à pôles lisses les bobines sont logées dans des encoches pratiquées régulièrement et longitudinalement à la périphérie du cylindre constituant le rotor. La mise en série des bobines est telle que l'inducteur présente des pôles alternativement nord sud. Il y a toujours un nombre paire ($2p$) de pôles.

- L'induit : L'inducteur tourne à l'intérieur de l'induit et les deux parties sont séparées par un intervalle d'air nommé entrefer. Cet entrefer est d'épaisseur constante dans les machines à pôles lisses. L'induit en acier feuilleté comporte des encoches longitudinales sur sa face interne, destinées à recevoir les enroulements d'induit. Il s'agit de trois enroulements indépendants répartis dans les encoches du stator de telle sorte que leur axe soit décalé de 120° l'un par rapport à l'autre. Ces trois enroulements constituent les trois phases de l'alternateur. Ils sont généralement couplés en étoile. On évite leur couplage en triangle à cause du courant de circulation qu'il peut provoquer et de la tension plus grande qui en résulterait aux bornes de chaque phase, cette dernière nécessitant une isolation plus importante.[3]

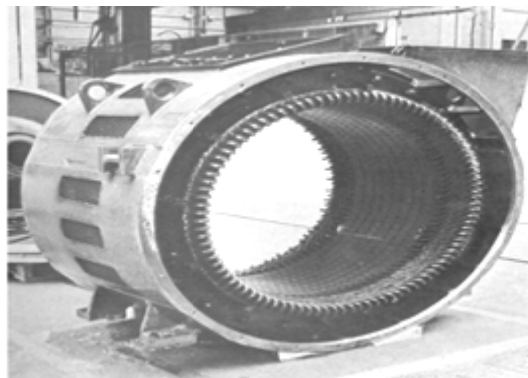


Fig. I. 2 : l'induit d'un alternateur.

I-4-2 : La vitesse de synchronisme :

Dans un alternateur synchrone, la vitesse de rotation n_s , le nombre de paires de pôles p et les fréquences f des tensions et des courants induits sont liés par la relation :

$$f = p n_s$$

Où n_s doit être exprimé en [tr/s] pour avoir une fréquence en [Hz].

Selon les applications, l'utilisateur ne contrôlera pas toujours la vitesse de rotation de l'alternateur, mais pourra toutefois vouloir imposer une fréquence à la tension et au courant fournis. En jouant sur le nombre de paires de pôles, il sera possible de s'adapter à toutes les situations. On peut citer comme exemple :

- Les centrales thermiques ou à vapeur, où l'on a besoin d'alternateurs tournant à des vitesses rapides de 1500 à 3000 tr/min.
- Les centrales hydroélectriques (barrages ou au fil de l'eau), où l'on a besoin d'alternateurs tournant à des vitesses lentes de quelques centaines de tr/min.[4]

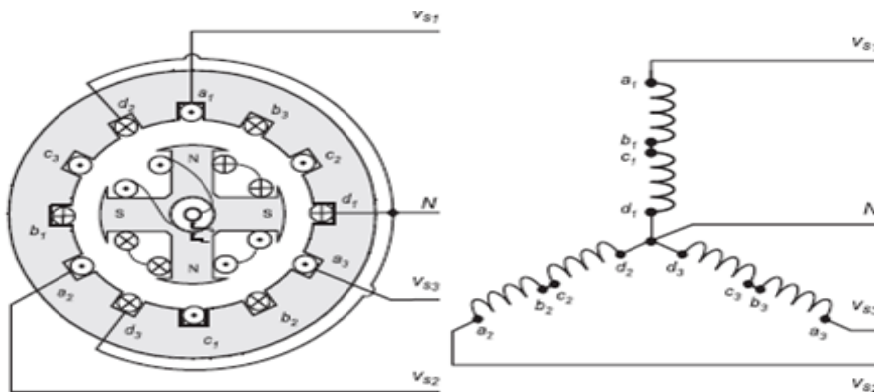


Fig I-3 : machine synchrone triphasée à 2 paires de pôles.

I-5 : Classification des alternateurs :

On peut classer les machines tournantes d'après le mode de construction utilisé pour la fabrication des rotors. On distingue les trois catégories suivantes :

I-5-1 : Les machines à pôles saillants :

Elles utilisent des pièces polaires rapportées sur une culasse, avec des enroulements d'excitation constitués par des bobines.[3]

L'ensemble du circuit magnétique est alors identique à celui d'une machine à courant continu, avec la seule différence qu'il est tournant au lieu d'être fixe. Comme pour celle-ci, le rotor d'un alternateur comporte n nombre pairs pole, que l'on distingue sur la figure suivante :



Fig I-4 : Rotor d'une machine synchrone à pôles saillants.

I-5-2 : Les machines à pôles lisses :

Ces machines ont un entrefer constant, l'enroulement d'excitation étant placé dans des rainures longitudinales usinées sur un cylindre d'acier massif, à sa sortie de fonderie. [1]

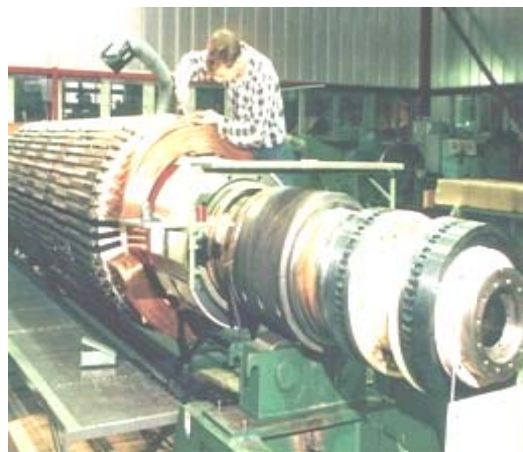


Fig I-5 : Rotor d'une machine synchrone à pôles lisses.

I-5-3 : Les machines à aimant permanent :

Le rotor du moteur est équipé d'aimants permanents. En général en terre rare pour obtenir un champ élevé dans un volume réduit.[4]

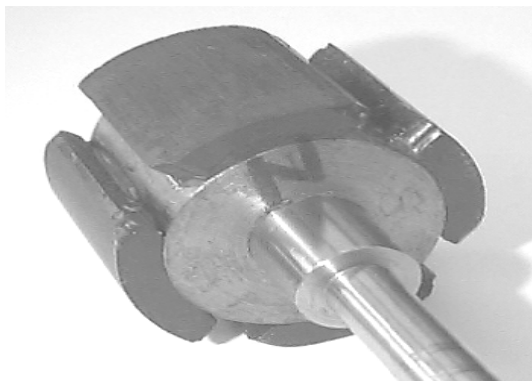


Fig I-6 : Rotor d'un moteur synchrone à aimant

I-6 : Principe de fonctionnement :

Le rotor de l'alternateur est entraîné en rotation de façon mécanique (turbine, moteur à combustion,...) à la vitesse de synchronisme, le courant continu circulant dans l'enroulement du rotor engendre dans l'entrefer un champ magnétique dont la composante fondamentale sinusoïdale comporte $2p$ pôles.

D'après la théorie de Faraday (loi de l'induction électromagnétique), qui énonce que :

a) si le flux à l'intérieur d'une spire varie en fonction du temps, une tension est induite entre ses bornes.

b) la valeur de cette tension induite est proportionnelle au taux de variation du flux.

Par définition, dans le SI, lorsque le flux à l'intérieur d'une boucle varie à un taux de 1 weber par seconde, une tension de 1 volt induite entre ces bornes.

Un aimant ou un électroaimant tourne à l'intérieur d'une spire la variation du flux sur cette spire y crée une force électromotrice induite.

I-6-1 : Force électromotrice d'un alternateur :

Le flux magnétique sort de pôle nord, il traverse l'entrefer qui entre les pièces polaire de rotor et de stator.

La f.é.m. d'induit créée par le déplacement relatif de circuit induit par rapport au circuit inducteur avec une vitesse (n) est identique à la vitesse de rotation de synchronisme (n_s).

Les pôles nord prennent la place des pôles sud à cause de la rotation de rotor qui donne un changement de sens du flux magnétique et aussi l'inversion de la f.é.m. Pour cette raison on peut dire que la f.é.m. produite est alternative définie par : $e = -N \frac{d\phi}{dt}$ d'une valeur efficace E exprimer par la relation de Boucherot. [5]

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot K_b \cdot N f \phi \Rightarrow E = 2.22 \cdot K_b \cdot N f \phi \quad (\text{I-1})$$

Φ : flux fourni par un pôle [W_b]

f : fréquence de réseaux.

N : nombre des conducteurs de l'induit.

K_b : coefficient de bobinage de l'enroulement.

I-6-2 : réaction magnétique d'induit :

Quand un alternateur débite, le courant d'enroulement d'induit crée des ampères-tours (champ magnétique) qui viennent perturber le champ de l'inducteur, c'est pour cette raison qu'on appelle ce phénomène «réaction d'induit».

On appelle donc le flux du stator Φ_s le flux de la réaction d'induit obtenu en charge, Φ_a le flux d'excitation qui compose avec Φ_s pour donner le flux totale Φ .

I-6-3 : chute de tension :

La tension aux bornes de l'alternateur lorsqu'il débite sur une charge est diminuer par rapport à la valeur de la f.é.m. à vide, et pour la détermination de cette chute, on peut dire que dans les machines de forte puissance, elle est mesurée directement sur une plate-forme, sinon on utilise la méthode indirecte qui consiste à la prédéterminer une fois les paramètres de la machine connus.

I-7 : caractéristiques d'un alternateur :**I-7-1 : Essai à vide : Caractéristique $E_V(I)$.**

Il sert à déterminer la caractéristique interne du l'alternateur ainsi la force électromotrice nominale.

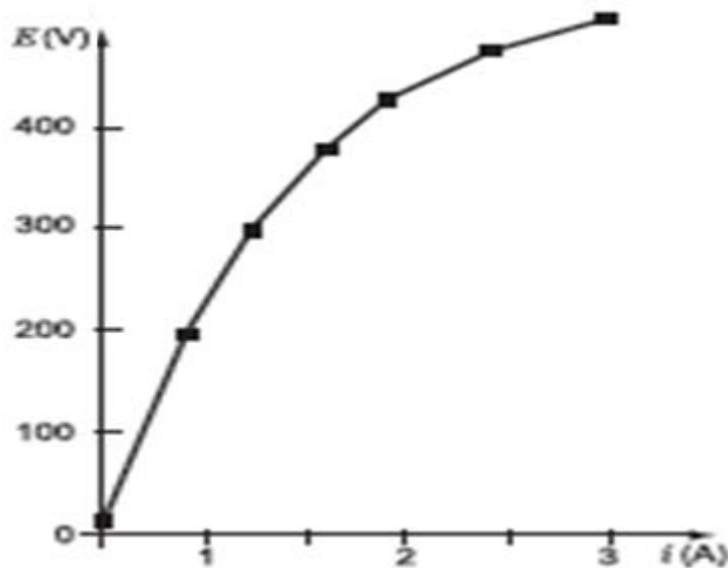


Fig I-7 : caractéristique d'un alternateur à vide

I-7-2 : Essai en charge : Caractéristique externe $V(I)$:

Pour la détermination de la caractéristique externe de l'alternateur ainsi que la tension nominale et le courant nominal.

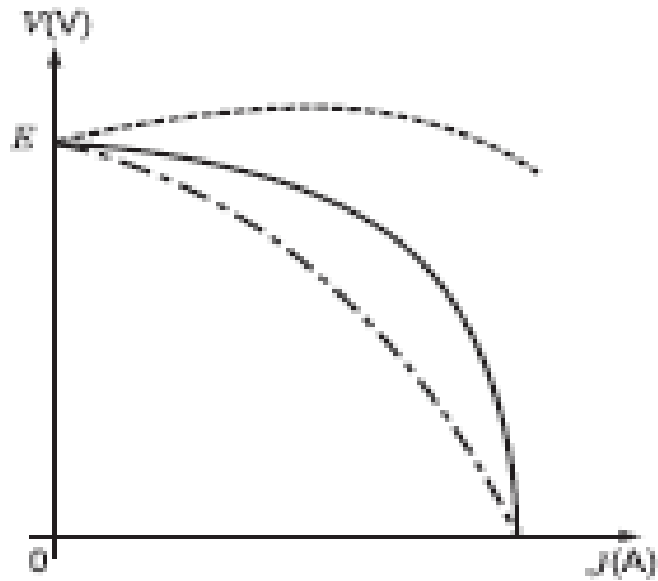


Fig I-8 : caractéristique d'un alternateur en charge

I-7-3 : Essai en court-circuit : Caractéristique I_{CC} (I_e) :

Il sert à la détermination de la réactance de synchronisme

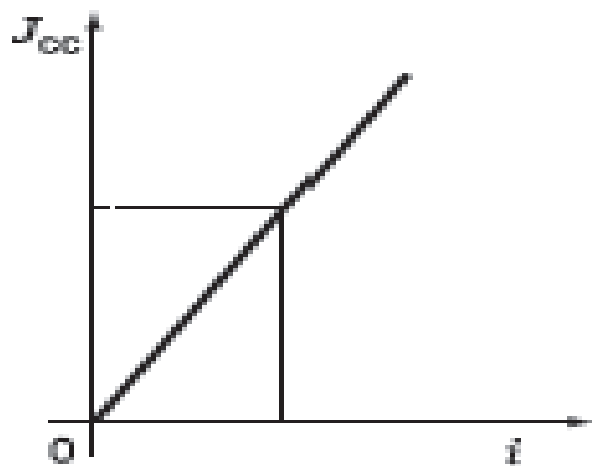


Fig I-9 : caractéristique d'un alternateur en court-circuit

I-8 : Modèles d'un alternateur :

I-8-1 : Modèle de Behn Eschenburg :

Il est utilisé pour la machine à pôle lisse qui est à une seule réactance. La machine est supposée non saturée, l'équation de fonctionnement est alors : [6]

$$\bar{E}_v = \bar{V} + R\bar{I} + jX_s\bar{I} \tag{I-2}$$

I-8-1-1 : Schéma équivalent d'une phase :

Le schéma électrique équivalent à un enroulement d'une génératrice synchrone à pôles lisses dans l'hypothèse de Behn-Eschenburg est le suivant :

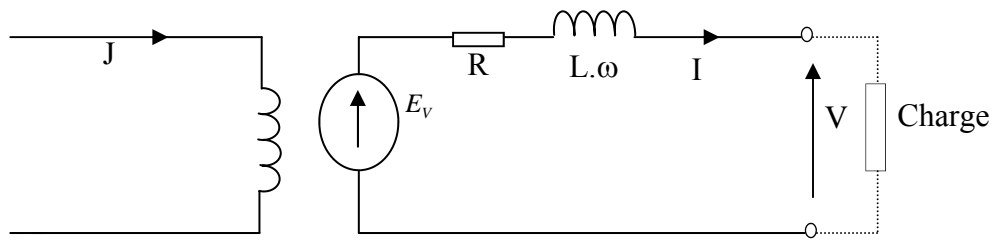


Fig. I-10 : schéma électrique équivalent d'une phase

I-8-1-2 : Construction du diagramme de Behn Eschenburg :

Connaissant l'impédance

$$Z = R + jL_s \cdot \omega \tag{I-3}$$

R est facile à mesurer (méthode volt-ampermétrique).

$X_s = L_s \cdot \omega$ est une réactance constante par hypothèse (machine non saturée). On peut la déterminer en utilisant les caractéristiques à vide $E_v (J)$ et en court-circuit $I_{cc} (J)$.

J : est connu

$E_v (J)$: donne E_v

$I_{cc} (J)$: donne I_{cc}

En court-circuit ($V = 0$), avec la même valeur de J :

$$E_v = Z_s \cdot I_{cc} \tag{I-4}$$

$$Z_s = \frac{E_v}{I_{cc}} \tag{I-5}$$

$$Z_s^2 = R^2 + X_s^2 \tag{I-6}$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2} \tag{I-7}$$

On peut déterminer Z_s à partir de la courbe $E_v (J)$ et la courbe $I_{cc} (J)$.

Pour la même valeur de J dans la zone linière :

$$Z_s = \frac{AC}{AB} \tag{I-8}$$

Pour une autre valeur de J' dans la zone de saturation on trouve une autre valeur pour Z_s .

On tient compte alors de la saturation :

$$Z_s = \frac{A'C'}{A'B'} \tag{I-9}$$

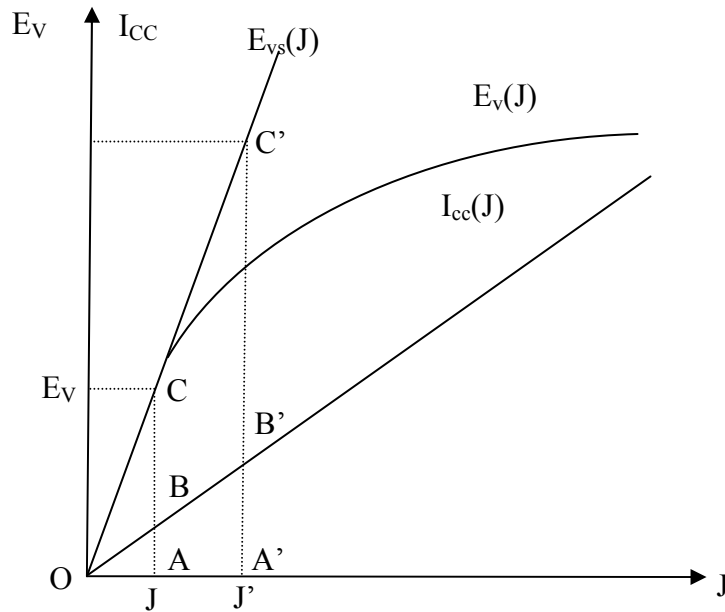


Fig I-11 : Détermination de la réactance synchrone

Le diagramme se présente comme suit :

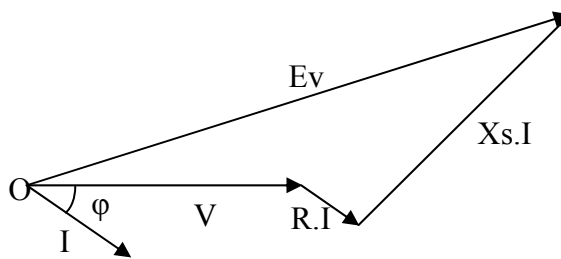


Fig I-12 : constructions de diagramme de Behn-Eschenburg

I-8-2 : Modèle de Potier :

Potier tient compte de la saturation. Il renonce à l'addition des flux. Potier considère que dans la machine en charge il existe un flux commun au stator et au rotor et que chaque armature possède un flux de fuite.[6]

Il écrit pour le stator : $\varphi_{st} = \varphi_{ch} + \varphi_{fst}$ et pour le rotor : $\varphi_{st} = \varphi_{ch} + \varphi_{fst}$. Il considère que φ_{ch} est dû uniquement à un courant fictif inducteur J_{ch} . De ce fait il considère que

$E_{ch} = f(J_{ch})$ est identique à la caractéristique à vide. Le courant J_{ch} résulte du courant réel J dans l'inducteur et d'une fraction $\alpha.I$ courant d'induit. α est le coefficient d'équivalence des courants. De plus le flux de fuite φ_{st} circulant en grand partie n'est pas saturable il désigne une constante λ l'inductance de fuite de stator $\varphi_{st} = \lambda.I$ on peut présenter une phase de la machine par le schéma équivalent suivant :

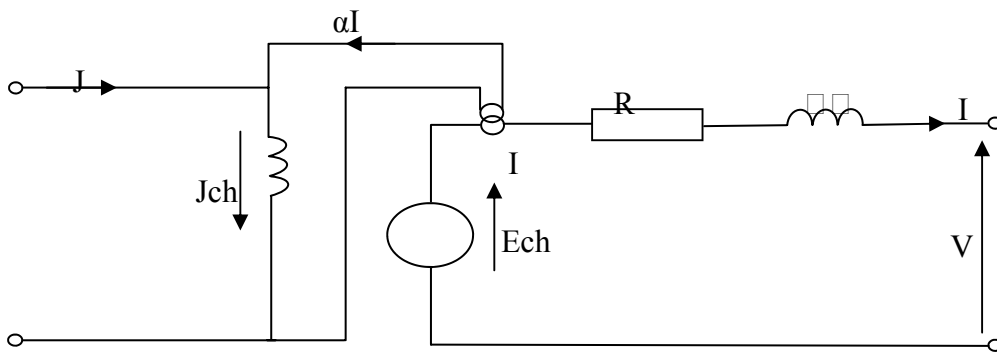


Fig I-13: schéma équivalent électrique d'une phase

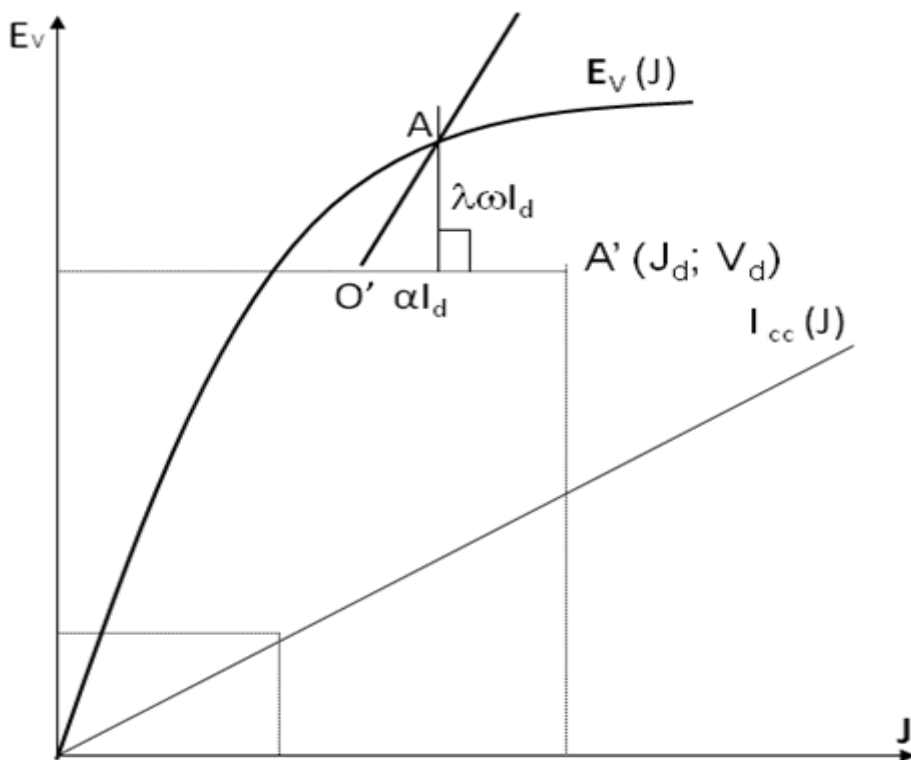


Fig I-14 : diagramme de potier

En charge on aura :

$$\bar{J}_{ch} = \bar{J} + \alpha \cdot \bar{I}$$

$$\bar{E}_{ch} = \bar{V} + R \cdot \bar{I} + \bar{J} \cdot \lambda \cdot \omega \cdot \bar{I}$$

En supposant connu α , λ , et le déphasage φ du courant sur la tension on obtient le diagramme suivant :

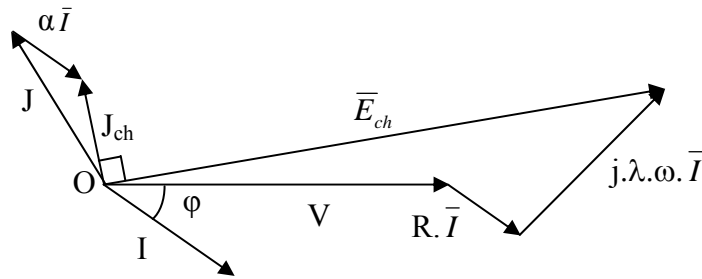


Fig I-15: constructions de diagramme de Potier

Le courant J_{ch} est en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur E_{ch} .

$\alpha . I$. est parallèle à I (I connu)

I-8-3 : modèle de Blondel :

Dans cette méthode la réaction d'induit est décomposée en une réaction directe ou longitudinale et une réaction transversale et l'on admet que le courant d'induit agit de façon différente par ses deux composantes active et réactive $I \cos \varphi$ et $I \sin \varphi$, φ étant le déphasage de I sur la f.é.m. [6]

Pour le déterminer ces réactances on provoque un essai en faible glissement, les valeurs de la tension v et du courant I varient car la réactance passe successivement par les valeurs X_d et X_t .

X_d : est la valeur maximale du rapport V/I .

X_t : la valeur minimale du rapport V/I .

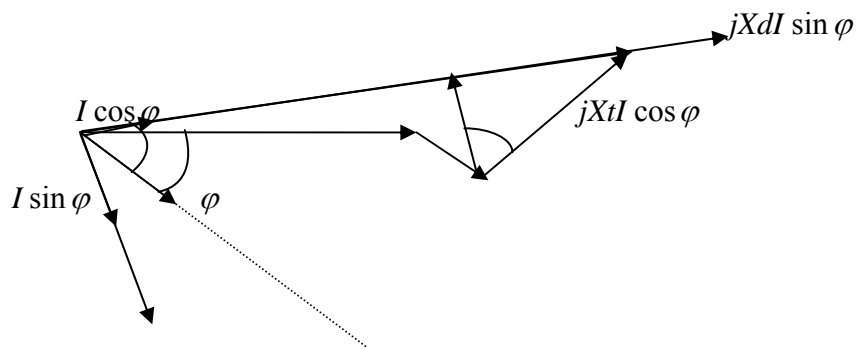


Fig : I-16 : construction de diagramme de blondel

I- 8-4 : modèles de Fresnel :

- très souvent $r.I$ est négligé.
- en traçant le diagramme à l'échelle, il est possible d'en déduire certaines grandeurs.
- si la charge est résistive $\varphi = 0$. [6]

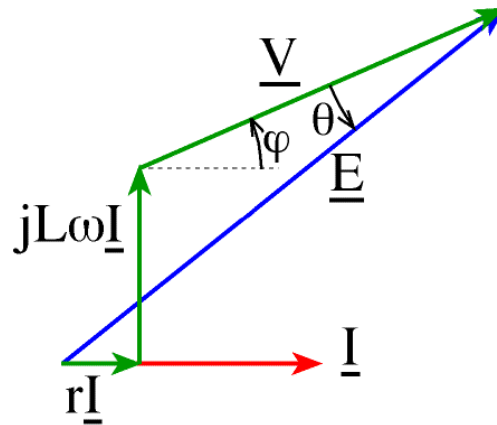


Fig I-17 : construction de diagramme de Fresnel

I-9 : refroidissements des alternateurs :

Deux procédés sont utilisés :

Réfrigération par hydrogène pour le rotor et le circuit magnétique stator.

Réfrigération à l'eau pour les barres de stator. [7]

1-9-1 : Hydrogène :

Le rôle de l'installation est d'assurer le refroidissement du rotor; du circuit magnétique du stator et des organes frontaux de serrages de l'alternateur. L'hydrogène a été choisi pour ses propriétés physiques supérieures à l'air.

-Sa densité est quatorze fois inférieure à l'air

-Sa conductivité thermique est sept fois plus grande

-Son coefficient de convection est une fois et demi plus grand

- Les éventuelles fuites s'échappent à l'air libre

-Le silence de fonctionnement est notablement amélioré.

La circulation du gaz est assurée par deux ventilateurs montés sur l'arbre principal à chaque extrémité de celui-ci (voir figure). Le circuit magnétique est subdivisé en 85 paquets de tôles

séparés par des événements de 8 à 10 mm de largeur dans lesquels circule le gaz. La réfrigération de l'hydrogène est assurée par quatre réfrigérants internes à la machine, alimentés en eau.

La température normale du gaz chaud est de 60° avec une limite à 70° ce qui correspond à une température stator de 70°. La différence H2 chaud / H2 froid est de l'ordre de 20°. Le refroidissement du rotor est de type direct. La circulation globale se faisant aux deux extrémités sous les frettes.

La pression nominale d'hydrogène est de 3,5 bars relatifs. Le débit est de 45m³/s

La circulation du gaz s'effectue en circuit fermé à l'intérieure de la carcasse.

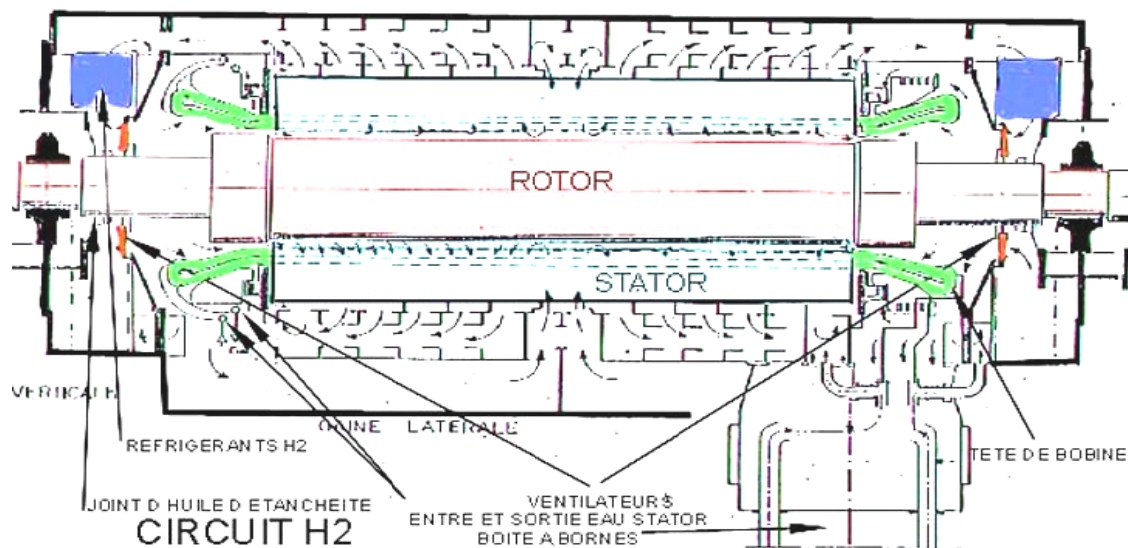


Figure I-18: refroidissement d'un alternateur

1-9-2: Refroidissement à l'eau des barres de rotor :

Les barres du stator sont constituées de plusieurs barres élémentaires. A l'empilage il a été laissé au centre un espace, ce qui constitue un conducteur creux.

L'ensemble de toutes ces cavités sont reliées entre elles au droit des têtes de bobines et alimentées en eau déminéralisée.

Le rôle de cette circulation est double :

-Assurer le refroidissement de l'enroulement statorique.

-Maintenir la température de l'eau constante à l'entrée du stator afin de diminuer le déplacement relatif entre les barres du bobinage et le circuit magnétique.

Le système permet également de protéger la machine contre le gel à l'arrêt ou de réchauffer celle ci avant démarrage. La circulation s'effectue en circuit fermé ,avec filtration et desioniseur permettant de maintenir une valeur de conductivité < a 5 micros Siemens / cm La valeur d'arrêt étant fixe a 9 micros Siemens, la circulation est assurée par deux moto pompes, l'eau est refroidie à l aide de réfrigérants.

Afin d'éviter en cas de fuites, que l'eau ne pénètre dans la machine, la pression H2 est maintenue supérieure de 0,2 bar à celle de l'eau. Une surveillance continue analyse la présence d'hydrogène dans l'eau.

Lors d'une vidange du circuit d'eau, il est effectué des chasses d'azote dans les barres pour Assécher les canaux et prévenir toute oxydation.

I-10 : utilisation :

Ils sont utilisés pour produire un courant triphasé, et fournir l'énergie électrique aux réseaux. On les trouve dans les barrages, sur les fleuves ou les lacs.

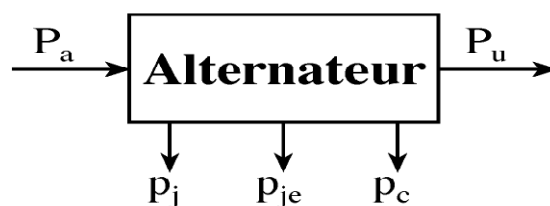
-pour les alternateurs de grande et moyenne puissance, on les utilise ou ils sont entraînés par des turbines hydrauliques, des turbines à vapeur, à gaz, même un moteur diesel.

-pour les petites puissances ils sont utilisés comme des groupes auxiliaires des grandes centrales.

-Il fournit une partie de l'énergie du réseau.

I-11 : Bilan des puissances :

I-11-1 : Puissance absorbée



La turbine, ou le moteur à essence pour un groupe électrogène, entraîne l'arbre de l'alternateur. La puissance absorbée est mécanique.

$$P_a = \Omega S \cdot C_u = 2\pi n S C_u \quad \text{(I-10)}$$

Ω : pulsation de rotation en rad.s^{-1}

n_s : vitesse en trs.s^{-1}

C_u : couple utile sur l'arbre en N.m

Si l'alternateur n'est pas auto-excité il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbée par l'excitation (rotor).

$$P_a = \Omega_s C_u + U_e I_e = 2\pi n_s C_u + U_e I_e \quad (\text{I-11})$$

I-11-2 : Puissance utile :

En triphasé avec une charge équilibrée de facteur de puissance $\cos \varphi$

$$P_u = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (\text{I-12})$$

I-11-3 : Bilan des pertes :

-Pertes par effet Joule dans l'inducteur :

$$P_{je} = U_e I_e = r_e I_e^2 \quad (\text{I-13})$$

-Pertes par effet Joule dans l'induit :

$$P_j = \frac{3}{2} RI^2 \quad (\text{I-14})$$

-Pertes dites « collectives » P_c .

-Pertes mécaniques et pertes fer qui ne dépendent pas de la charge.

I-11-4 : Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{2\pi n_s C_u + U_e I_e} \text{ ou } \eta = \frac{P_u}{P_u + U_e I_e + \frac{3}{2} RI^2 + P_c} \quad (\text{I-15})$$

I-12 : Avantages et Inconvénients:

a- Avantages :

- Son rendement est excellent, il est supérieur à tous les autres types des machines.
- Sa vitesse est constante, même si la tension d'alimentation ou si la charge, qu'il entraîne, subissent des variations élevées.
- On peut l'alimenter directement à des tensions élevées.
- Elle peut soit fonctionner comme moteur avec un bon facteur de puissance, soit fournir (ou absorber) de l'énergie réactive au réseau sur lequel elle est branchée.

b-Inconvénients :

- Elle peut décrocher dans le cas d'une surcharge brusque ou d'une chute de tension importante du réseau. Ceci nécessite une surveillance particulière avec l'utilisation de dispositifs de sécurité.
- Elle a besoin d'un générateur à courant continu pour assurer son excitation. Cet organe supplémentaire augmente le prix de revient.

- Elle ne peut démarrer qu'à très faible charge en exigeant soit un moteur auxiliaire de lancement, soit le démarrage en asynchrone avec réducteur de tension au démarrage.

I-13 : Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'alternateur. En premier lieu, nous avons décrit l'alternateur. Nous avons donné sa description, et nous avons présenté également les différents classes et son principe de fonctionnement, et donné quelque domaine d'utilisation de l'alternateur synchrone. Enfin nous avons énuméré ses avantages et inconvénients.

Chapitre II

Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur à pôles lisses et à pôles saillants

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur à pôles lisses et saillants

II -Introduction :

Ce chapitre consiste à déterminer toutes les dimensions des différentes parties de la machine, les paramètres de dimensionnements sont d'ordre géométrique, électrique et magnétique. [8]

Paramètres électriques :

- la charge linéaire A. [A /m]
- la densité du courant dans les conducteurs : J_1 [A /mm²]

Paramètres magnétiques :

- le nombre de paires de pôles p.
- l'induction dans l'entrefer B_δ .
- l'induction dans les différentes parties du circuit magnétique.

Paramètres géométrique :

- le diamètre intérieur du stator (D_{int}).
- la longueur virtuelle du stator (L_i).

II-1 : Dimensions principales du stator :

II-1-1 : Etablissement de la formule de la longueur virtuelle : [mm]

$$L_i = \frac{P_i \cdot 6,1 \cdot 10^{12}}{K_f \cdot K_{en1} \cdot n \cdot B_\delta \cdot \alpha_i \cdot A \cdot (D_{int})^2} \quad (\text{II-1})$$

n : vitesse de rotation : [tr /mn]

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = 1500 \quad (\text{II-2})$$

p : nombre de pôles.

La puissance électromagnétique P_i en [W] en s'écrit comme suit :

$$P_i = K_e \cdot S_{n0} = \frac{K_e \cdot P_{n0}}{\cos \varphi} \quad (\text{II-3})$$

P_{n0} : puissance nominale.

A = 38000A/m : la charge linéaire.

$\cos \varphi = 0,8$: Facteur de puissance nominale.

$K_e = 1,05$; coefficient de majoration de la F.é.m. d'induction mutuelle, quand on passe de la marche à vide à la marche en charge nominale.

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur a pôles lisses et saillants

$\alpha_i=0,7$; coefficient de recouvrement polaire virtuelle.

$K_f=1,125$; facteur de forme relatif au champ d'excitation.

Le coefficient de bobinage de l'enroulement de stator pour l'harmonique fondamentale K_{en1} s'écrit :

$$K_{en1} = K_d \cdot K_r \cdot K_i \quad (\text{II-4})$$

K_d : coefficient de distribution.

$$K_d = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{q_1 \sin \frac{\alpha}{2 q_1}} \quad (\text{II-5})$$

α : Zone de phase.

$$\alpha = \frac{\pi}{m} \quad (\text{II-6})$$

q_1 : nombre d'encoches par pôle et par phase.

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 p m} \quad (\text{II-7})$$

K_r : coefficient de raccourcissement.

$$K_r = \sin \frac{\beta \cdot \pi}{2} \quad (\text{II-8})$$

β : Fraction du pas polaire.

$$\beta = \frac{Y}{\tau} \quad (\text{II-9})$$

Y : le pas d'enroulement.

$$Y = \frac{Z_1}{2 p} \pm \varepsilon \quad (\text{II-10})$$

τ : le pas polaire

$$\tau = \frac{Z_1}{2p} \quad (\text{II-11})$$

Z_1 = le nombre d'encoches statorique.

$K_f = 1$; coefficient d'inclinaison d'encoches.

Vérification du coefficient de longueur : (λ)

$$\lambda = \frac{L_i}{D_{\text{int}}} \quad (\text{II-12})$$

Avec : $0,7 < \lambda < 1,3$

II-1-2 : Dimensionnement de l'enroulement statorique :

On utilise la feuille statorique fabriqué à Electro-Industrie ex(E.N.E.L) dont les encoches sont de type ovale semi –fermé, l'enroulement est de type imbriqué simple.

II-1-2-1 : Nombre d'encoche par pôle et par phase :

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm} \quad (\text{II-13})$$

$m=3$: nombre de phases.

II-1-2-2 : L'angle électrique entre deux encoches voisines :

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad (\text{II-14})$$

II-1-2-3 : Calcul de la puissance utile : [KW]

$$P_{n0} = m \cdot V_1 \cdot I_{1n} \cdot \cos \varphi \quad (\text{II-15})$$

V_1 : la tension simple en charge de la machine.

I_{1n} : courant nominale.

Avec V_1 en [V]

$$V_1 = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}} \quad (\text{II-16})$$

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur à pôles lisses et saillants

U_{1n} : tension composée en charge de la machine.

II-1-2-4 : Nombre de conducteur effectif dans l'encoche (U_{en1}) :

$$U_{en1} = \frac{A \cdot t_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}}{I_{1n}} \quad (\text{II-17})$$

a_1 : nombre de branches parallèles de l'enroulement statorique

Avec $a_1=4$

t_1 : le pas dentaire en [mm].

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_{int}}{Z_1} \quad (\text{II-18})$$

II-1-2-5 : Le nombre de spire d'une branche parallèle d'une phase : (W_1)

$$W_1 = p \cdot q_1 \frac{U_{en1}}{a_1} \quad (\text{II-19})$$

II-1-2-6 : Section transversale de conducteur effectif de l'enroulement statorique : (S_{1eff}) [mm²]

$$S_{1eff} = \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot J_1} \quad (\text{II-20})$$

J_1 : la densité de courant choisie en fonction de la protection, de la classe d'isolation et de la tension avec ($5 < J_1 < 6,5$) [A/mm²].[1]

II-1-3 : Dimensionnement de la feuille statorique :

Le noyau de stator est fabriqué avec des tôles magnétiques d'épaisseur de 0,5 mm.[1]

II-1-3-1 : Hauteur du dos du stator (h_{c1}) :[mm]

$$h_{c1} = 0,5 \cdot \frac{\alpha_i \cdot \tau \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{c1}} \quad (\text{II-21})$$

$K_{fer} = [0.95-0.97]$: coefficient de remplissage du paquet statorique.

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur a pôles lisses et saillants

B_{c1} : induction admissible dans le dos du stator : [T]

II-1-3-2 : Largeur de la dent (b_{z1}) : [mm]

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot B_{Z1}} \quad (\text{II-22})$$

Avec :

B_{Z1} : induction maximale admissible dans la dent.

II-1-3-3 : Hauteur de la dent (h_z) : [mm]

$$h_z = \frac{D_{ext} - D_{int}}{2} - h_{c1} \quad (\text{II-23})$$

h_{c1} = la hauteur de dos de stator.

II-1-3-4 : La hauteur de l'encoche de stator :

$$h_{z1} = h_z - (h_{k1} + h_{f1} + r) \quad (\text{II-24})$$

h_{k1} = hauteur de la clavette: $h_{k1} = 0$

h_{f1} = hauteur de la fente: $h_{f1} = 1,37$.

$r = 6\text{mm}$: le rayon de la tête de l'encoche.

II-1-3-5 : La largeur maximale de l'encoche (b_{en2}) : [mm]

$$b_{en2} = \frac{\pi (D_{int} + 2 h_z)}{Z_1} - b_{z1} \quad (\text{II-25})$$

II-1-3-6 : La largeur minimale de l'encoche (b_{en1}) : [mm]

$$b_{en1} = \frac{\pi (D_{int} + 2(h_{f1} + h_{k1}))}{Z_1} - b_{z1} \quad (\text{II-26})$$

II-1-3-7 : Section de l'encoche occupée par l'enroulement : (S_{en1})

$$S_{en1} = 0,5 (b_{en1} + b_{en2}) h_{en1} + 0,5 (\pi \cdot r_1^2) - S_{eniso} \quad (\text{II-27})$$

S_{eniso} : Section occupée par l'isolation.

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur à pôles lisses et saillants

$$S_{eniso} = (b_{en1} + b_{en2} + 2h_{z1} + \pi \cdot r_1) \cdot b_{iso} \quad (\text{II-28})$$

b_{iso} : 0,4 à 0,45 Epaisseur d'isolation.

II-1-3-8 : Coefficient de remplissage : (K_{rem})

$$K_{rem} = \frac{n_{el} \cdot d_{iso}^2 \cdot U_{en1}}{S_{en1}} \quad (\text{II-29})$$

d_{iso} : diamètre de conducteur avec isolation.

n_{el} : nombre de conducteur élémentaire.

II-1-4: Calcul de l'entrefer : [mm]

L'entrefer peut être choisi relativement plus grand que celui d'une machine asynchrone. [8]

$$\delta = 0.6$$

II-1-4-1 : Valeur minimale de l'entrefer : [mm]

$$\delta_{min} = \frac{\delta}{1,125} \quad (\text{II-30})$$

II-1-4-2 : Valeur maximale de l'entrefer : [mm]

$$\delta_{max} = \frac{\delta}{0,75} \quad (\text{II-31})$$

II-2 : Dimensionnement du noyau du rotor à pôles saillants :

II-2-1 : Largeur de l'arc de l'épanouissement polaire : (b_{ep}) [mm]

$$b_{ep} = \alpha \cdot \tau \quad (\text{II-32})$$

II-2-2 : Rayon de l'épanouissement polaire : [mm]

$$R_{ep} = \frac{D_{int}}{2 + 8 \cdot D_{int} \frac{(\delta_{max} - \delta_{min})}{b_{ep}^2}} \quad (\text{II-33})$$

II-2-3 : Largeur de la corde de l'épanouissement polaire : (b_{ep}) [mm]

$$b_{ep} = 2.R_{ep} \cdot \sin\left(\frac{0,5.b_{ep}}{R_{ep}}\right) \quad (\text{II-34})$$

II-2-4 : Hauteur de l'épanouissement polaire : (h_{ep}) [mm]

$$h_{ep}^* = 10 \text{ mm} \quad h_{ep} = h_{ep}^* + R_{ep} - \sqrt{R_{ep}^2 - (0,5.b_{ep})^2} \quad (\text{II-35})$$

L_p : longueur géométrique de rotor. [mm]

$$L_p = L_r + 5 \quad (\text{II-36})$$

II-2-5 : Largeur du pôle : [mm]

$$b_p = \frac{\sigma^* \cdot \phi \cdot 10^6}{K_{fer} \cdot L_p \cdot B_{pm}} \quad (\text{II-37})$$

σ^* : Valeur préliminaire de coefficient de dispersion des pôles :

$$\sigma^* = 1 + \frac{K_{\sigma} \cdot 35 \cdot \delta}{\tau^2} \quad (\text{II-38})$$

Avec :

$$K_{\sigma} = 1,25h_p + 25 \quad (\text{II-39})$$

B_{pm} : induction dans le pôle. [1,4-1,6]

K_{fer} : coefficient de remplissage des tôles rotorique.

II-2-6 : Largeur de la fenêtre polaire : (h_c) [mm]

$$h_c = \frac{b_{ep} - b_p}{2} + 2 \quad (\text{II-40})$$

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur à pôles lisses et saillants

II-2-7 : Hauteur de dos du rotor : (h_{cr})

$$h_{cr} = \frac{\sigma^* \cdot B_{\delta} \cdot L_i \cdot \tau \cdot \alpha_i}{2 \cdot B_{c2} \cdot L_p \cdot K_{fer}} + 2 \quad (\text{II-41})$$

$B_{c2} = [1,7]$: induction magnétique dans le dos du rotor.

II-2-8 : Hauteur bobinée du pôle : (h_p) [mm]

$$h_p = 0,5D_{int} - (h_{ep} + h_c + \delta + 0,5b_p) \quad (\text{II-42})$$

II-2-9 : Diamètre intérieur du noyau rotorique : [mm]

$$D_2 = K_{ar} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{n0}}{n}} \quad (\text{II-43})$$

P_{n0} : puissance utile en [W].

K_{ar} : coefficient donné en fonction du diamètre de l'arbre D_{int} .

n : vitesse de rotation en [t_r /min].

II-2-10: Dimensionnement de l'enroulement amortisseur :

Les machines à rotor bobiné sont souvent munies d'amortisseurs. Ce sont des barres de cuivre placées dans des encoches à la périphérie des pôles et reliées entre elles pour former une portion de cage ou une cage complète analogue à celle d'un moteur asynchrone. Les amortisseurs s'opposent aux oscillations consécutives aux changements brusques de fonctionnement. Ils permettent également de démarrer la machine comme un moteur asynchrone. Dans les machines à rotor massif, l'effet d'amortissement est obtenu par la circulation des courants de Foucault dans le rotor massif.

Le rotor des moteurs à aimant ne comporte pas d'amortisseurs. Ceux-ci ne sont pas nécessaires pour la stabilité du fonctionnement ou le démarrage en moteur asynchrone car la machine est systématiquement associée à une alimentation électronique. De plus, leur présence serait néfaste au comportement dynamique du système. [9]

II-2-10-1: Section des barres de l'amortisseur : [mm]

$$q_2 = \frac{k_{amor} \cdot \tau \cdot A}{N_2 \cdot J_1} \quad (\text{II-44})$$

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur à pôles lisses et saillants

Avec k_{amor} : coefficient d'amortissement.

N_2 : nombre de barres.

J_1 : densité de courant.

II-2-10-2 : Diamètre de la barre : [mm]

$$D_{2a} = 1,13\sqrt{q_2} \quad (\text{II-45})$$

II-2-10-3 : Vérification de la section des barres : [mm²]

$$q_2^* = \frac{\pi D_{2a}^2}{4} \quad (\text{II-46})$$

D_{2a} : diamètre de la barre.

II-2-10-4 : Longueur de la barre : [mm]

$$L_{\text{bar}} = L_p + (0,2 \div 0,4)\tau \quad (\text{II-47})$$

II-2-10-5 : Le pas dentaire :

$$t_2 = (b_{ep} - D_{2a} - 2e) / (N_2 - 1) \quad (\text{II-48})$$

Avec : $e = (3 \div 10)$ mm

Pour réduire les pertes supplémentaires, on doit vérifier les conditions suivantes :

$$t_2 \geq 0,8t_1$$

Tel que :

$$(N_2 - 1) \left[1 - \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \right] > 0,75 \quad (\text{II-49})$$

t_1 : Le pas dentaire statorique.

II-2-11 : Dimensionnement de l'encoche de rotor :

a) Diamètre de l'encoche :

$$D_{2ena} = D_{2a} + \Delta n_p \quad (\text{II-50})$$

On prend: $\Delta n_p = 0,2$ mm

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur à pôles lisses et saillants

b) **Largeur de la fente :**

$$b_{f2} = 6\text{mm}$$

c) **Hauteur de la fente :**

$$h_{f2} = 1\text{ mm}$$

d) **Section de la bague court-circuitant des barres :**

$$q_k = 0,5N_2q_2 \quad (\text{II-51})$$

II-3 : Dimensionnement de noyau de rotor à pôles lisses :

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. En agissant sur l'écartement entre les encoches et le nombre de conducteurs par encoche, on aura une forme proche de la sinusoïde. [10]

II-3-1 : Longueur du paquet rotorique :

La longueur de paquet rotorique est identique à celle du paquet statorique.

$$L_i = 150\text{mm}$$

II-3-2 : Nombre d'encoche rotoriques :

Le nombre d'encoche du rotor est égale à :

$$Z_2 = 24 \text{ encoche}$$

II-3-3 : Pas polaire rotorique :

Il est donné par la relation suivante : [mm]

$$\tau = \frac{z_2}{2.P} \quad (\text{II-52})$$

Ou bien par la relation donnée ci-dessous :

$$\tau = \frac{\pi.D_{2ext}}{2.P} \quad (\text{II-53})$$

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur a pôles lisses et saillants

II-3-4 : Pas d'entaille rotorique : [mm]

Il est donné par la relation suivante :

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{2ext}}{Z_2} \quad (\text{II-54})$$

II-3-5 : Angle géométrique entre deux encoches voisines : [rd]

Il est donné comme suit :

$$\theta_{gr} = \frac{2\pi}{Z_2} \quad (\text{II-55})$$

II-3-6 : Diamètre extérieur :[mm]

La valeur de diamètre extérieur est égale à :

$$D_{2ext} = 210$$

II-3-7 : Diamètre intérieur :[mm]

La valeur de diamètre intérieur est égale à :

$$D_{2int} = 70$$

II-3-8 : Dimensionnement de la feuille rotorique :

Les feuilles du paquet rotorique ne sont pas isolées entre elles. Elles sont fabriquées avec une tôle en acier au silicium non allié de 0.5 (mm) d'épaisseur. Le noyau polaire comporte les corps et leurs épanouissements et la culasse assurant la fermeture des flux.

- **Largeur de la dent rotorique :[mm]**

La largeur de la dent rotorique est égale a :

$$b_{r2}=6.$$

- **Hauteur de la dent : [mm]**

La hauteur de la dent est égale à :

$$h_{z2}=40+1,73+1=42,73.$$

- **Hauteur de la clavette : [mm]**

La hauteur de la clavette est donnée comme suit :

$$h_{k2}=1,73.$$

- **Hauteur de la fente :[mm]**

La hauteur de la fente est égale à :

$$h_{f2}=2.$$

- **Hauteur de la culasse rotorique :[mm]**

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

$$h_{c2} = \frac{1}{2}(D_{2ext} - D_{2int}) - h_{z2} \quad \text{(II-56)}$$

- **Largeur moyenne de l'encoche : [mm]**

La largeur moyenne rotorique est égale à :

$$b_{enc1}=12.$$

- **La largeur minimale de l'encoche : [mm]**

La largeur minimale de l'encoche est égale à :

$$b_{enc2}=10.$$

- **Calcul de la section totale de l'encoche : [mm²]**

La section totale de l'encoche est :

$$S_{en2}=274\text{mm}^2$$

- **Calcul de la section occupée par l'isolation : [mm²]**

La section occupée par l'isolation est calculée en utilisant l'expression ci-après :

$$S_{iso2} = S_1 + S_2 \quad \text{(II-57)}$$

- **Calcul de la section de l'encoche occupée par les conducteurs : [mm²]**

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

$$S_{ceff} = S_{en2} - S_{iso2} \quad \text{(II-58)}$$

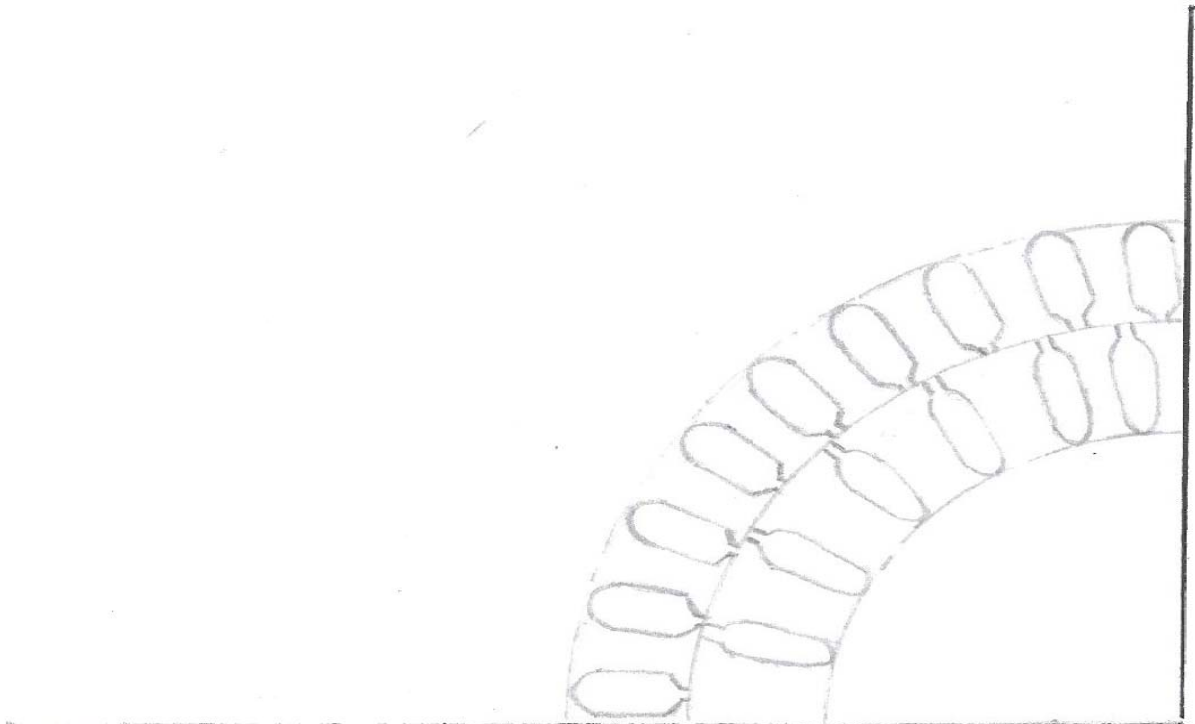


Figure II-1 : Feuille statorique à l'échelle

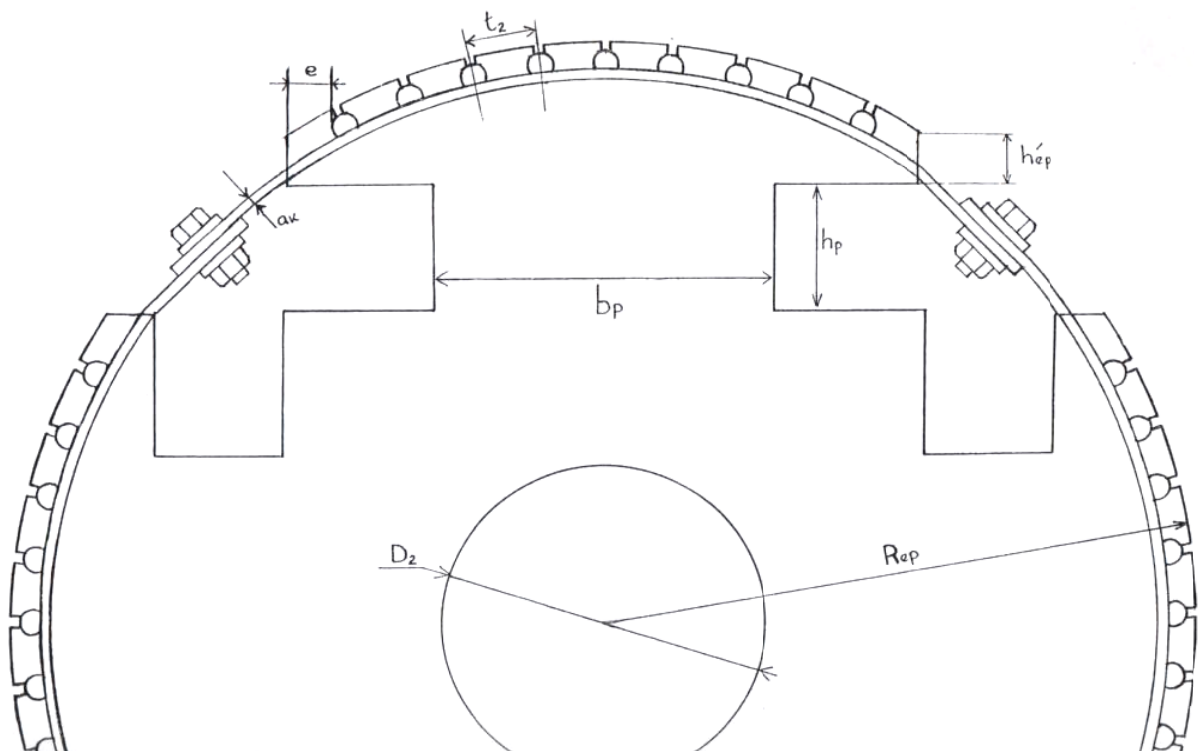


Figure II-2 : Feuille rotorique à l'échelle

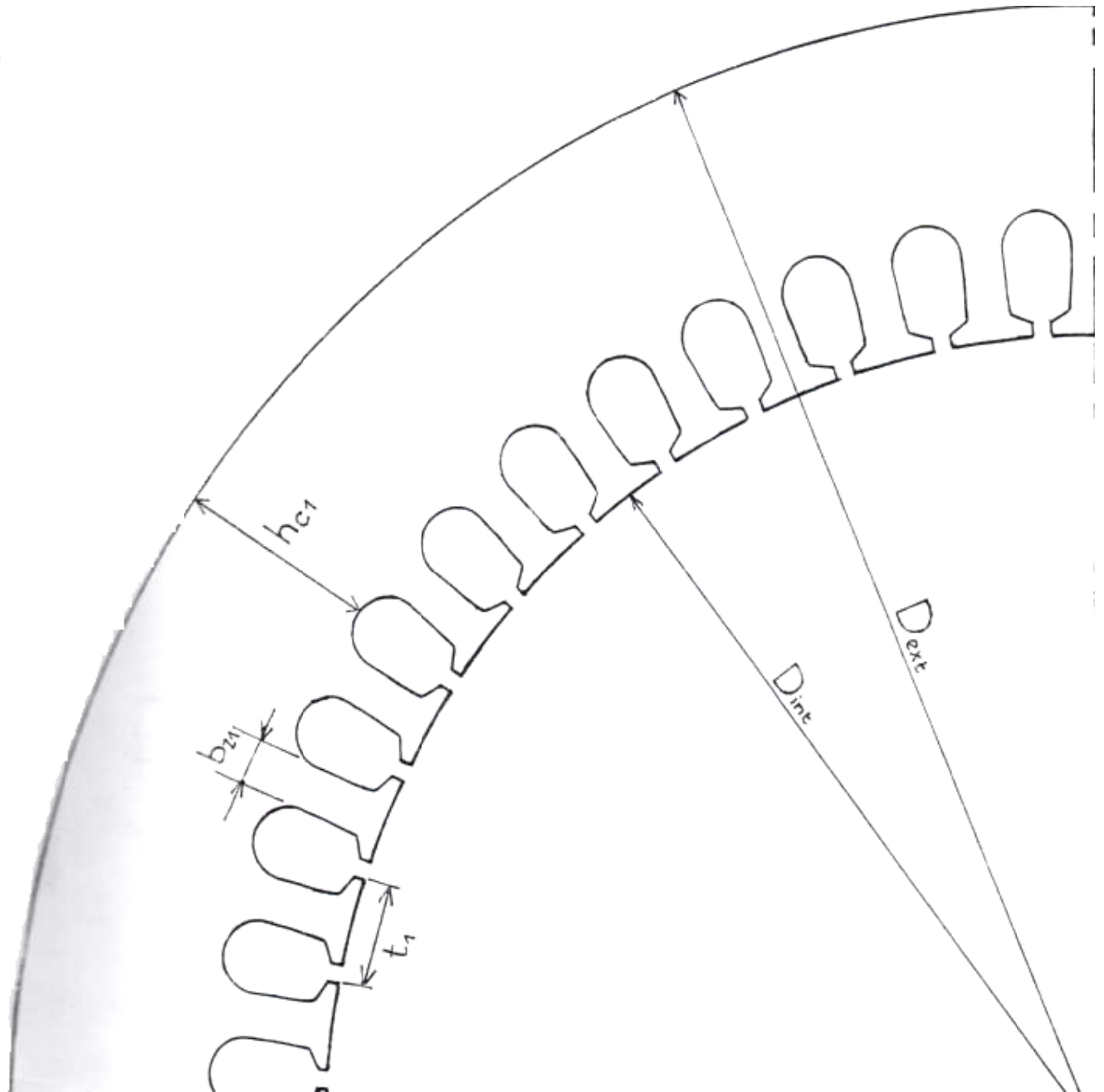


Figure II-3 : Feuille statorique à l'échelle

Chapitre II Dimensionnement du circuit magnétique de l'alternateur a pôles lisses et saillants

II-4-Conclusion :

Dans ce chapitre, on a mentionné toutes les relations concernant le dimensionnement du stator et du rotor de la machine synchrone (à pôles saillant et à pôles lisses), d'après les résultats obtenus on remarque l'importance de la charge linéaire et de l'induction magnétique dans l'entrefer.

Chapitre III

**Paramètres de la machine
synchrone à pôles lisses et à pôles saillants**

III : Introduction :

Pour construire les caractéristiques magnétiques et la caractéristique à vide d'une machine synchrone, il faut calculer le circuit magnétique à vide, cela nous conduit à calculer la F.m.m de l'enroulement d'excitation pour plusieurs valeurs du flux (Φ) qui correspond à des valeurs de la f.e.m de l'enroulement statorique.

Vu que le circuit magnétique d'une machine synchrone est symétrique, le calcul se fait par pôle. Dans ce cas pour chacune des parties, on détermine l'induction magnétique, l'intensité de champ magnétique, la longueur moyenne des lignes du flux magnétique et la force magnétomotrice, par la suite, on calcule la somme des F .M.M du circuit. [10]

III-1 : Calcul du circuit magnétique à vide :

Le calcul du circuit magnétique à vide permet la détermination de la fmm d'excitation qui engendre le champ magnétique d'induction mutuelle et du régime en charge

Dans le cas d'une machine synchrone, les différentes parties sont :

- la culasse statorique.
- les dents du stator
- les pôles du rotor.
- la culasse rotorique.
- Entrefer

III-1-1 : Détermination du flux sous un pôle :

$$\phi = \frac{E_n}{4K_f \cdot W_1 \cdot K_{en1} \cdot f} \quad (\text{III-1})$$

Avec :

$$E_n = \frac{p_i \cdot 10^{-3}}{m \cdot I_{1n}} \quad (\text{III-2})$$

On a aussi $E_n = K_e \cdot U_n$

III-1-2 : Fmm dans l'entrefer**a) Coefficient d'entrefer : (K_δ)**

$$K_\delta = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \cdot K_K \quad (\text{III-3})$$

$K_{\delta 1}$: coefficient du carter.

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

$K_{\delta 2}$: coefficient de la contribution des encoches rotoriques à l'augmentation de l'entrefer

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

K_{δ} : coefficient de l'existence des canaux de ventilation.

K_K : 1 pas de canaux de ventilation.

D'où

$$F_{\delta} = 0,8.\delta.K_{\delta}.B_{\delta}.10^3 \quad [\text{A}] \quad \text{(III-6)}$$

III-1-3 : Fmm dans les dents statorique(F_z) : [A]

a) Induction dans les dents du stator (B_z) : [Wb]

$$\phi_z = b_{z1}.K_f.B_z.L_i \quad \text{(III-7)}$$

$$\phi_z = B_{\delta}.t_1.L_i$$

D'où

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta}.t_1}{b_{z1}.K_f} \quad \text{(III-8)}$$

Avec : $B_{z1}=1,7\text{T}$

$K_f=1,125$ a B_z va correspondre à une valeur du champ H_z qu'on tirera du tableau de magnétisation des dents. (Voir le tableau T1).

La Fmm dans les dents sera alors :

$$F_z = H_z.h_z \quad \text{(III-9)}$$

III-1-4 : Fmm dans la culasse du stator (F_{cs}) :**a) Induction dans la culasse statorique : B_{c1} [T]**

$$B_{c1} = \frac{\phi \cdot 10^6}{K_{fer} \cdot h_{c1} \cdot L_i} \quad (\text{III-10})$$

On prélèvera sur le tableau de magnétisation du dos du stator, la valeur de H_{CS} correspondante (voir le tableau T₁)

$$F_{cs} = H_{CS} \cdot X_i \cdot L_{CS} \quad (\text{III-11})$$

D'où la Fmm dans le dos du stator :

L_{cs} : longueur moyenne des lignes de champs dans le dos du stator. [mm]

$$L_{cs} = \frac{\pi}{2p} (D_{ext} - h_{c1}) \quad (\text{III-12})$$

III-1-5 : La Fmm dans les dents du rotor : [A]

$$B_{z2} = \frac{D_{int} - 2 \cdot \delta - \left(\frac{3}{2}\right) \cdot h_{z2}}{D_{int} - 2 \cdot \delta} t_2 - 0,94 \cdot D_{2ena} \quad (\text{III-13})$$

$$h_{z2} = D_{2ena} + h_{f2}$$

h_{z2} : hauteur de la dent rotorique.

D'où la fmm dans les dents du rotor :

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot h_{z2} \quad (\text{III-14})$$

On tirera la valeur du H_{z2} de tableau de magnétisation (T₁)

III-1-6 : coefficient de saturation magnétique du stator : (K_{sat})

$$K_{sat} = \frac{F_{\delta c}}{2 \cdot F_{\delta}} \quad (\text{III-15})$$

Avec :

$F_{\delta z}$: fmm du stator par paire de pôle.

$$F_{\delta z} = 2(F_{\delta} + F_z + F_{z2}) + F_{cs} \quad (\text{III-16})$$

III-1-7 : Fmm dans les pôles :(F_{pm})**a)Flux dans le pôle : [Wb]**

Le flux dans le pôle est égal à la somme du flux utile et du flux de la dispersion :

$$\phi_{pm} = \phi + \phi_{\sigma} \quad (\text{III-17})$$

Avec :

ϕ_{σ} : Flux de dispersion par pôle.

$$\phi_{\sigma} = 4\lambda_p \cdot F_{\text{exc}} \cdot 10^{11} \quad (\text{III-18})$$

Avec :

λ_p : Coefficient de conductibilité magnétique de dispersion des pôles, il est donné par :

$$\lambda_p = \lambda_{ep} + \lambda_{pc} + \lambda_{pb} \quad (\text{III-19})$$

λ_{ep} : Coefficient de conductibilité du flux de dispersion à partir des surfaces de l'épanouissement polaire.

$$\lambda_{ep} = 140 \left(\frac{h_e}{a_{ep}} - 0,25 \right) + \left(\frac{b_p}{a_{ep}} + 0,2 \right) - 40 \left(\frac{b_p}{a_{ep}} - 0,5 \right)^2 \quad (\text{III-20})$$

h_e : hauteur de l'épanouissement polaire.

$$h_e = \frac{2h_{ep} + h_{ep}^*}{3} \quad (\text{III-21})$$

a_{ep} : distance séparant deux surfaces latérales des épanouissements polaires voisines.

$$a_{ep} = \frac{\pi}{2p} (D_{\text{int}} - 2\delta_{\text{max}} - h_{ep}^*) - b_{ep} \quad (\text{III-22})$$

λ_{pc} : Coefficient de conductibilité magnétique du flux de dispersion à partir des pôles.

$$\lambda_{pc} = \frac{55h_m}{\tau - b_m - (h_m + 2h_{ep} + 2\delta) \frac{\pi}{2p}} \quad (\text{III-23})$$

λ_{pb} : Coefficient de conductibilité magnétique du flux de dispersion dans les sections étroites des pôles.

$$\lambda_{pb} = \frac{37.b_m}{I_p} \quad (\text{III-24})$$

b) Induction dans le pôle :[T]

$$B_{pm} = \frac{\sigma.\phi.10^6}{L_p.b_m.K_{ferm}} = \frac{\phi_{pm}}{L_p.b_m.K_{ferm}} \quad (\text{III-25})$$

D'où : la fmm dans le pôle F_{pm} :

$$F_{pm} = H_{pm}.L_{pm} \quad (\text{III-26})$$

Avec :

L_{pm} : longueur moyenne des lignes du champ dans le pôle.

$$L_{pm} = h_p + 0,7h_{ep} \quad (\text{III-27})$$

H_{pm} : valeur de l'intensité du champ correspondant à l'induction B_{pm} , elle est tirée du tableau de magnétisation des pôles (voir annexe T3).

III -1-8 : La Fmm dans le dos du rotor :(F_{c2})

a) L'induction dans le dos du rotor :(B_{c2})[T]

$$B_{c2} = \frac{\phi_{pm}.10^6}{2.L_p.K_{ferm}.H_{c2}} \quad (\text{III-28})$$

En prélèvera la valeur de H_{c2} du tableau de la magnétisation du dos du rotor correspondant à B_{c2} (voir annexe T02).

b) la fmm :(F_{c2})

$$F_{c2} = H_{c2}.L_{c2} \quad (\text{III-29})$$

L_{c2} : étant la longueur moyenne des lignes du flux magnétique dans le dos du rotor

$$L_{c2} = \frac{\pi}{2p}(D_2 + h_{cr}) \quad (\text{III-30})$$

III-1-9 : Somme des fmm du circuit magnétique par paire de pôles :(F_{ex})

$$F_{ex} = F_{\delta c} + F_{pc} \quad (\text{III-31})$$

$$F_{ex} = 2F_{\delta} + 2F_z + 2F_{pm} + 2F_{z2} + F_{cs} + F_{c2} \quad (\text{III-32})$$

Donc la somme des fmm du pôle et du dos du rotor est :

$$F_{pc} = 2F_{pm} + F_{c2} \quad (\text{III-33})$$

III-1-10 : valeurs réduites des F.m.m et des flux :

Le calcul des caractéristiques magnétiques se fait en unité réduite, pour les valeurs du flux dans l'entrefer Φ^* ou de la f e m E^* sur les limites de [0.5 à 1.3][UR].

La valeur de base du flux est le flux nominal Φ correspondant à une tension de phase nominale.

La valeur de base de la f .m.m correspond à une valeur nominale de la F.m.m de l'enroulement d'excitation F_{ex} à vide pour une tension nominale U_{1n} .

$$\begin{aligned} F_{\delta c^*} &= \frac{F_{\delta c}}{F_{exn0}} & \phi_{\sigma^*} &= \frac{\phi_{\sigma}}{\phi_{n0}} \\ F_{ex^*} &= \frac{F_{ex}}{F_{exn0}} & \phi_{pm^*} &= \frac{\phi_{pm}}{\phi_{n0}} \\ F_{pc^*} &= \frac{F_{pc}}{F_{exn0}} & \phi_{p1^*} &= \frac{\phi_{p1}}{\phi_{n0}} \end{aligned}$$

Il est recommandé de faire la caractéristique entre la caractéristique à vide calculée et la caractéristique normalisée qu'il faudra tracer avec les éléments suivant :

E^* [UR]	0	0.5	1	1.1	1.2	1.3
F_{ex^*} [UR]	0	0.47	1	1.17	1.4	2

Φ^*, E^* [UR]	0.5		1		1.1		1.2		1.3	
Φ [Wb]	0.00675		0.0135		0.01485		0.0162		0.01755	
variables	B	F	B	F	B	F	B	F	B	F
Entrefer	0.39	191.7653	0.78	383.5306	0.85	421.8836	0.93	460.2367	1.01	498.5897
Dents du stator	0.82	6.5461	1.65	24.7352	1.81	39.2266	1.98	72.2068	2.14	158.9050
Dos du stator	0.8	8.3264	1.6	50.3610	1.76	107.4368	1.92	270.6065	2.08	604.3322
Dents du rotor	0.82	11.1953	1.65	42.3027	1.81	67.0861	1.98	123.4897	2.14	271.7628
Dos du rotor	0.85	11.1953	1.7	88.2550	1.87	238.6723	2.04	537.2047	2.21	483.4841
Pôles	0.75	2.6058	1.5	22.4892	1.65	78.4871	1.8	219.7639	1.95	518.0148
$F_{\delta zc}$	427.3396		951.4980		1163.8		1582.5		2462.8	
$F_{\delta zc}^*$	0.3962		0.8821		1.0789		1.4670		2.2832	
F_{pc}	15.8021		127.1846		395.6465		976.7323		1519.5	
F_{pc}^*	0.0146		0.1179		0.3668		0.9055		1.4087	
F_{ex}	443.1418		1078.7		1559.5		2482.5		3982.4	
F_{ex}^*	0.4108		1		1.4457		2.3014		3.6919	
F_{δ}^*	0.1778		0.3556		0.3911		0.4267		0.4622	
Φ_{p1}	0.0071		0.0142		0.0156		0.0170		0.0184	
Φ_{p1}^*	0.5244		1.0487		1.1536		1.2585		1.3634	
Φ_{p2}	0.0074		0.0148		0.0162		0.0177		0.0192	
Φ_{p2}^*	0.5466		1.0933		1.2026		1.3120		1.4213	
Φ_{pmoy}	0.0072		0.0145		0.0159		0.0174		0.0188	
Φ_{pmoy}^*	0.5355		1.0710		1.1781		1.2852		1.3923	
Φ_{pm}	0.0071		0.0143		0.0157		0.0171		0.0186	
Φ_{pm}^*	0.5282		1.0564		1.1621		1.2677		1.3733	
Φ_{σ}	0.00038		0.00076		0.000838		0.00091		0.00099	
Φ_{σ}^*	0.0282		0.0564		0.0621		0.0677		0.0733	

Tableau des résultats de calcul de circuit magnétique à vide

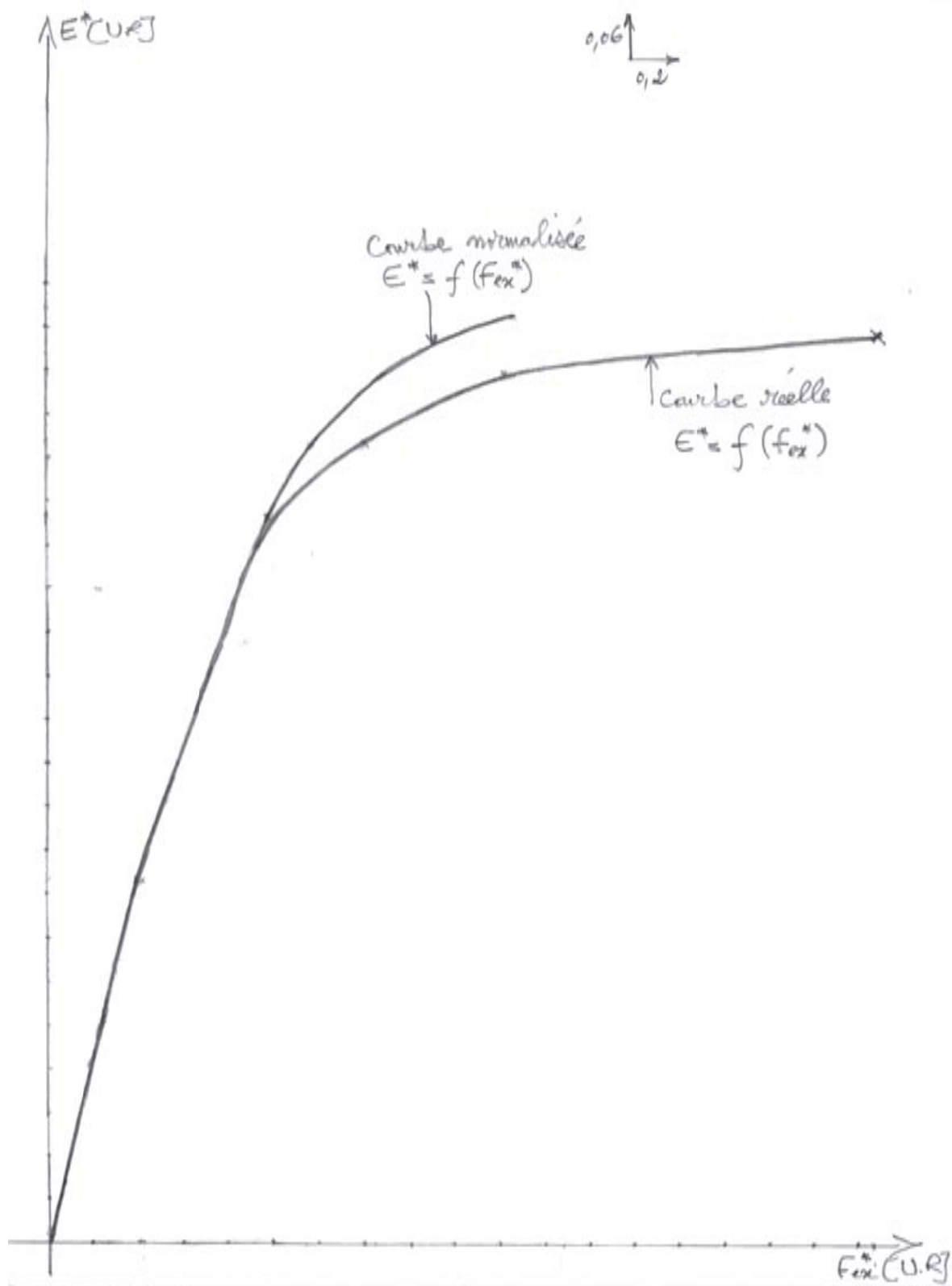


Figure III-1 : Caractéristique normale et réelle à vide d'une machine synchrone à pôles saillant 35 [kVA].

III-2 : Calcul des résistances actives de fuites de l'enroulement statorique :

La détermination des résistances de fuites de l'enroulement statorique est nécessaire pour

- Le calcul du régime en charge.
- La détermination des paramètres nominaux de la machine.
- L'étude des caractéristiques des machines synchrones.

III-2-1 : Résistances actives par phase de l'enroulement statorique (R_1) : [Ω]

$$R_1 = \frac{\rho_{cut} \cdot W_1 \cdot l_{1moy} \cdot 10^{-3}}{n_{el} \cdot a_1 \cdot S_{el}} \quad \text{(III-34)}$$

Avec :

$$S_{el} = \frac{S_{1eff}}{n_{el}} \quad \text{(III-35)}$$

ρ_{cu} : résistivité du cuivre rapportée à la température de fonctionnement

$\rho_{cut} = \rho_{cu} (1 + \alpha(t-20))$, coefficient de température pour le cuivre, $\alpha = 3,81$

$$\rho_{cu} = 17,2 \cdot 10^{-9} \quad \text{à } 20^\circ \text{C} . \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

L_{1moy} : longueur moyenne d'une spire de l'enroulement du stator.

$$L_{1moy} = 2[L_i + L_{1front}] \quad \text{(III-36)}$$

L_{1front} : longueur moyenne de la partie frontale d'une spire.

$$L_{1front} = (1,16 + 0,14 P) b_{moy} + 15 \quad \text{(III-37)}$$

b_{moy} : largeur moyenne d'une section.

$$b_{moy} = t_{moy} \cdot y_{moy} \quad \text{(III-38)}$$

t_{moy} : pas dentaire moyen

$$t_{moy} = \frac{\pi(D_{int} + h_{z1})}{Z_1} \quad \text{(III-39)}$$

y_{moy} : pas dentaire moyen :

$$y_{moy} = \frac{Z_1}{2.P} \quad (\text{III-40})$$

III-2-2 : Réactance de fuite par phase de l'enroulement statorique : (X_σ)

Pour déterminer les réactances de fuite de l'enroulement statorique, il est nécessaire d'étudier les différents flux de fuite, ces derniers sont caractérisés par des coefficients de dispersion qui dépendent des dimensions et de la forme de l'encoche.

a) coefficient de conductibilité magnétique de dispersion de l'encoche :

$$\lambda_{en1} = \frac{h_1}{3.b_{en1}} K_\beta + \left(\frac{h_{11}}{b_{en1}} + \frac{3h_{K1}}{b_{en1} + 2.b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) . K^*_\beta \quad (\text{III-41})$$

Avec :

$$h_{11} = b_{en1} - h_1$$

$$h_1 = 0,8 \frac{S_{en1}}{0,5(b_{en1} + b_{en2})} \quad (\text{III-42})$$

K_β, K^*_β : Sont des coefficients de raccourcissement, qu'on prélèvera de la figure 05.

$K_\beta, K^*_\beta = 1$ Pour un enroulement concentrique.

b) coefficient de conductibilité magnétique de dispersion différentielle : (λ_{d1})

$$\lambda_{d1} = \frac{0,03.\tau.\alpha_i.c_d}{\delta.K_\delta.q_1} \quad (\text{III-43})$$

$c_d = 0.82$

c) coefficient de dispersion des parties frontales : (λ_{f1})

$$\lambda_{f1} = 0,34 \frac{q_1}{L_i} (L_{1front} - 0,64.\beta.\tau) \quad (\text{III-44})$$

d) coefficient de dispersion entre les cornes des dents :(λ_k)

$$\lambda_k = 0,04 + k_k = 0,07 \sqrt{(t_1 - b_{f1}) / b_{f1}} \quad (\text{III-45})$$

La valeur de k_k est donnée par la courbe : $k_k = F(k_{\beta\delta})$

Avec :

$$k_{\beta\delta} = \frac{b_{f1}}{\delta \cdot k_{\delta}} \quad (\text{III-46})$$

e) coefficient de dispersion globale du stator :(λ_1)

$$\lambda_1 = \lambda_{en1} + \lambda_{d1} + \lambda_{f1} + \lambda_{f1} + \lambda_k \quad (\text{III-47})$$

D'où la réactance de fuite du stator X_{σ} :

$$X_{\sigma} = \frac{1,58 \cdot F \cdot L_i \cdot W_1^2 \cdot \lambda_1}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \quad (\text{III-48})$$

f) réactance de fuite en unité réduite :(X_{σ}^*)

$$X_{\sigma}^* = \frac{X_{\sigma} \cdot I_{1n}}{U_{1n}} \quad (\text{III-49})$$

III-3 : Calcul du circuit magnétique en charge :

Dans une machine synchrone à pôles saillants, l'entrefer n'est pas constant par suite de l'existence d'un grand espace inter polaire. Pour le calcul quantitatif de l'influence de la réaction d'induit F_a sur l'axe longitudinale, on utilise la théorie des deux réactions proposée par BLONDEL.

$$F_d = F_a \sin \psi$$

$$F_q = F_a \cos \psi$$

Avec ψ : étant l'angle entre le courant I_{1n} et la F.e.m $E_{\delta d}$ induite par le flux longitudinal.

La F.m.m de l'enroulement d'excitation en charge peut être déterminée en utilisant :

III-3-1 : caractéristique partielles :

Les caractéristiques partielles en charge sont :

$$\phi^* = F(F_{\delta c}^*)$$

$$\phi_{\delta}^* = F(F_{\delta c}^*)$$

$$\phi_{pm^*} = F(F_{pc^*})$$

Celles-ci sont tracées à partir des résultats donnés par le calcul du circuit magnétique à vide.

III-3-2 : diagramme de BLONDEL :

Construit à partir des données suivantes :

$$U_{1n}^* = 1, \quad I_{1n}^* = 1, \quad X_{\delta}^* = 0.08, \quad \varphi = 36,86^\circ$$

En régime nominal, un alternateur débitant sur une charge inductive mixte a une f.e.m longitudinal qui s'écrit comme suit :

$$E_d^* = U_{1n}^* + (R_1 + jX_1^*) \cdot I_{1n}^* + E_{aq}^*$$

Comme la chute de tension ohmique de l'enroulement statorique est négligeable, on a :

$$E_d^* = U_{1n}^* + jX_1^* \cdot I_{1n}^* + E_{aq}^*$$

a) construction du diagramme de BLONDEL

On trace les vecteur U_{1n}^* , et I_{1n}^* avec un angle de déphasage φ (ar) à partir de l'extrémité de U_{1n}^* , on trace le vecteur $jX_{\delta}^* I_{1n}^*$ correspondant à la chute inductive au stator, puis on joint l'extrémité de ce dernier vecteur avec l'origine de U_{1n}^* , pour obtenir E_{δ}^* auquel correspond une valeur de $F_{\delta zc}^*$ sur la caractéristique $\Phi^* = F(F_{\delta zc}^*)$:

Alors on utilise la tangente à cette dernière pour relever la valeur de F_{δ} correspondant à celle de E_{δ} , d'où le calcul du coefficient de saturation.

$$K_{sat} = \frac{F_{\delta zc}^*}{2F_{\delta}^*} \quad \text{(III-50)}$$

A partir de la valeur de K_{sat} , on peut obtenir les coefficients suivants :

X_q , X_d et X_{qd} qui prennent en considération les saturations (voir la figure 7 en annexe).

Les coefficients de réaction d'induit K_{aq} , K_{ad} seront déterminés à partir de la figure (8) en annexe, qui donne ces coefficients en fonction de (α) , pour $\delta_{max}/\delta = 1.5$ et différent au rapport δ/τ .

b) la F.m.m du stator F_{an} :

$$F_{an} = \frac{0.45 \cdot m_1 \cdot K_{en1} \cdot W_1 \cdot I_{1n} \cdot K_{\phi}}{p} \quad \text{(III-51)}$$

Avec :

K_Φ : coefficient de forme de la réaction d'induit $K_\Phi=1$.

$$F_{aq}^* = \frac{F_{an}}{F_{ex0}} \quad (\text{III-52})$$

On prend en considération la saturation pour la f.m.m transversale de la réaction d'induit :

$$\frac{F_{aq}^*}{\cos\psi} = X_q \cdot K_{aq} \cdot F_{an}^* \quad (\text{III-53})$$

D'où la valeur de $E_{aq}^*/\cos\psi$ relevé de la courbe $\Phi^*=F(F_{\delta zc}^*)$ qu'on apporte à la construction dans le prolongement du vecteur, et on joint l'extrémité de $E_{aq}^*/\cos\psi$ avec l'origine de U_{1n} . Puis on abaisse une perpendiculaire à partir de l'extrémité de $jX_{\delta}^* \cdot I_{1n}$ sur le dernier segment de droite $F_{\delta d}^*$ de la courbe $\Phi^*=F(F_{\delta zc}^*)$:

Tel que:

$$F_{ad}^* = X_d \cdot K_{ad} \cdot \sin\psi \cdot F_{an}^* + K_{qd} \cdot F_{an}^* \cdot \cos\psi \quad (\text{III-54})$$

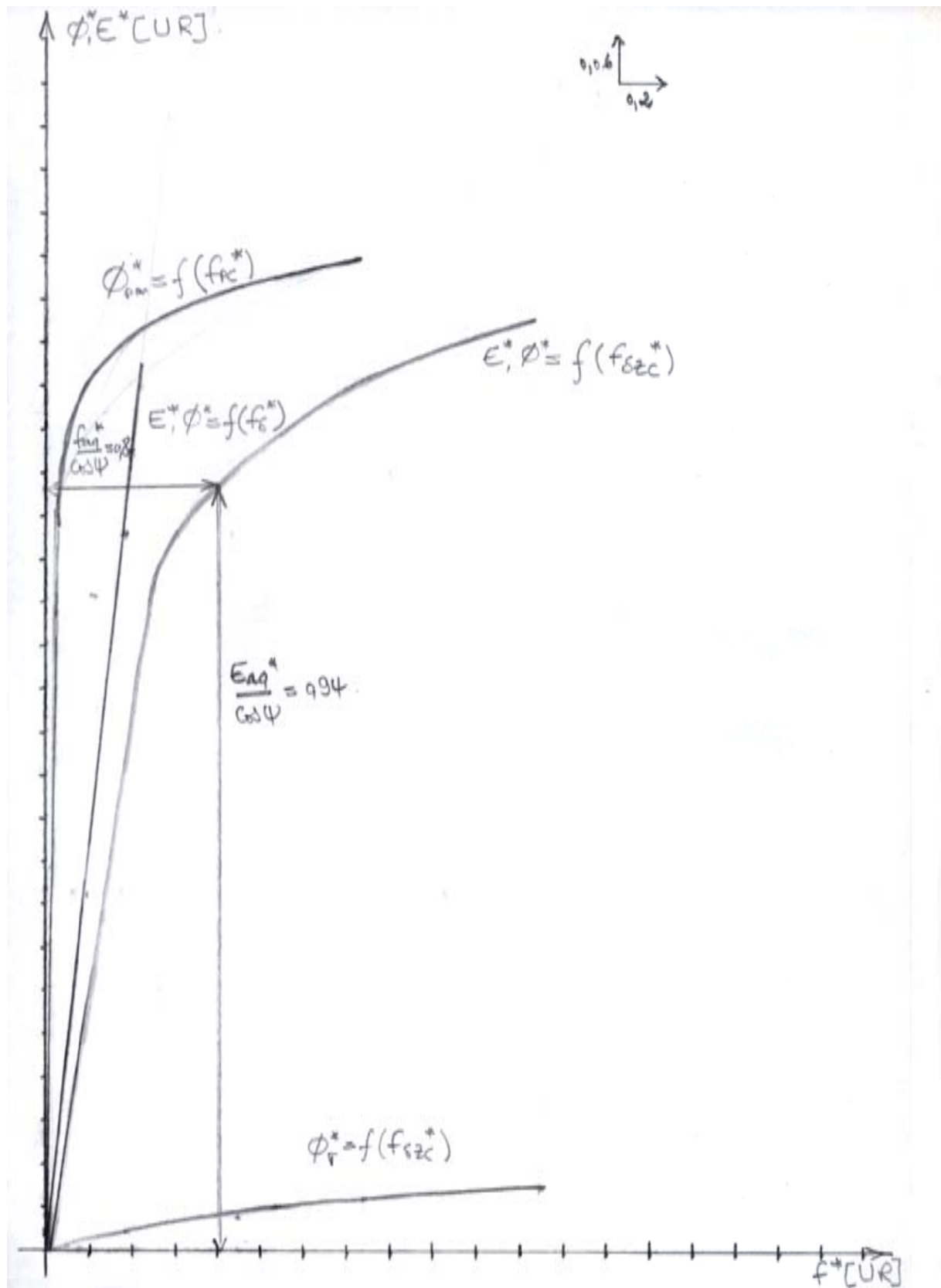


Figure III-2 : Caractéristiques de magnétisation d'une machine synchrone à pôles saillants
35[kVA]

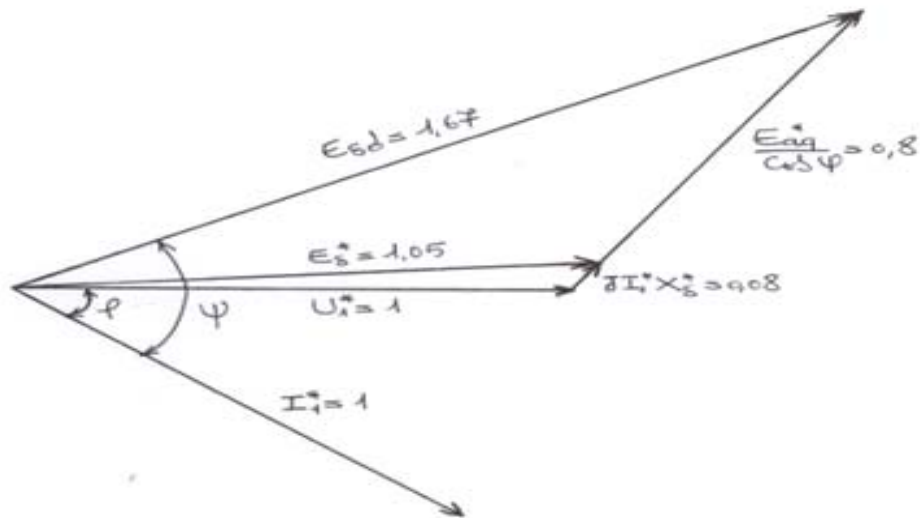


Figure III-3 : Diagramme de BLONDEL

III-4 : calcul de circuit magnétique à vide pour une machine à pôles lisses :

Le circuit magnétique à vide d'une machine synchrone à pôles lisses présente certaines particularités dans la seule région du rotor. Son calcul en marche à vide est analogue à celui du circuit magnétique d'une machine à pôles saillants à condition de prendre en considération des particularités de la machine à pôles lisses. [10]

III-4-1 : Fmm d'excitation à vide par pôle :

La somme des chutes de tension magnétiques partielles doit être égale à la Fmm d'excitation F_{ex} à vide

$$F_{ex} = F_{z1} + F_{c1} + F_{\delta} + F_{z2} + F_{c2} \quad (\text{III-55})$$

III-4-2 : Coefficient de saturation ($K_{\delta a}$) :

$$K_{\delta a} = \frac{F_{ex}}{F_{\delta}} \quad (\text{III-56})$$

III-4-3 : calcul de flux rotorique :

Le flux Φ_2 est égal à la somme du flux utile et du flux de dispersion Φ_{σ} :

$$\phi_2 = \phi_u + \phi_\sigma \quad (\text{III-57})$$

III-4-4 : valeur relatives des Fmm et des flux :

La caractéristique à vide et les caractéristiques de magnétisation sont représentées sous forme relative en prenant pour valeur de base la tension nominale, le flux nominale et la force magnétomotrice d'excitation correspondant au régime à vide.

Les caractéristiques à vide $E^* = f(F_{ex}^*)$

Les courbes en charge :

$$\Phi_u^* = f(F_\delta^*).$$

$$\Phi_2^* = f(F_{zc}^*).$$

$$\Phi_u^* = f(F_{\delta_{zc}}^*).$$

$$\Phi_\sigma^* = f(F_{\delta_{zc}}^*).$$

Avec :

$$F_{zc} = F_{z2} + F_{c2} \quad (\text{III-58})$$

$$F_{\delta_{zc}} = F_{z1} + F_{c1} + F_\delta \quad (\text{III-59})$$

Φ^*, E^* [UR]	0.5		1		1.1		1.2		1.3	
Φ [Wb]	0.00675		0.0135		0.01485		0.0162		0.01755	
variables	B	F	B	F	B	F	B	F	B	F
Entrefer	0.39	191.7653	0.78	383.5306	0.85	421.8836	0.93	460.2367	1.01	498.5897
Dents du stator	0.82	6.5461	1.65	24.7352	1.81	39.2266	1.98	72.2068	2.14	158.9050
Dos du stator	0.8	8.3264	1.6	50.3610	1.76	107.4368	1.92	270.6065	2.08	604.3322
Dents du rotor	0.82	11.1953	1.65	42.3027	1.81	67.0861	1.98	123.4897	2.14	271.7628
Dos du rotor	0.85	11.1953	1.7	88.2550	1.87	238.6723	2.04	537.2047	2.21	483.4841
$F_{\delta_{zc}}$	206.6377		473.1181		568.5470		854.3329		1374.7	
$F_{\delta_{zc}}^*$	0.3507		0.8030		0.9650		1.450		2.3332	
F_{zc}	21.7859		130.5577		305.7584		660.6942		755.2469	
F_{zc}^*	0.0370		0.2216		0.5190		1.1214		1.2819	
F_{ex}	228.4236		589.1845		841.6250		1463.7		2129.9	
F_{ex}^*	0.3877		1		1.4287		2.4844		3.6151	
F_{δ}^*	0.3255		0.6510		0.7160		0.7811		0.8462	
Φ_2	0.0071		0.0143		0.0157		0.0171		0.0186	
Φ_2^*	0.5282		1.0564		1.1621		1.2677		1.3733	
Φ_{σ}	0.00038		0.00076		0.000838		0.00091		0.00099	
Φ_{σ}^*	0.0282		0.0564		0.0621		0.0677		0.0733	

Tableau des résultats de calcul du circuit magnétique à vide

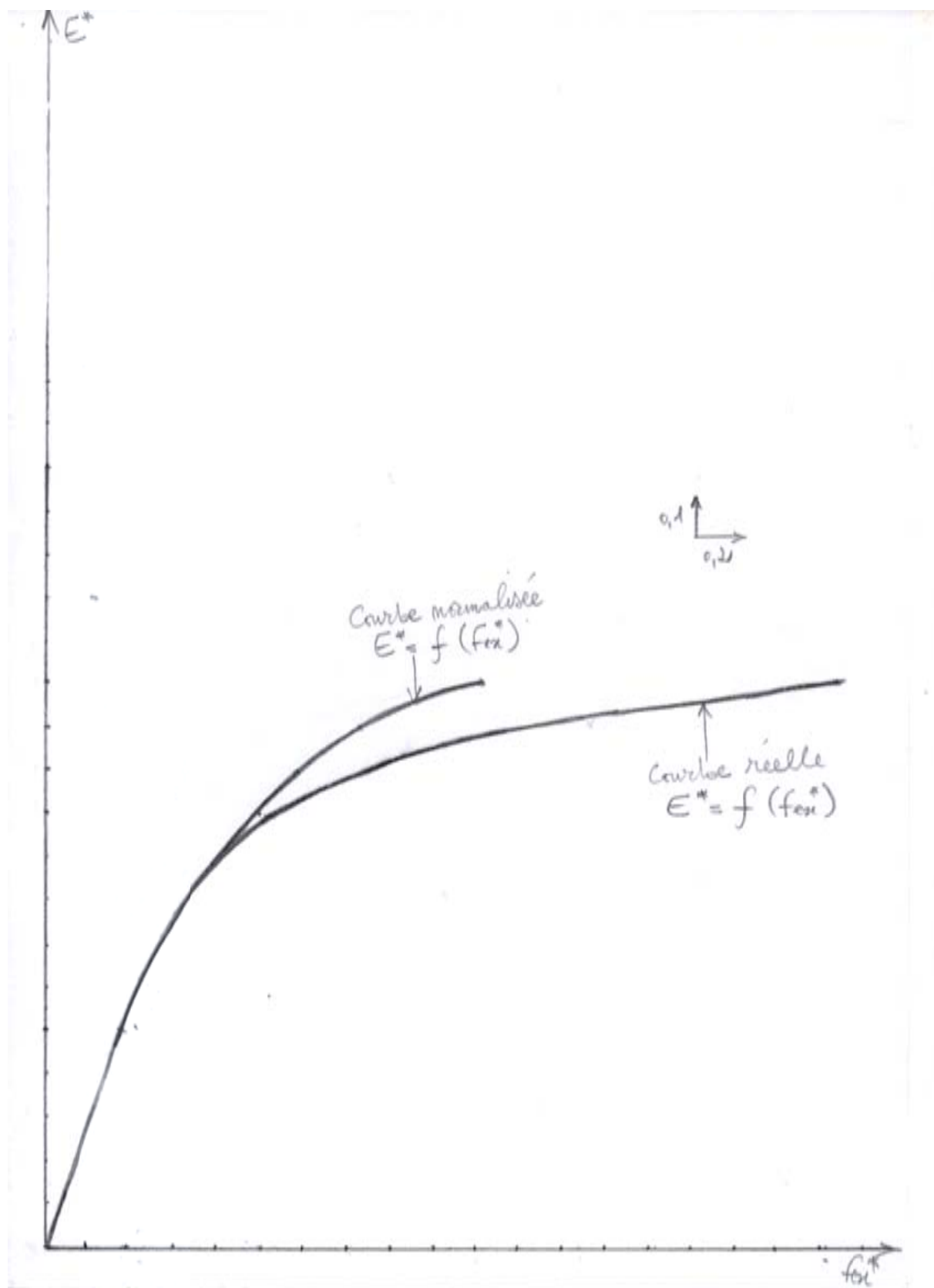


Figure III-4 : Caractéristique normale et réelle à vide d'une machine synchrone à pôles lisses
35 [kVA]

III-5 : Diagramme de potier :

Pour commencer, on trace le diagramme des tensions $\overline{E}_r = \overline{V} + R\overline{I} + jX_\delta\overline{I}$

on trouve la valeur de la f.e.m résultante proportionnelle au flux utile dans l'entrefer \overline{E}_r , cela se fait en traçant \overline{V} sur l'axe des ordonnées et \overline{I} en déphasage d'un angle φ avec \overline{V} et on néglige la valeur de $R\overline{I}$, car R est très petite. (Pour les grandes puissances).

On projette le vecteur \overline{E}_r sur l'axe des ordonnées de la caractéristique de magnétisation, on trouve la valeur de Φ_{rm} le flux dans l'entrefer qui est égale à la valeur relative de \overline{E}_r

$$|\Phi_{rm}| = |\overline{E}_r| \text{ avec } \Phi_{rm} = \Phi_2 - \Phi_\sigma.$$

On trace un arc de cercle de rayon $|\overline{E}_r|$, et on trace la perpendiculaire à \overline{E}_r , c'est le vecteur $\overline{\Phi}_{rm}$, en utilisant la caractéristique $\Phi_u = f(F_{\delta zc})$, on détermine pour $|\overline{\Phi}_u| = |\overline{\Phi}_{rm}|$ la f.é.m. $|\overline{F}_{1r}|$ correspondant à la tension magnétique dans le stator et l'entrefer, cette dernière ne tient pas compte de l'influence de la tension magnétique rotorique F_{zc} , on projette la valeur de $\overline{\Phi}_{rm}$ sur la courbe $\Phi_u = f(F_{\delta zc})$, puis on trace la perpendiculaire à (oy) pour lire la valeur $|\overline{F}_{1r}|$ sur l'axe (ox), puis on trace le vecteur \overline{F}_{1r} en phase avec $\overline{\Phi}_{rm}$

On calcul $F_{a fm} = F_a \cdot K_a = F_a (1/K_f) = F_a (1/K_f)$.

Avec \overline{F}_a c'est une force magnétomotrice créée par le champ d'induction mutuelle dans l'entrefer, et donner par la formule suivante :

$$F_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi p} \cdot m_1 \cdot I \cdot W_1 \cdot K_{en1} \quad \text{(III-60)}$$

Et K_a : coefficient de réaction d'induit, avec $F_{a fm}$ est en phase avec le vecteur \overline{I} , on trace le vecteur $(-\overline{F}_{a fm})$, on trouve la Fmm $|\overline{F}_{1f}|$ comme résultante avec

$$\overline{F}_{1f} = \overline{F}_{1r} - \overline{F}_{afm} \quad \text{(III-61)}$$

\overline{F}_{1f} : Est la Fmm qui engendre le flux de dispersion Φ_σ

\overline{F}_{afm} : Est la Fmm 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 $\Phi_\sigma = f(F_1)$, puis on projette sur l'axe (oy) pour avoir la valeur de $|\overline{\Phi}_\sigma|$, on trace $\overline{\Phi}_\sigma$ en phase avec \overline{F}_{1f} et on l'additionne avec $\overline{\Phi}_{rm}$, on obtient le flux résultant rotorique $\overline{\Phi}_2$, alors on trouve un arc de rayon $|\overline{\Phi}_2|$ de l'extrémité de ce dernier on le projette

sur (oy) de la courbe de magnétisation pour lire la valeur de $|\overline{\Phi}_2|$, on projette ce point sur la courbe $\Phi_2 = f(F_{zc})$, puis sur l'axe (ox) pour lire la valeur $|\overline{F}_{zc}|$, puis on trace le vecteur \overline{F}_{zc} en phase avec le vecteur $\overline{\Phi}_2$, de l'extrémité de vecteur \overline{F}_{1f} .

Comme résultante de ces deux dernières la FMM d'excitation \overline{F}_m .

III-6: Détermination de la force magnétomotrice en charge.

Cette force est la résultante des deux force calculées précédemment \overline{F}_{1r} et \overline{F}_{zc} tel que :

$$\overline{F}_m = \overline{F}_{1r} + \overline{F}_{zc}$$

Sur le diagramme, on trace \overline{F}_{zc} de l'extrémité du \overline{F}_{1r} dans le sens de $\overline{\Phi}_2$, on trouve le vecteur \overline{F}_m

Puis on trace un cercle de rayon \overline{F}_m , et on le projette sur l'axe (ox) pour lire la valeur de \overline{F}_m

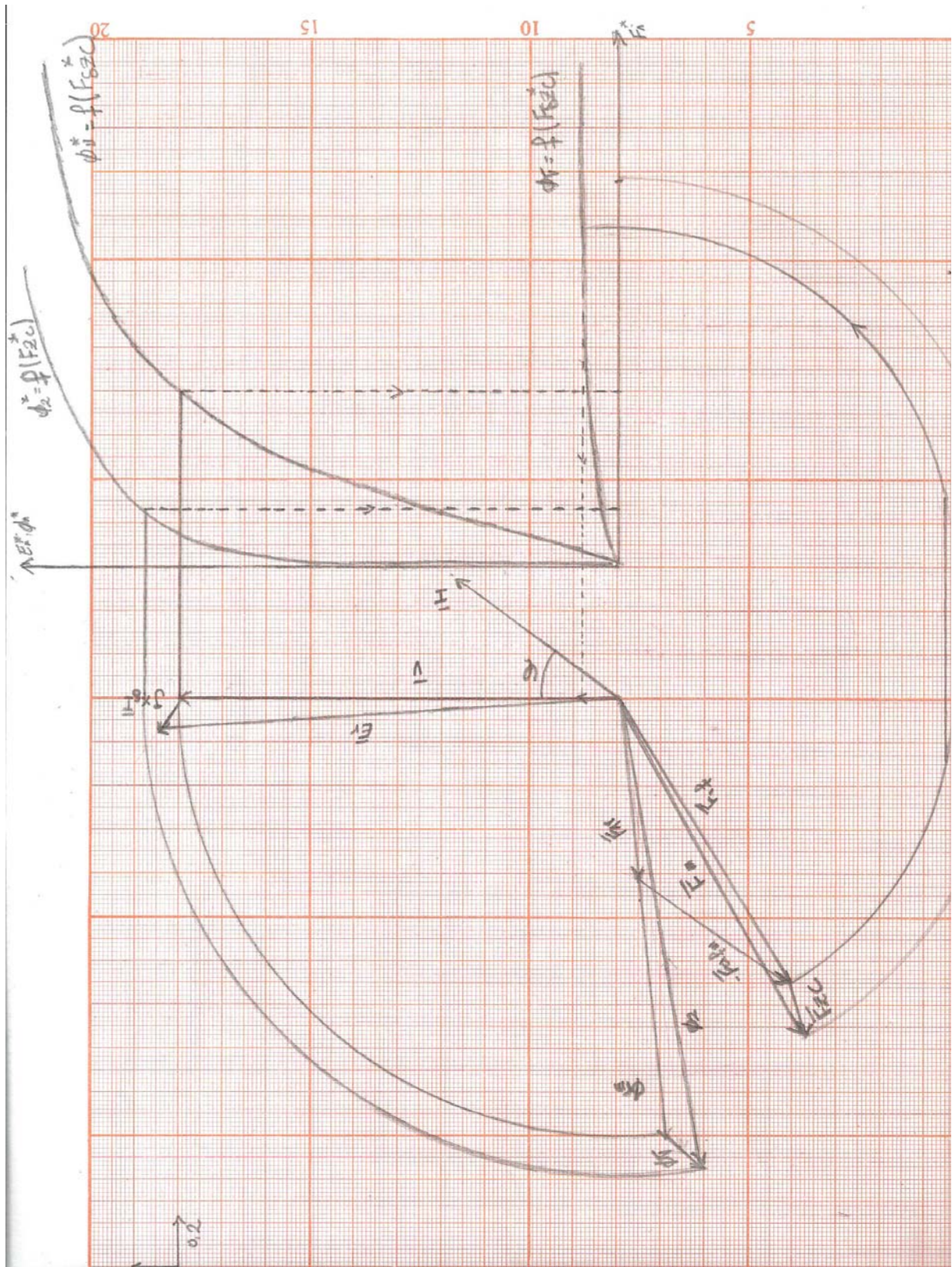


Figure III-5 : Construction du diagramme de potier.

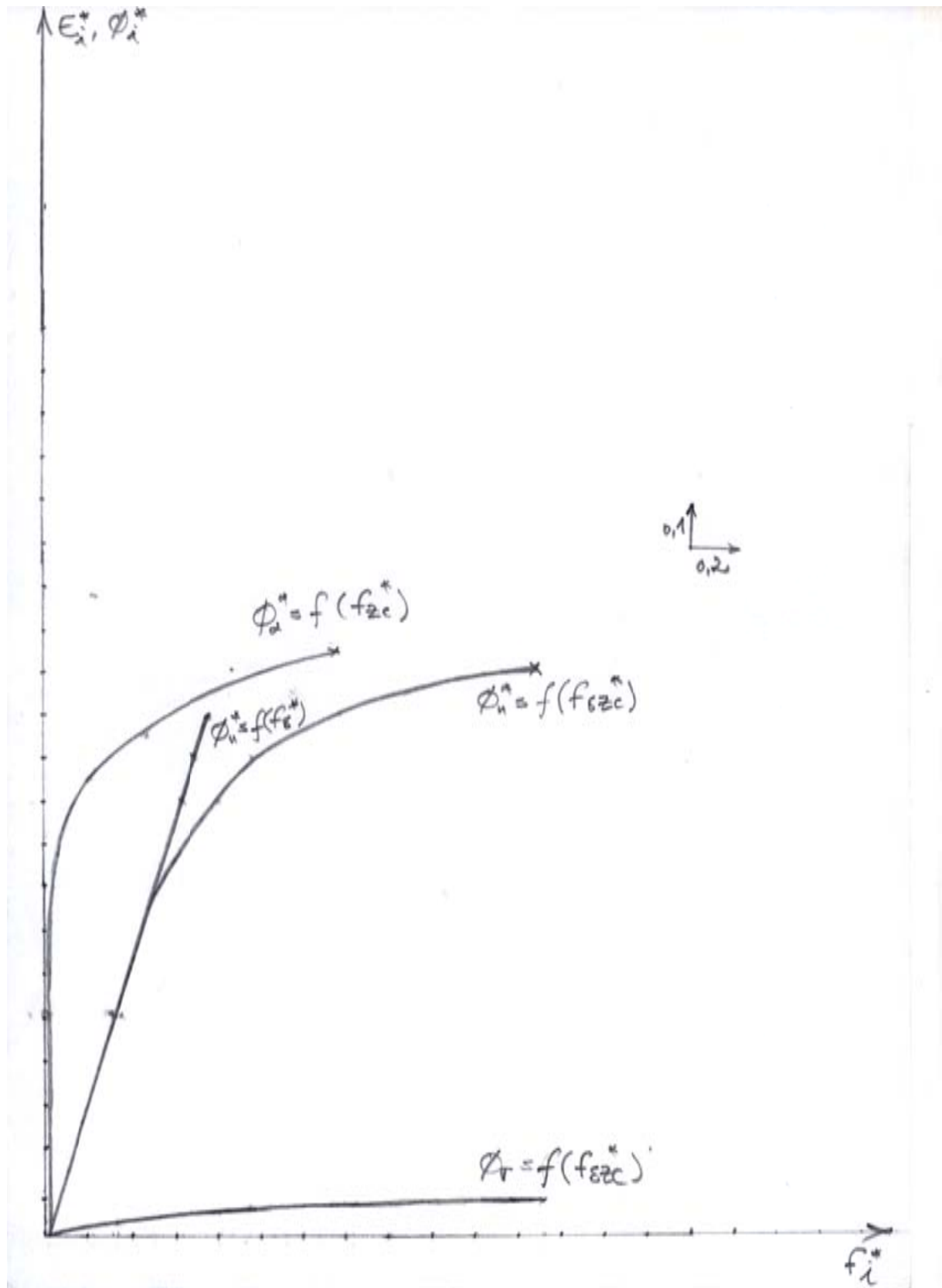


Figure III-7 : Caractéristiques de magnétisation d'une machine synchrone à pôles lisses

35[kVA]

III-7 : Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons effectué le calcul des F.M.M au niveau du stator et du rotor qui est basé sur l'intensité du champ magnétique dans les différentes parties de la machine.

Nous avons aussi déterminé les paramètres électriques de la machine tels que : les résistances de fuite et les réactances de fuite dans le rotor et dans le stator.

Chapitre IV

choix de dimensionnement du système d'excitation

IV-Introduction :

Le courant d'excitation des machines synchrones est obtenu à partir d'un ensemble appelé système d'excitation comportant, dans la majorité des cas :

- la source de puissance proprement.
- le régulateur de tension.
- Des étages amplificateurs intermédiaires.

Pour fournir le courant continu d'excitation d'une machine synchrone, il est nécessaire de disposer d'une source de tension continue, variable dans d'assez larges proportions. [10]

IV-1 : Dimensionnement de l'enroulement d'excitation :

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.

IV-1-1 : La F mm par pôle de l'enroulement d'excitation :

La F mm par pôle de l'enroulement d'excitation est donnée par l'expression suivante :

$$F_{ex} = \frac{4}{\pi} \cdot K_{en2} \cdot I_{ex} \cdot W_{ex} \quad (\text{IV-1})$$

Avec :

$$K_{en2} = K_{r2} \cdot K_{d2} \cdot K_{in2} \quad (\text{IV-2})$$

K_{en2} : coefficient de bobinage de l'enroulement d'excitation.

I_{ex} : courant d'excitation.

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

$K_{in2}=1$ (pas inclinaison des encoches).

K_{d2} : coefficient de distribution de l'enroulement donné par :

$$K_{d2} = \frac{\sin(\rho \frac{\pi}{2})}{q_2 \cdot \sin(\rho \frac{\pi}{2q_2})} \quad (\text{IV-3})$$

ρ est le rapport de la partie bobinée au pas polaire, il est compris entre 0.66 et 0.8.

q_2 : nombre d'encoches bobinées par pôle.

$$q_2 = \rho \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot p} \quad (\text{IV-4})$$

IV-1-2 : Section de l'enroulement d'excitation :

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

$$U_{ex} = R_{ex} \cdot I_{ex} \quad (\text{IV-5})$$

$$R_{ex} = \rho_{cu} \cdot \frac{l}{S_{ex}} \quad (\text{IV-6})$$

U_{ex} : tension aux bornes de l'enroulement d'excitation.

ρ_{cu} : résistivité de cuivre.

l :longueur de l'enroulement d'excitation.

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

$$l_{exm} = 2.5(l_i + l_{fex}) \quad (\text{IV-8})$$

l_{exm} : longueur d'une spire.

l_{fex} : longueur de la partie frontale d'une spire.

$$R_{ex} = \rho_{cu} \cdot \frac{2 \cdot p \cdot l_{exm} \cdot W_{ex}}{S_{ex}} \cdot I_{ex} \quad (\text{IV-9})$$

$$U_{ex} = 2 \cdot p \cdot \frac{\rho_{cu} \cdot l_{exm} \cdot W_{ex}}{S_{ex}} \cdot I_{ex} \quad (\text{IV-10})$$

On remplace :

$$I_{ex} \cdot W_{ex} = \frac{\pi \cdot F_{ex}}{K_{en2} \cdot 4} \quad (\text{IV-11})$$

$$U_{ex} = 2 \cdot p \cdot \frac{\rho_{cu} \cdot l_{exm} \cdot \pi \cdot F_{ex}}{S_{ex} \cdot 4 \cdot K_{en2}} \quad (\text{IV-12})$$

$$S_{ex} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \rho_{cu} \cdot l_{exm} \cdot F_{ex}}{4 \cdot U_{ex} \cdot K_{en2}} \quad (\text{IV-13})$$

Finalement :

$$S_{ex} = \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \rho_{cu} \cdot m_{T2} \cdot I_{exm} \cdot F_{ex}}{4 \cdot U_{ex} \cdot K_{en2}} \cdot 10^3 \quad (\text{IV-14})$$

$m_{T2}=1.2$: coefficient de température qui ramène R_{ex} à la température de fonctionnement.

IV-1-3 : Nombre de spires de l'enroulement d'excitation :

$$W_{ex} = \frac{\pi \cdot F_{ex}}{4 \cdot K_{en2} \cdot S_{ex} \cdot J_{ex}} \quad (\text{IV-15})$$

J_{ex} : densité de courant de l'enroulement d'excitation.

J_{ex} : [2.5, 7] [A/mm²].

IV-1-4 : Nombre de conducteurs par encoches :

$$U_{enc2} = \frac{2 \cdot W_{ex}}{q_2} \quad (\text{IV-16})$$

IV-1-5 : Résistance de l'enroulement d'excitation : [Ω]

$$R_{ex} = \rho_{cu} \cdot \frac{2 \cdot p \cdot m_{T2} \cdot W_{ex} \cdot I_{exm}}{S_{ex}} \cdot 10^3 \quad (\text{IV-17})$$

IV-1-6 : Courant d'excitation nominal en charge : [A]

$$I_{ex} = \frac{\pi \cdot F_{ex}}{4 \cdot K_{en2} \cdot W_{ex}} \quad (\text{IV-18})$$

IV-1-7 : Courant d'excitation maximal : [A]

$$I_{ex\max} = \frac{U_{ex}}{R_{ex}} \quad (\text{IV-19})$$

IV-1-8 : Coefficient de surcharge :

$$K_{sex} = \frac{I_{ex\ max}}{I_{ex}} \quad (\text{IV-20})$$

IV-1-9 : Puissance d'excitation:

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex} \quad (\text{IV-21})$$

IV-1-10 : Coefficient de remplissage de l'encoche rotorique :

$$K_{re2} = \frac{U_{enc2} \cdot (d_{iso2})^2 \cdot n_{el}}{S_{enc2} - S_{iso2}} \quad (\text{IV-22})$$

IV-2 : Comparaison entre les deux types de la machine synchrone :**IV-2-1 : Paramètres de dimensionnement :**

- **Machine synchrone à pôles lisses :**

Les machines synchrones à pôles lisses dont l'entrefer est constant (cylindrique) ne présentent pas de grande différence de réductance entre l'axe direct et l'axe transversal, on peut alors caractériser le fonctionnement synchrone en utilisant une seule réactance synchrone X_d et non pas deux.

Le diagramme de Potier s'applique donc directement à ces machines. Les paramètres conditionnant le dimensionnement de ces machines sont moins nombreux, on distingue principalement la puissance, la vitesse, le facteur de puissance et la tension.

- **Machine synchrone à pôles saillants :**

Les machines synchrones à pôles saillant dont l'entrefer n'est pas constant, la structure conduit aussi à considérer, pour toutes les caractéristiques magnétiques, deux valeurs : l'une définie sur l'axe du pôle ou l'axe direct, l'autre définie sur l'axe inter polaire ou l'axe transversal, les valeurs d'axe direct interviennent notamment dans tous les phénomènes de court-circuit où la force magnétomotrice de réaction d'induit est centrée sur cet axe, alors que les valeurs d'axe transversal interviennent dans l'étude des phénomènes en charge où le décalage angulaire introduit une composante transversale.

Le diagramme de Blondel permet la représentation vectorielle du fonctionnement en tenant compte des grandeurs des deux axes. [1]

IV-2-2 : Utilisation :

- **Machine à pôles lisses :**

- Le rotor à pôles lisses, il possède une grande robustesse mécanique, il est adopté pour les alternateurs de fortes puissances, dont la fréquence de rotation est élevée (alternateur de centrale nucléaire).

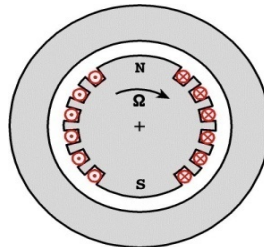


Figure IV-1 : Rotor d'une machine synchrone à pôles lisses.

- **Machine à pôles saillants :**

- Le rotor à pôles saillants (utilisé pour des machines tournantes à faibles vitesses). Il est plus simple à construire, utilisé pour les groupes électrogènes dans les centrales hydrauliques.

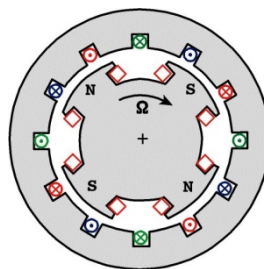


Figure IV-2 : Rotor d'une machine synchrone à pôles saillants.

IV-2-3 : Performances des deux types de la machines :

- La puissance d'un alternateur à pôles saillants va de quelques kilovolts ampères à 250000 kVA.
- La puissance d'un alternateur à pôles lisses est supérieure à 50000 KVA.
- Les turboalternateurs se caractérisent par un rapport faible de court-circuit r_{cc} , de l'ordre de 0,4 à 0,55. Cette faible valeur est retenue afin d'obtenir une plus grande puissance pour le diamètre limite du rotor.
- le rapport de court-circuit K_{cc} dans les machines à pôles saillant est souvent imposé, pour assurer la tenue des lignes à vide sans autoamorçage synchrone, à des valeurs comprises entre 0,7 et 1,6.

- Le courant d'excitation d'une machine à pôles saillants varie environ du simple au double.
- Le courant d'excitation dans le cas d'une machine à entrefer constant, il peut varier environ du simple au triple.

IV- : Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons choisi un seule système d'excitation pour les deux types de la machine synchrone, ainsi nous avons fait une comparaison selon leurs constructions et leurs performances.

Le présent travail consiste en le dimensionnement d'une machine synchrone de moyenne puissance, avec dans un premier temps, des pôles lisses et dans un second, des pôles saillants. Une étude comparative entre les deux a été effectuée.

Dans notre travail, nous avons déterminé les contraintes électromagnétiques, telles que les inductions dans les différentes parties de la machines, la charge linéaire, les densités du courant dans les enroulements en tenant compte des dimensions géométriques et des caractéristiques des enroulements. Ainsi, on a déduit le coefficient de remplissage des encoches statorique et rotorique. Nous constatons que les paramètres obtenus sont satisfaisants à savoir :

- Les densités de courant.
- Les inductions dans les différentes parties de la machine.
- le coefficient de remplissage statorique et rotorique.

Par la suite, nous avons effectué le calcul de circuit magnétique, basé sur le théorème d'Ampère. Par l'application de ce théorème, on a déterminé les f.m.m dans les différents tronçons du circuit magnétique. La f.m.m totale nécessaire pour l'aimantation de la machine, ainsi que son coefficient de saturation.

Après avoir effectué toutes ces opérations, nous avons fait une comparaison entre les deux types de machines, selon les dimensions des paramètres et leurs utilisations.

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine de construction des machines électriques, notamment les alternateurs, et de mettre en application les lois et les notions acquises pendant notre formation. On dira enfin que le domaine du calcul des machines électriques s'avère très vaste et que l'amélioration des méthodes de calcul des machines est un sujet d'actualité.

Annexe

B [T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/Cm]									
0.4	1.24	1.27	1.3	1.33	1.36	1.38	1.41	1.44	1.47	1.5
0.5	1.54	1.57	1.6	1.64	1.67	1.71	1.74	1.77	1.8	1.84
0.6	1.88	1.91	1.94	1.98	2.01	2.05	2.08	2.12	2.16	2.24
0.7	2.33	2.26	2.29	2.33	2.36	2.4	2.43	2.47	2.50	2.53
0.8	2.56	2.59	2.62	2.65	2.68	2.71	2.74	2.77	2.80	2.89
0.9	2.86	2.90	2.93	2.97	3.01	3.04	3.08	3.12	3.16	3.20
1.0	3.24	3.29	3.33	3.38	3.42	3.46	3.50	3.55	3.60	3.65
1.1	3.70	3.75	3.80	3.95	3.91	3.96	4.01	4.06	4.11	4.17
1.2	4.24	4.30	4.36	4.42	4.48	4.55	4.61	4.67	4.73	4.79
1.3	4.86	4.95	5.04	5.14	5.24	5.33	5.63	5.74	5.84	5.95
1.4	5.86	5.98	6.10	6.22	6.34	6.46	6.58	6.70	6.83	6.86
1.5	7.09	7.22	7.35	7.49	6.63	7.77	7.91	8.05	8.20	8.35
1.6	8.5	8.78	9.06	9.34	9.62	9.90	10.2	10.5	10.8	11.1
1.7	11.5	11.8	12.2	12.5	12.9	13.3	13.6	14.0	14.4	14.8
1.8	15.2	15.7	16.2	16.7	17.2	17.7	18.3	18.9	19.5	20.1
1.9	20.7	21.6	22.5	23.4	24.3	25.2	26.4	27.6	28.9	30.2
2.0	31.5	33.2	35.0	36.8	38.6	40.4	42.6	44.8	47.0	49.2
2.1	51.4	54.4	57.4	60.5	63.6	66.7	71.2	75.7	80.2	84.7
2.2	89.2	94.3	99.4	104.6	109.8	115	120	126	132	138
2.3	144	1151	158	165	172	180	188	196	205	214

Tableau de magnétisation des dents des machines a

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/Cm]									
0.4	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62
0.5	0.64	0.65	0.66	0.67	0.69	0.71	0.72	0.74	0.76	0.78
0.6	0.80	0.81	0.89	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97
0.7	1.0	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13	1.15	1.18	1.21
0.8	1.24	1.28	1.29	1.32	1.35	1.38	1.40	1.43	1.46	1.49
0.9	1.52	1.55	1.58	1.61	1.64	1.68	1.71	1.74	1.77	1.81
1.0	1.85	1.88	1.91	1.95	1.99	2.03	2.06	2.09	2.13	2.17
1.1	2.21	2.25	2.29	2.33	2.37	2.41	2.45	2.49	2.53	2.57
1.2	2.62	2.67	2.72	2.77	2.83	2.89	2.95	3.01	3.07	3.13
1.3	3.20	3.27	3.34	3.41	3.49	3.57	3.65	3.73	3.82	3.91
1.4	4.00	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.64	4.78	4.92	5.06
1.5	5.20	5.42	5.64	5.86	6.08	6.30	6.54	6.78	7.02	7.26
1.6	7.50	7.88	8.26	8.64	9.02	9.40	9.82	10.2	10.7	11.1
1.7	11.5	12.2	12.9	13.6	14.3	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0
1.8	20.0	21.6	23.2	24.9	26.5	28.1	29.6	31.1	32.7	34.2
1.9	35.7	38.0	40.3	42.6	44.9	47.2	49.3	51.4	53.5	55.6
2.0	57.7	63.0	63.0	66.0	70.0	74.0	79.0	84.0	90.0	97.0

Tableau de magnétisation des dos des machines a

Courant alternatif de l'acier 2013(T.2)

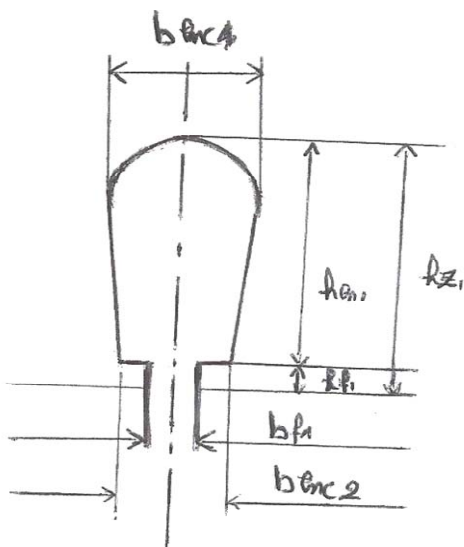
B [T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/Cm]									
0.4	0.56	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.60	0.61	0.61	0.82
0.5	0.63	0.63	0.64	0.65	0.66	0.61	0.67	0.68	0.68	0.69
0.6	0.70	0.70	0.71	0.72	0.73	0.74	0.74	0.75	0.76	0.77
0.7	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87
0.8	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97
0.9	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08
1.0	1.0	1.11	1.13	1.14	1.15	1.17	1.18	1.20	1.21	1.23
1.1	1.25	1.26	1.27	1.29	1.29	1.32	1.33	1.34	1.36	1.38
1.2	1.41	1.46	1.52	1.58	1.64	1.70	1.76	1.82	1.88	1.94
1.3	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90
1.4	3.00	3.20	3.50	3.80	4.10	4.30	4.60	5.00	5.40	5.80
1.5	6.20	6.70	7.80	8.90	10.0	11.3	12.4	13.5	14.6	15.8
1.6	17.0	18.6	20.2	21.8	23.4	25.0	27.0	28.0	30.0	32.0
1.7	34.0	37.0	40.0	43.0	47.0	50.0	54.0	58.0	62.0	66.0
1.8	70.0	75.0	80.0	85.0	92.0	100	106	112	118	124
1.9	130	136	142	148	156	165	173	181	189	198
2.0	207	226	244	263	281	300	360	420	480	540
2.1	600	670	740	810	880	950	1020	1090	1160	1230
2.2	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780	1860	1940	2020
2.3	2100	2180	2260	2340	2420	2500	2580	2660	2740	2820
2.4	2900	2980	3060	3140	3220	3300	3380	3460	3540	3620

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

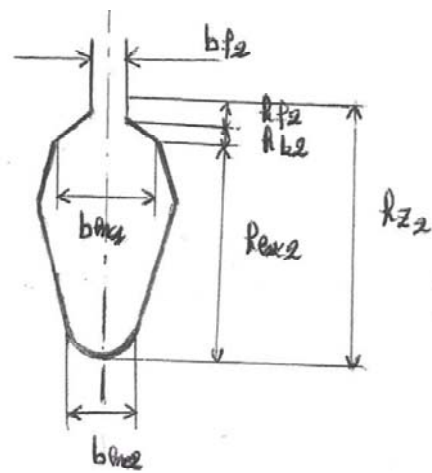
D_{nu} [mm]	D_{iso} [mm]	S_{eff} [mm ²]
0.75	0.815	0.442
0.80	0.865	0.503
0.85	0.915	0.567
0.9	0.965	0.636
0.95	1.015	0.709
1.00	1.080	0.785
1.06	1.140	0.883
1.12	1.200	1.985
1.18	1.260	1.094
1.25	1.330	1.227
1.32	1.405	1.368
1.40	1.485	1.539
1.50	1.585	1.767
1.60	1.685	2.011
1.70	1.785	2.270
1.80	1.885	2.540
1.90	1.995	2.830

Tableau des sections normalisées(T .4)

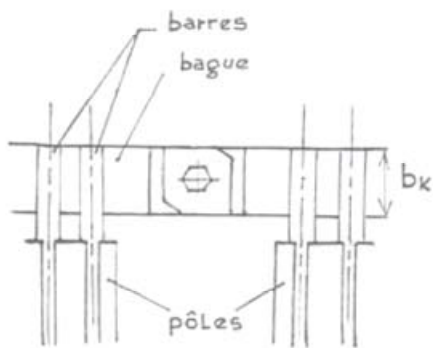
Annexe



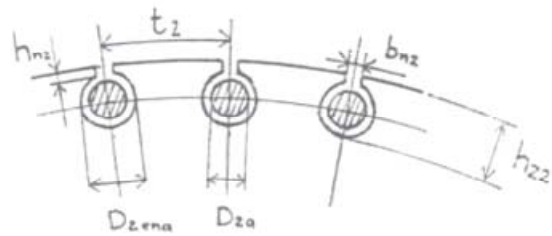
Encoche statorique



Encoche rotorique



Bague et barres de l'amortisseur



Encoche rotorique

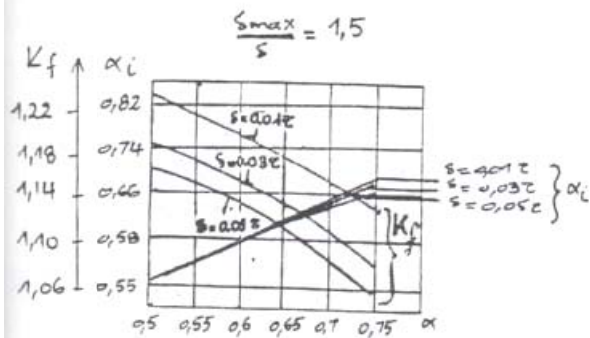


Fig:01 $\alpha_i = f(\alpha)$

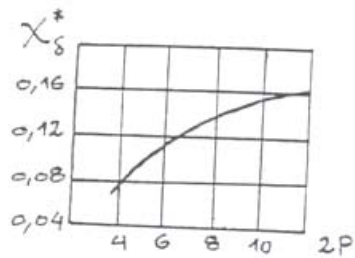


Fig:02 $X_s = f(2P)$

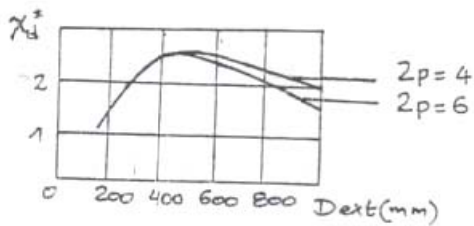


Fig:03 $X_d^* = f(Dext)$

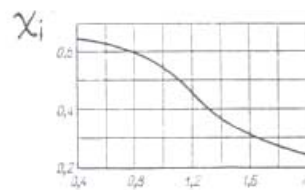


Fig:04 $X_i = f(Bc1)$

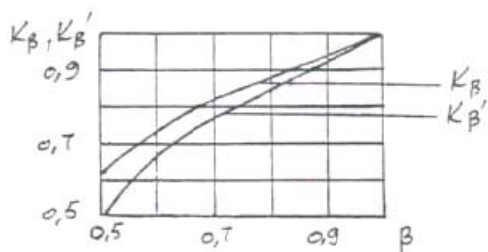


Fig:05 $K_\beta = f(\beta)$
 $K'_\beta = f(\beta)$

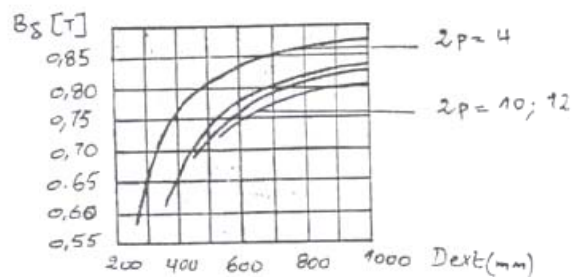
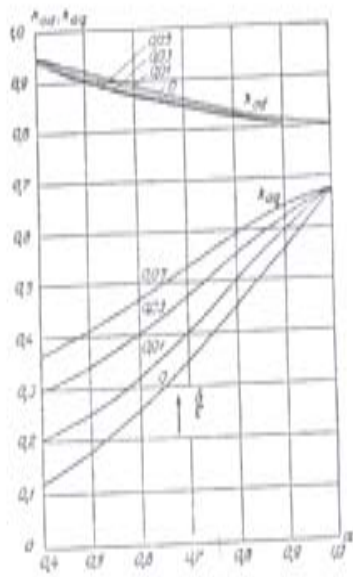


Fig:06



Courbes pour la détermination des coefficients K_{qd} et K_{qg} pour $\delta_{max}/\delta = 1,5$.
Fig: 08 $K_{d}, K_{q} = f(\alpha)$

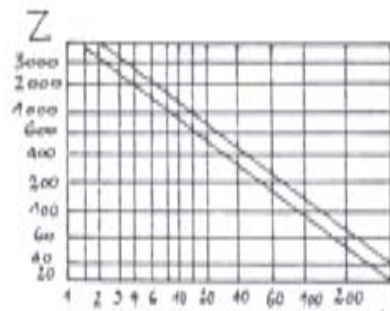


Fig: 11 $Z = f\left(\left(\frac{P_{max}}{n}\right) \frac{P_{max}}{n} \left(\frac{w}{(cr/min)}\right)\right)$

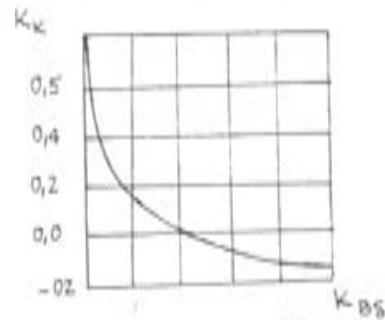
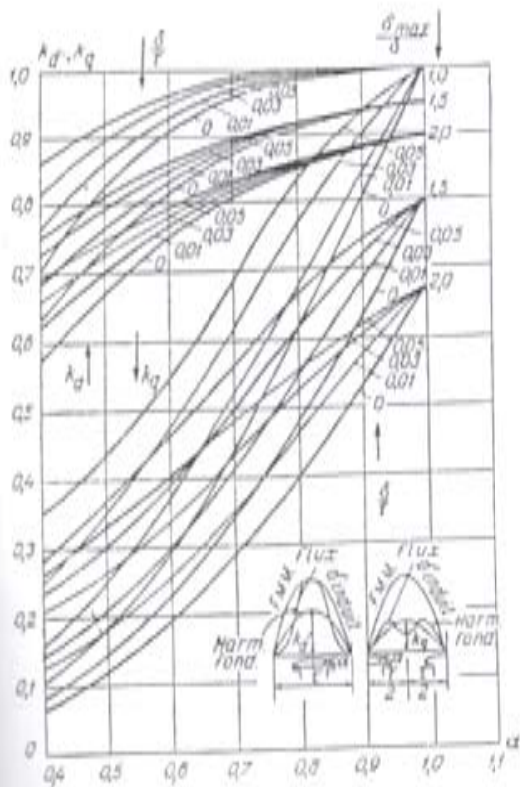


Fig: 10 $K_k = f(K_B \delta)$



Courbes pour la détermination des coefficients K_d et K_q .

Fig: 13 $K_d, K_q = f(\alpha)$

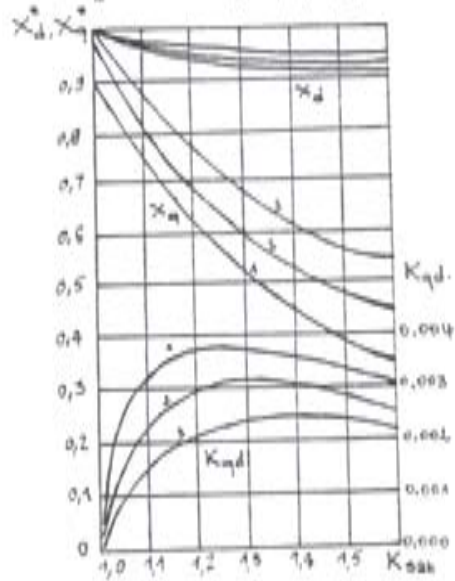


Fig: 07 $X_d, X_q, K_{qd} = f(K_B \delta)$

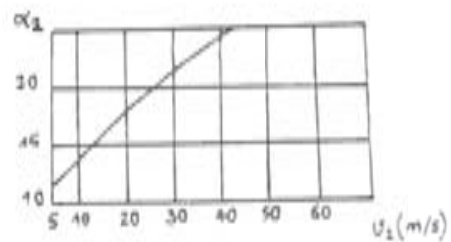


Fig: 12. $\alpha_t = f(v_2)$

Résultats

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%dimensionnement de l'amortisseur%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Le nombre de bars N2=8 bar
La densité de courant j1=5.25A/mm
Coefficient d'amortissement Kamor=0.2*10^-3
Section des bars de l'amortisseur q2 =29.8451 mm2
Diamètre du bar D2a = 6.1733 mm
Vérification de la section des bars Q2 =29.9309 mm2
Longueur du bar Lbar =237.4668 mm
Épaisseur e=6 mm
Pas d'entaille t2 =27.4104 mm
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%dimensionnement de l'encoche rotorique%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Diamètre de l'encoche D2ena=6.3733 mm
La largeur de la fente de rotor bf2=6 mm
La hauteur de la fente de rotor hf2=1 mm
Section de la bague court-circuitant des barres qk =119.3805 mm2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%dimensionnement de rotor a pôles lisses%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Diamètre extérieur de rotor Dext2=209.4 mm
Diamètre intérieure de rotor Dint2=70 mm
Nombre d'encoche rotorique Z2=24 encoches
Le pas polaire tau2 = 6 encoche
Le pas polaire taup =164.4624 mm
Le pas d'entaille t2 = 27.4104mm
Angle géométrique entre deux encoches voisines teta =0.2618rd
La largeur de la dent de rotor bz2=6 mm
La hauteur de la dent de rotor hz2=42.73 mm
La hauteur de la clavette de rotor hk2=1.73 mm
La hauteur de la fente de rotor hf2=1 mm
Hauteur de la culasse rotorique hc2 =26.9700 mm
Largeur moyenne de l'encoche rotorique benc1=14 mm
Largeur minimale de l'encoche rotorique benc2=10 mm
Section de l'encoche Senc2=550.82 mm2
Section occupé par l'isolation Siso=21.57 mm2
Section de l'encoche occupé par les conducteurs Sceff =529.250 mm2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%calcul du circuit magnétique%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Fmm dans l'entrefer Fdelta =383.5306 A
Coefficient d'entrefer Kdelta= 1.0244
Coefficient du carter Kdelta1=1.0146
Coefficient de la contribution des encoches rotoriques Kdelta2=1.0096
Fmm dans les dents statorique Fz1=39.2266 A
champs dans les dents statorique Hz1=15.7 A/mm
Fmm dans la culasse du stator Fc1=50.3610 A
Champs dans la culasse statorique Hcs=7.5 A/mm
Longueur moyen des lignes de champs ds le dos du stator Lcs=223.8267 mm
La Fmm dans les dents du rotor Fz2=42.3027 A
Hauteur de la dent rotorique hz2=42.7300 mm
Champs dans les dents rotorique Hz2=28.9 A/mm
Coefficient de saturation magnétique du stator Ksat=1.2404
Fmm du stator par paire de pole Fdeltazc=951.4980 A
Fmm dans les pôles Fpm=22.4892 A
Champs dans les poles Hpm=6.2 A/mm
Flux dans le pole fluxpm= 0.0143 Wb
Flux de dispersion par pole fluxsigma=7.6200e-004 Wb
Coefficient de conduc magnétique de dispersion lambda dap=129.1688
Coefficient de conduc du flux de dispersion lambda dep=102.0087
Coefficient de conduc magnétique du flux de dispersion lambda dpc=12.1654
Coefficient de conduc magnétique du flux de dispersion lambda dpb=14.9947
Longueur moyenne des lignes du champ dans le pole Lpm=31.3948 mm
```

Résultats

```
Fmm dans le dos du rotor Fc2=88.2550 A
Champs dans le dos de rotor Hc2=70 A/mm
Longueur moyenne des lignes du flux magnétique Lc2=76.7435 mm
Somme des fmm du circuit magnétique Fex=1.0787e+003A
Somme des fmm du pole et du dos Fpc=127.1846 A
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%résultats du calcul des résistances%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Pas moyen ylmoy=9
Pas d'entaille moyen tlmoy=20.1036 mm
Largeur moyenne d'une section bmoy1=180.9322 mm
Longueur moyenne dl partie front dl section Llfront=275.5423mm
Longueur moyenne dl spire d'enr stat Ll moy=851.0847 mm
Résistance active par phase d'enr stat R1=0.1279 ohms
Résistance active en unité réduite Rlur=0.0291 ur
Coefficient de conduc magné de disper de l'encoche lambdaen1=1.1877
Coefficient de dispersion des parties frontales lambdaf1=1.1559
Coefficient de dispersion entre les cornes des dents lambdaak=0.0168
Coefficient de dispersion globale du stator lambdaal=3.9007
Réactance de fuite du stator Xsegma=50.5449 ohms
Réactance de fuite en unité réduite Xsegmaur=6.4445 ur
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%calcul de système d'excitation%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
La F.m.m par pole de l'enroulement d'excitation Fex=1037.000 A
Pas d'inclinaison des encoches Kin2=1
Pas des raccourcissement Kr2=1
Le rapport de la partie bobinée au pas polaire rho2=0.66
Nombre d'encoches bobinées par pole q2=3.9600
Coefficient de distribution de l'enroulement Kd2=0.8398
Coefficient de bobinage de l'enroulement d'excitation Ken2=0.8398
Tension aux bornes de l'enroulement d'excitation Uex=55 volts
Courant de l'enroulement d'excitation Iex=22.6 A
Resistance de l'enroulement d'excitation Rex=2.4336 ohms
Longueur de la partie frontale d'une spire Lfex=203.4993 mm
Longueur d'une spire lexm=883.7483 mm
La densité de courant d'excitation jex=3.75 A/mm^2
Section de l'enroulement d'excitation Sex=1.5067 mm^2
Nombre de spires de l'enroulement d'excitation Wex= 171.6421
Courant d'excitation maximale Iexmax=22.6000 A
Coefficient de surcharge Ksex=1
Puissance d'excitation Pex=1243 W
Nombre de conducteurs par encoches Uenc2= 86.6879
Diamètre d'isolation diso2=1.485 mm
Nombre de conducteurs élémentaire nel=1
Coefficient de remplissage Kr= 0.7573
```


- [1] : Documentation de L'électro-Industrie ex E.N.E.L, Rapport Interne.
- [2] : A. MEZERKET, A. MESBAH, Dimensionnement et reconnaissance d'une machine synchrone à pôles lisses, DEUA.ETH 2009.
- [3] : F. MILSANT, Machines électriques, Editions MARKETING décembre 1991.
- [4] : T.WILDI, G.SYBILLE, Electrotechnique 4ème édition, Année 2005.
- [5] : P.MAYE, Aide mémoire, Edition DUNOD, Année 2006 .
- [6] :J.L.DALMASSO, Machines tournantes à courant alternatif, Edition BELIN avril 1985.
- [7] : www.electrotechnique-fr.com.
- [8] :M.Kostenko, P.Piotrovski, Machines électrique, Edition Mir, Moscou, 1979.
- [9] : L.ASSELGOU, S.KEBRI, S TAKHEROUBT, Calcul d'une machine synchrone à pôles saillants 22KVA, Année 2000.
- [10] : H.LAZIRI, N.RAHAL, Calcul d'un alternateur synchrone à pôles lisses 10KV, Année 1999.