

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADIMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

*Présenté par*  
**AZERARAK TASSADIT**  
**HAREK LOUIZA**  
Thème

# Influence de type d'encoche sur les performances d'un alternateur

*Mémoire soutenu publiquement le 24/09/2018 devant le jury composé de :*

**M Hassane MOHELLBI**  
Professeur, UMMTO, **Président**

**M<sup>me</sup> Zehor MOHELLBI eps OUDNI**  
MCB, UMMTO, **Rapporteur**

**M<sup>elle</sup> Nadia RADJA**  
MA/A, UMMTO, **Examineur**

# Remerciements

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 travail.

En premier, toute notre reconnaissance à notre promoteur Mme. MOHELLBI Zehor, maître de conférence -classe B- au département d'Electrotechnique, qui nous a dirigé et beaucoup aidé afin de mener à bien ce travail.

Nos sincères remerciements à toute l'équipe de l'EI pour leur 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 toute la famille AZERARAK, mes proches et tous mes amis ...*

***Tassadit***

***Je dédie ce travail à mes chers parents, à mon mari MOUMOUH, à tous mes proches et mes amis....***

***Louiza***

## CAHIER DES CHARGES

- Désignation : Générateur.
- Puissance nominale : 4KW.
- Fréquence :  $f=50\text{Hz}$ .
- Facteur de puissance  $\cos\varphi=0.8$  arrière.
- Tension nominale : 230V.
- Degré de protection : IP23.
- Nombre de paire de pôle :  $p=2$ .
- Classe d'isolation : F.

## INTRODUCTION GENERALE

La construction des machines électriques est un domaine très vaste, ça nécessite une grande maîtrise des paramètres de construction de celles-ci, du fait que ces derniers diffèrent d'un type de machines à une autre. La construction des machines prend en considération le dimensionnement de partie active et non active de la machine, elle tient compte du fonctionnement en régime stable et instable et dans le cas général, la construction a pour but d'améliorer le rendement tout en respectant les exigences économiques et industrielles. [10]

L'objet de notre travail consiste à étudier l'influence du type d'encoches sur les performances d'un alternateur.

L'étude se portera sur quatre types d'encoches à savoir :

- 1- Encoche trapézoïdales semi- fermée à fond arrondi.
- 2- Encoche trapézoïdales semi-fermée à fond plat.
- 3- Encoche ouverte.
- 4- Encoche ovale.

Pour ce faire, on sera appelé à prendre en considération les dimensions principales qui sont, la longueur virtuelle et le diamètre intérieur de la machine.

Par la suite on entamera le calcul de toutes dimensions nécessaires au dimensionnement de la machine pour les quatre types d'encoches. Une fois ces encoches sont dimensionnées, la feuille statorique et rotorique le sont aussi, on passera au calcul du circuit magnétique à vide ce qui nous permettra de tracer la caractéristique à vide :

$E_{01}=f(F_{ex})$  et les caractéristiques partielles suivantes :

$$\phi_r = f(F_{\delta zcr})$$

$$\phi_{\Gamma r} = f(F_{\delta zcr})$$

$$\phi_{pm} = f(F_{pcr})$$

Qui seront nécessaires à la détermination de la f.é.m. d'excitation en charge et les paramètres de la machine notamment la résistance et la réactance, le calcul des pertes et rendement s'effectuera aisément. [9]

Il faut noter tout ce processus de calcul ne sera possible vue la variation des variantes, qu'en s'appuyant sur un programme informatique élaboré en conséquence à savoir :

- Dimensionnement de la feuille statorique et rotorique avec les quatre types d'encoches tout en tenant compte de l'optimisation.

- Calcul du circuit magnétique à vide et en charge.
- Dimensionnement de l'enroulement d'excitation et de l'enroulement supplémentaire.
- Calcul des paramètres de la machine et enfin calcul des pertes et du rendement.

# Chapitre I

## Généralités sur la machine synchrone

## I.Introduction

La machine synchrone est une machine tournante qui produit l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique dans son fonctionnement génératrice, elle peut aussi fonctionner en moteur en produisant l'énergie mécanique à partir de l'énergie électrique.

### I.1.Définition et rôle

Un alternateur est une machine synchrone construite pour fournir de l'énergie électrique sous forme alternative. Cependant derrière cette simple définition se cachent des réalisations très différentes selon les applications dans lesquelles elles sont utilisées.

Les alternateurs sont la source primaire de l'énergie électrique que nous consommons, plus de 95% de la production mondiale est produite par des alternateurs. [1]

#### I.1.1Symbole électrique

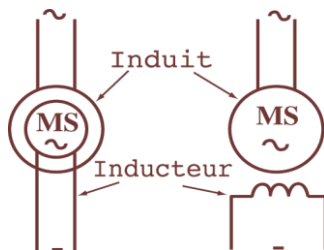
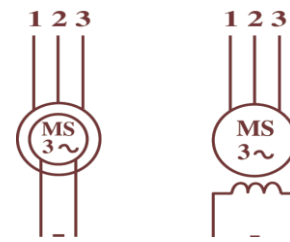


Figure (I.1) : Machine monophasée



Figure(I.2) : Machine triphasée

#### I.1.2. Rôle de l'alternateur

L'alternateur est utilisé principalement pour la production de l'énergie électrique, en transformant de l'énergie mécanique qui vient des sources primaire, en énergie électrique sous forme de courant alternatif qu'elle peut fournir à une installation autonome ou débiter directement sur un réseau. L'alternateur peut jouer le rôle d'un compensateur synchrone en tournant à vide et sa seule fonction est de consommer ou de fournir de la puissance réactive au réseau il peut également jouer le rôle d'un régulateur de fréquence et de tension. [2]

## I.2. Constitution des alternateurs

L'alternateur est constitué généralement de deux parties : une partie tournante appelée inducteur et une partie fixe appelée induit. Ces deux parties sont séparées par un entrefer.



Figure (I.3) : rotor et stator d'une machine synchrone.

**a) L'induit (stator)**

Le stator comprend un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles en forme de couronne, isolées les unes des autres pour limiter les courants de Foucault. L'ensemble des couronnes avec leur isolation est fortement serré, il constitue le circuit magnétique du stator.

**b) L'inducteur (rotor)**

Le rotor tourne à l'intérieur du stator immobile. Il porte dans les encoches disposées à sa périphérie, un enroulement parcouru par un courant continu. Le courant continu provient du système d'excitation, le rotor excité en tournant produit un champ tournant avec lui. Ce champ tournant engendre des forces électromotrices dans chacune des phases de l'enroulement du stator. Les pôles sont alternativement nord et sud leur nombre total  $2p$  est toujours paire. Certains rotors n'ont que 4 pôles, il en est qui en possèdent plusieurs dizaines. Si les différentes phases du stator sont fermées sur un circuit extérieur, elles sont parcourues par des courants alternatifs. L'ensemble de ces courants produit un champ tournant dans le même sens et à la même vitesse que celle du rotor.

Le champ du rotor est proportionnel au courant d'excitation, le champ du stator est proportionnel au courant dans les phases de l'enroulement du stator.

**c) L'arbre**

Il assure la transmission de l'énergie mécanique et le guidage des masses tournantes ; il est en acier forgé, il doit être dimensionné pour supporter les différents régimes de fonctionnement. Les machines comportent un ou deux bouts d'arbre pour l'accouplement.

**d) Les paliers**

Ce sont des organes réalisés en acier soudé, destinés à supporter l'arbre tournant et pouvant limiter son déplacement axial. Ils reçoivent des enroulements à billes ou à rouleaux. Un dispositif de graissage assure la lubrification.

**e) Les flasques**

Ce sont des pièces massives ou ajourées, fixées à la carcasse servant à protéger les enroulements.

**f) Les balais**

Ce sont des pièces conductrices, généralement fixées, destinées à assurer par un contact glissant la liaison électrique entre un organe mobile et un autre fixe.

**g) Les portes balais**

Organes servant à porter les balais, et permettant de les maintenir en contact avec la surface mobile.

**h) Les bagues collectrices**

Ce sont des organes conducteurs sur lesquels s'appuient les balais, destinées à permettre le passage du courant du circuit induit au circuit inducteur pour une machine auto-excitée.

**i) La boîte à bornes**

C'est un dispositif permettant le raccordement des extrémités des conducteurs de la machine avec le réseau extérieur.

**j) La carcasse**

Pièce ou ensemble de pièces, soutenant ou reformant le paquet statorique, assurant la protection contre les chocs extérieur. Sur la carcasse, on dispose d'une plaque signalétique indiquant les caractéristiques de la machine et son régime de fonctionnement nominal. [1] [2]

**I.3.Types d'alternateurs**

Il existe trois grandes familles de rotor :

- Rotor bobiné à pôles saillants.
- Rotor bobiné à pôles lisses.
- Rotor bobiné à aimant permanent.

**I.3.1.Rotor bobiné à pôle lisse**

Dans un alternateur à pôle lisse l'entrefer est constant, ce type des alternateurs a une très grande vitesse, le rotor à une forme cylindrique pleine.

On trouve les alternateurs à pôle lisse dans des centrales thermiques ou nucléaires entraînées par des turbines à vapeur, leurs puissance sont élevées (au moins 50000 KVA). Les machines les plus récentes sont refroidies à l'eau ou à l'hydrogène circulant dans des conducteurs creux. [3]

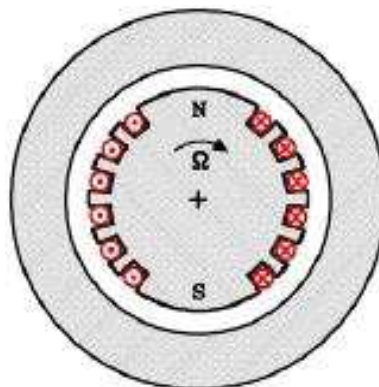


Figure (I.4) machine synchrone à pôle lisse

### I.3.2. Rotor bobiné à pôle saillant

L'entrefer pour ce type d'alternateur est variable.

Dans les alternateurs à pôle saillant le rotor est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud entourés par des enroulements inducteurs alimentés en courant continu d'excitation grâce à un système de balais frottant sur des bagues. Le nombre de pôle est toujours pair, il varie selon la machine.

La puissance pour ce type d'alternateurs va de quelques centaines à quelques milliers de KVA, ils sont utilisés pour la production de l'énergie électrique sur un réseau national, on les trouve dans les centrales hydrauliques. [3]

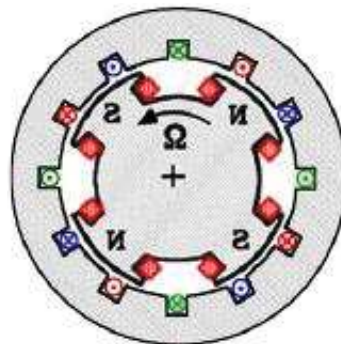


Figure (I.5) machine synchrone à pôle saillant

### I.3.3. Rotor bobiné à aimant permanent

La propriété de l'aimant permanent et le choix des matériaux convenables sont cruciaux dans la conception de la machine à aimants permanents. Le choix des aimants permanents est essentiel puisqu'ils interviennent beaucoup dans le couple massique qu'on peut attendre de l'actionneur. Leurs performances vont souvent de pair avec leur prix de revient.

#### ➤ Les ferrites

Sont des composants d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Ils sont obtenus par frittage et peuvent être isotropes ou anisotropes. Ces aimants possèdent des performances modestes mais se sont imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible prix de revient et d'une rigidité magnétique élevée. En raison de leurs faibles valeurs d'aimantation rémanente (environ 0.4T), les ferrites sont utilisées plutôt dans des machines à aimants de faible puissance à faible coût.

➤ **Le samarium cobalt (SmCo5, Sm2Co17)**

Il est beaucoup plus performants en terme de densité volumique d'énergie que les autres type d'aimants, il va de 140 à 200[kJ/m<sup>3</sup>] pour le SmCo5 et de 180 à 240[kJ/m<sup>3</sup>] pour le Sm2Co17, et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 350° C), mais il est très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition. [4]



Figure(I.6) : rotor à aimant permanent.

## **I.4.Principe de fonctionnement des alternateurs**

### **I.4.1.Le champ tournant**

On appelle champ tournant, la portion de l'espace où existe un champ magnétique de la valeur constante dans la même direction avec une vitesse angulaire constante. Les courants alternatifs dont le stator crée un champ magnétique tournant à la vitesse  $\Omega_s$  définit par :

$$\Omega_s = \frac{W}{P} \quad (I.1)$$

$\Omega_s$  : vitesse de rotation de champ tournant [rad/s].

W : Pulsation des courants alternatifs [rad/s].

p:nombre de pair de pôles.

### I.4.2. La vitesse de synchronisme

Le champ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor donc on peut dire que le rotor ne tourne qu'à la vitesse de synchronisme imposée par la fréquence des courants statoriques circulant dans l'induit.

### I.5. Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un alternateur se résume en la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le rotor qu'il soit à pôle lisse, saillant ou à aimant permanent il est alimenté par un courant continu qui crée un champ magnétique dans l'entrefer.

Ce rotor tourne à l'intérieur d'un stator composé de 3 bobines représentant les trois phases statorique. Lorsque le champ magnétique fixe passe devant une bobine, il induit des courants à l'intérieur de celle-ci. Pour chaque bobine ce courant induit crée une différence de potentielle qui est une des tensions délivrée par l'alternateur. [4]

#### I.5.1. La force électromotrice de l'alternateur

La force électromotrice d'induit crée par le déplacement relatif de circuit induit par rapport au circuit inducteur avec une vitesse identique à la vitesse de synchronisme.

Les pôles nord prennent la place des pôles sud à cause de la rotation de rotor qui donne un changement de sens de flux magnétique et aussi l'inversion de la f.é.m. pour cette raison on peut dire que la f.é.m. produit est alternative définie par :

D'une valeur efficace E exprimer par la relation de Boucherot.[4]

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (I.2)$$

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot K \cdot N \cdot f \cdot \phi = 2.22 \cdot K \cdot N \cdot f \cdot \phi \quad (I.3)$$

$\phi$  : flux fourni par un pôle [Wb].

f : fréquence de réseau.

N : nombre des conducteurs de l'induit.

K : coefficient de bobinage de l'enroulement.

#### I.5.2. La 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  $\phi_s$  le flux de la réaction d'induit obtenu en charge,  $\phi_a$  le flux d'excitation qui compose avec  $\phi_s$  pour donner le flux totale  $\phi$ . [2]

### **I.5.3.Chute de tension**

La tension aux bornes de l'alternateur lorsqu'il débite sur une charge diminue 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 prédéterminer une fois les paramètres de la machine connus. [1]

### **I.6.Les caractéristiques d'un alternateur**

Les caractéristiques d'un alternateur peuvent être déterminées à partir de différentes essais :

- Essai à vide,
- Essai en charge,
- Essai en court-circuit.

#### **I.6.1.Essai à vide**

L'essai à vide sert à déterminer la caractéristique interne du l'alternateur ainsi la force électromotrice nominale.

#### **I.6.2.Essai en charge**

Il sert à déterminer la caractéristique externe de l'alternateur ainsi que la tension nominale et le courant nominal.

#### **I.6.3.Essai en court-circuit**

Il sert à déterminer la réactance de synchronisme.

### **I.7.Refroidissement 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.

#### **I.7.1.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 demie plus grand.
- Les éventuelles fuites s'échappent à l'air libre.
- Le silence de fonctionnement est notablement amélioré.

### I.7.2. 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.

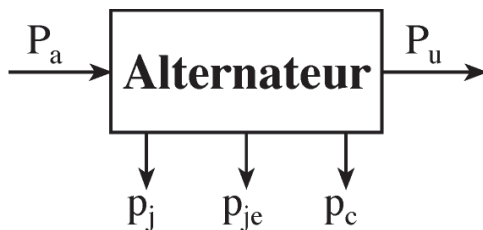
L'ensemble de toutes ces cavités sont reliées entre elles au droit des têtes de bobines et alimentées en eau déminéralisés.

Le rôle de cette circulation est double :

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

Le système permet également de protéger la machine contre le gel à l'arrêt ou de réchauffer celle-ci avant le démarrage. La circulation s'effectue en circuit fermé, avec filtration et des ioniseur permettant de maintenir une valeur de conductivité inférieure à 5 micros siemens / cm la valeur d'arrêt étant fixe à 9 micros siemens, la circulation est assurée par deux moto pompes, l'eau est refroidie à laide de réfrigérant. [4]

## I.8. Bilan des puissances d'un alternateur



### I.8.1. Puissance absorbée

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

$$P_a = \Omega s. C_u = 2\pi n s C_u \quad (I.4)$$

$P_a$  : La puissance absorbée en [W]  
 $\Omega s$  : pulsation de rotation en [rad/s]  
 $n s$  : vitesse en [tr/s]  
 $C_u$  : 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).

$$P_a = \Omega s. C_u + U_e. I_e \quad (I.5)$$

$$P_a = 2\pi n s C_u + U_e. I_e \quad (I.6)$$

### I.8.2. Puissance utile

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

$$P_u = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (I.7)$$

### I.8.3. Bilan des pertes

Pertes par effet joule dans l'inducteur :

$$P_{je} = U_e. I_e = r_e. I_e^2 \quad (I.8)$$

Pertes par effet joule dans l'induit :

$$P_j = \frac{3}{2} R I^2 \quad (I.9)$$

Où  $R$  est la résistance vue entre deux bornes de l'alternateur. Ces pertes dépendent de la charge.

- Pertes dites « collectives »  $p_c$ .
- Pertes mécaniques et pertes fer qui ne dépendent pas de la charge.

### Remarque

Comme les pertes mécaniques et les pertes fer dépendent de la fréquence et de la tension  $U$ , elles sont généralement constantes.

### I.8.4. Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3} U I \cos \varphi}{2\pi n s C_u + U_e. I_e} \quad (I.10)$$

Ou :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + U_e. I_e + \frac{3}{2} R I^2 + p_c} \quad (I.11)$$

## **I.9. Avantages et inconvénients des machines synchrones**

### **I.9.1. Avantages de la machine synchrone**

- Son rendement est excellent, il est supérieur à tous les autres types des machines.
- Sa vitesse est constante, même 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 il est branché.

### **I.9.2. Inconvénients de la machine synchrone**

- 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 du moteur.
- 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.[8]

## **I.10. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons vu quelques définitions des parties importantes de la machine synchrone, son principe de fonctionnement ainsi que les avantages et les inconvénients. Dans ce qui suit on va entamer le dimensionnement de la machine synchrone.



## Chapitre II

# Dimensionnement de l'enroulement statorique et du noyau rotorique

## II. Introduction

Le calcul d'une machine électrique en générale nécessite un bon choix des paramètres de celle-ci, parmi ces derniers nous citerons en premier lieu les paramètres de dimensionnement qui sont d'ordre électrique, magnétique et géométrique. Ainsi que les dimensions principales notamment, le diamètre intérieur du stator et la longueur virtuelle. Pour la suite nous entamerons le dimensionnement de la feuille statorique en tenant compte de types d'encoches.[10]

### II.1. Dimensions principales du stator

#### II.1.1. Longueur virtuelle

Elle est explicitée selon la formule permettant sa détermination. Nous constatons qu'elle dépend directement de la puissance électromagnétique ou l'influence de  $A$  et  $B\delta$  apparaisse et de manière significative. [9] [10]

#### Etablissement de la formule

En régime nominale, la FEM induite de la machine est donnée par la formule suivante :

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

$K_f$ : facteur de forme d'induction dans l'entrefer.

$K_{en1}$  : facteur de bobinage de l'enroulement statorique pour l'harmonique fondamentale qui vaut :

$$K_{en1} = K_i \cdot K_d \cdot K_r \quad (II.2)$$

$K_d$ : Facteur distribution.

Il est donné par la formule suivante :

$$K_d = \frac{\sin(q \cdot (\frac{\delta}{2}))}{q \cdot \sin(\frac{\delta}{2})} \quad (II.3)$$

$K_r$  : facteur de raccourcissement du pas de l'enroulement statorique pour l'harmonique fondamentale qui vaut :

$K_r = 1$  : pas de raccourcissement.

$K_i$  : facteur d'inclinaison

$K_i = 1$  : pas d'inclinaison des encoches.

Pour  $2p = 4$  la valeur préliminaire de  $K_{en1}$  est 0.96

$\phi$  : flux mutuelle sous un pôle.

$\alpha_i$  : coefficient de recouvrement polaire.

On prend  $\alpha_i = 0.66$ .

$\tau$  : pas polaire.

$$\tau = \pi \frac{D_{int}}{2p} \quad (II.4)$$

$D_{int}$  : diamètre intérieur du stator.

Dans les machines synchrones le nombre de pôle est imposé par la vitesse de rotation  $n$  et la fréquence  $f$ .

En remplaçant  $\phi$  et  $\tau$  dans... (1) d'où en écrit :

$$E_n = 4 \cdot k_f \cdot K_{en1} \cdot f \cdot W_1 \cdot B_\delta \cdot q_i \cdot \frac{\pi \cdot D_{int}}{2 \cdot p} I_i \quad (II.5)$$

Sachant que la puissance électromagnétique est donnée par la formule suivante :

$$P_i = K_e \cdot S_n = \frac{K_e \cdot P_{no}}{\cos \varphi} \quad (II.6)$$

$S_n$  : puissance apparente de la machine au régime nominal.

$P_{no}$  : puissance utile en régime nominal.

$K_e$  : coefficient de majoration de f.e.m d'induction mutuelle lorsqu'on passe de la marche à vide à la marche en charge de la machine en régime nominal.

$K_e$  : est compris entre 1.05 et 1.08.

$$K_e = \sqrt{\cos^2 \varphi + (\sin \varphi + X_\delta)^2} = \frac{E_n}{U_{1n}} \quad (II.7)$$

On prend  $K_e = 1.05$

$X_s$  = réactance de fuite en unité réduite du stator choisie primitivement, elle est donnée par en fonction du nombre de pôles

Pour  $2p = 4$

$X_s = 0,08 [\Omega]$

### Expression du courant nominal

$$I_n = \frac{A \cdot \pi \cdot D_{int}}{2 \cdot m_1 \cdot W_1} \quad [A] \quad (II.8)$$

A : charge linéaire en [A/m] qui est le courant total de la partie d'encoche, par unité de longueur du périmètre de l'induit. Elle est donnée en fonction du diamètre extérieur de la machine.

$$N_1 = 2 \cdot m_1 \cdot W_1 \quad (II.9)$$

$N_1$  : nombre de conducteurs connectés en série et disposés dans les encoches du stator.

$m_1$  : nombre de phases  $m=3$

$W_1$  : nombre de spires par phase de l'enroulement statorique.

On a :

$$P_1 = k_I \cdot S_n = k_I \cdot U_N \cdot I_n \cdot m_1 \quad (II.10)$$

Et

$$K_E = \frac{E_n}{U_n} \Rightarrow P_1 = E_n \cdot I_n \cdot m_1 \quad (II.11)$$

En remplaçant l'expression du courant  $I_n$  on aura :

$$P_1 = m_1 \cdot E_n \cdot \frac{\pi \cdot D_{int} \cdot A}{2 \cdot m_1 \cdot W_1} \quad (II.12)$$

$$E_n = \frac{2 \cdot W_1 \cdot P_1}{\pi \cdot D_{int} \cdot A} \quad (\text{II.13})$$

$$E_n = 4 \cdot K_{en1} \cdot K_f \cdot f \cdot W_1 \cdot B_\delta \cdot \alpha_i \cdot \frac{\pi \cdot D_{int} \cdot I_1}{2 \cdot p} \quad (\text{II.14})$$

$$L_i = \frac{P_1}{2 \cdot k_f \cdot K_{en1} \cdot f \cdot B_\delta \cdot \pi^2 \cdot D_{int}^2 \cdot \frac{\alpha_i}{2 \cdot p} \cdot A} \quad (\text{II.15})$$

$$L_i = \frac{P_1}{k_f \cdot K_{en1} \cdot B_\delta \cdot \pi^2 \cdot D_{int}^2 \cdot \alpha_i \cdot \frac{n}{60} \cdot A} \quad (\text{II.16})$$

$$L_i = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot P_1}{k_f \cdot K_{en1} \cdot B_\delta \cdot A \cdot D_{int}^2 \cdot \alpha_i \cdot n} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.17})$$

Avec :

n : vitesse de rotation en tr/min.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{II.18})$$

### Remarque :

Comme la valeur de  $L_i$  est inférieure à 400 mm, il n'y a pas lieu de prévoir des canaux de ventilation. Par conséquent la longueur géométrique de paquet magnétique de l'induit  $L_g$  diffère peu de sa longueur virtuelle  $L_i$ , par conséquent  $L_i \approx L_g$  [10]

### II.1.2. calcul du diamètre intérieur du stator

Le diamètre intérieur de l'induit est donnée par la formule empirique suivante :

$$(\text{II.19})$$

$D_{ext}$  : diamètre extérieur de l'induit.

$D_{ext}=230$  mm.

### II.1. 3.Coefficient de longueur $\lambda$

$$\lambda = \frac{L_i}{\tau} \quad (\text{II.20})$$

Une fois que les dimensions principales sont choisies, on procède à la vérification du coefficient de longueur  $\lambda$ .

$\lambda$  est compris entre 0,7 et 1,3.

## II.2. Dimensionnement de l'enroulement statorique

L'enroulement utilisé pour notre machine est un enroulement concentrique à une seule couche, ces enroulements sont surtout utilisés pour les machines à faible puissances et surtout pour leur réalisation très adoptée en industrie des machines.[10]

### II.2.1. Nombre d'encoches par pôle et par phase

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} \quad (\text{II.21})$$

Les enroulements les plus utilisés sont ceux ayant un nombre entier d'encoche par pôle et par phase.

$Z_1$  : nombre totale d'encoches au stator, il est choisi en fonction de la puissance de la machine. Pour 4KW on prend  $Z_1=36$  encoches.

$p$  : nombre de paire de pole.  $p=2$

Il est imposé par la vitesse de rotation et la fréquence des courants statoriques.

$m$  : nombre de phases.  $m=3$

### II.2.2.pas dentaire

C'est la distance entre les axes de deux encoches successives.

$$t_1 = \pi \frac{D_{int}}{Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.22})$$

### II.2.3. Angle électriques séparant deux encoches consécutives $\gamma$

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z_1} \quad (\text{II.23})$$

**II.2.4. Pas moyen de l'enroulement Y**

$$Y = \frac{Z}{2p} \quad (\text{II.24})$$

**II.2.5. Calcul du courant nominal en charge par phase**

$$P_n = m_1 \cdot U_{1n} \cdot I_{1n} \quad [\text{W}] \quad (\text{II.25})$$

$$I_n = \frac{P_n}{m_1 \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.26})$$

$P_n$  : puissance utile en régime nominale.

$U_{1n}$  : tension nominale en charge de l'alternateur.

$$U_{1n} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \quad (\text{II.27})$$

$\cos \varphi$  : facteur de puissance nominal.

**II.2.6. Calcul du nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche**

$$U_{\text{en}} = \frac{A \cdot t_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}}{I_1 \cdot n} \quad [\text{conducteurs}] \quad (\text{II.28})$$

$A$  : charge linéaire en  $[\text{A/m}]$  donnée en fonction de la puissance de la machine. Pour la puissance de 4KW. Nous choisirons  $A$  tel que :

$$15000 \leq A \leq 20000.$$

$a_1$  : nombre de branches parallèle on prend  $a_1=1$

**II.2.7. Calcul de la section effective d'un conducteur  $S_{1\text{eff}}$** 

$$S_{1\text{eff}} = \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot J_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.29})$$

$J_1$  : densité de courant exprimée en  $[\text{A/mm}^2]$ , sa valeur est choisie en fonction de la puissance de la machine, du degré de protection et de la classe d'isolation.

Exemple : pour  $P_u < 7,5 \text{ KW}$ , une classe d'isolation F et un degré de protection Ip23 on a :

$$5 \leq J \leq 6,5 \quad [\text{A/mm}^2]$$

### II.2.8. Nombre de spires par phases de l'enroulement

Il est donné par la formule suivante :

$$w_1 = p \cdot q \cdot \frac{U_{en}}{a_1} \quad [\text{spires}] \quad (\text{II.30})$$

#### Remarque :

Quand la section effective dépasse  $1,8 \text{ mm}^2$ , on subdivise la  $S_{1\text{eff}}$  en sections élémentaires.

$$S_{1\text{el}} = \frac{S_{1\text{eff}}}{n_{\text{el}}} \quad (\text{II.31})$$

$n_{\text{el}}$ : Nombre de conducteur élémentaires.

#### Vérification des paramètres électromagnétiques

Une fois les valeurs préliminaires des paramètres électromagnétiques sont choisies, on procède à la vérification de ces derniers.

Les valeurs vérifiées doivent être proches des valeurs préliminaires.

- Vérification de la charge linéaire

$$A = \frac{I_{1n} \cdot U_{en} \cdot Z_1}{\pi \cdot D_{\text{int}} \cdot a_1 \cdot 10^{-3}} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{II.32})$$

- Vérification de l'induction dans l'entrefer

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau \cdot L_i} \quad [\text{T}] \quad (\text{II.33})$$

- Vérification de la densité du courant

$$J = \frac{I_{1n}}{n_{\text{el}} \cdot S_{1\text{eln}}} \quad [\text{A/mm}^2] \quad (\text{II.34})$$

$S_{1\text{eln}}$  : section du conducteur normalisée la plus proche de celle calculée.

Pour la suite de calcul, on prendra en considération la section normalisée.

Les résultats se figurent dans le tableau suivant :

Variables		A	Bg	J	li	$\lambda$	Wl	Uen
Type	D'encoche	[A/m]	[T]	[A/mm <sup>2</sup> ]	[mm]			
Valeurs préliminaires	Type 1	16000	0.6	5.5	88.81	0.68	190.41	31.73
	Type 2	16000	0.6	5.0	88.81	0.68	190.41	31.73
	Type 3	16000	0.6	6.0	88.81	0.68	190.41	31.73
	Type 4	16000	0.6	6.3	88.81	0.68	190.41	31.73
Valeurs définitives	Type 1	15616	0.58	5.2	92.91	0.71	185	31
	Type 2	15616	0.58	4.7	92.91	0.71	185	31
	Type 3	15616	0.58	5.15	92.91	0.71	185	31
	Type 4	15616	0.58	5.15	92.91	0.71	185	31

Tableau -1-

Variables		D <sub>int</sub>	q	Gamma	Iln	S <sub>eff</sub>	S <sub>norm</sub>	d <sub>isno</sub>	Taux
Type	D'encoches	[mm]		[°]	[A]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]
Type	Type 1	164.7	3	20	7.24	1.317	1.368	1.405	129.37
	Type 2	164.7	3	20	7.24	1.449	1.539	1.485	129.37
	Type 3	164.7	3	20	7.24	1.207	1.227	1.330	129.37
	Type 4	164.7	3	20	7.24	1.207	1.227	1.330	129.37

Tableau -2-

### II.3. Dimensionnement du noyau statorique

Le noyau de stator est fabriqué avec des tôles magnétiques fortement alliées, d'épaisseur 0,5 mm. Pour l'isolation des feuilles statoriques, elle est réalisée par oxydation.[9][10]

#### II.3.1. Dimensionnement de la feuille statoriques

Pour déterminer la surface occupée par les conducteurs, on est appelé à connaître certains détails sur la feuille statorique. . Ainsi que les types d'encoches utilisées.

Le choix de types d'encoche dépend généralement de la puissance de la machine, elles peuvent être ouvertes, fermées ou semi fermée. [10]

Dans le cas de notre étude, les encoches utilisées sont de forme trapézoïdale, dont les flancs sont parallèles, donc la largeur de la dent est constante. Elles sont désignées comme suit :

- Encoche trapézoïdale semi fermée à fond arrondi.

- Encoche trapézoïdale semi fermée à fond plat.
- Encoche trapézoïdale ouvert.
- Encoche trapézoïdale ovale.

### II.3.1.a. Longueur de la dent

Nous prendrons la largeur de la dent constante sur toute sa hauteur pour les différents types d'encoches, de même pour induction dans l'entrefer. Cette largeur est déterminée en fonction de l'induction dans l'entrefer et de l'induction maximale admissible dans la dent pour éviter une forte saturation.[9][10]

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.35})$$

$B_{z1}$ : induction maximale admissible dans la dent.

### II.3.1.b. Hauteur du dos du stator

$$h_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B\delta}{K_{fer} \cdot B_{z1}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.36})$$

$B_{c1}$ : induction admissible dans la culasse du stator, elle dépend du type d'isolation et du nombre de pôles de la machine. Pour le degré de protection.

Ip 23 et  $2p=4$  on a  $1,55 \leq B_{c1m} \leq 1,75$  [T].

On prend  $B_{c1m}=1.55$

### II.3.1.c. Hauteur de la dent du stator

Hauteur de la dent du stator est donnée en fonction du diamètre extérieur de la machine et la hauteur de la culasse statorique.

$$h_{z1} = 0,5 \cdot (D_{ext} - D_{int}) - h_{c1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.37})$$

## II.3.2. Dimensionnement des encoches

Nous avons quatre types d'encoches à dimensionner, dont la forme géométrique diffère d'une encoche à une autre, pour ce faire appropriés, nous détaillerons leurs dimensions cas par cas :

### ➤ Cas où l'encoche est de type trapézoïdale semi fermée à fond arrondi

Calcul de la largeur supérieure de l'encoche :

$$b_{en2} = t_2 - b_{z1} = \frac{\pi \cdot [D_{int} + 2 \cdot (h_f + h_{k1})]}{Z_1} - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.38})$$

$$h_{21} = h_{en1} - \left(\frac{b_{en2}}{2}\right) - e_1 \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.39})$$

Calcul de la largeur inférieure de l'encoche :

$$b_{en1} = t_3 - b_{z1} = \frac{\pi \cdot [D_{int} + 2 \cdot (h_f + h_{21} + h_{k1} + e_1)]}{\pi + Z_1} - b_{z1} \quad (\text{II.40})$$

$$b_{en1} = t_3 - b_{z1} = \frac{\pi \cdot [D_{int} + 2 \cdot (h_f + h_{en1} + h_{k1}) - b_z \cdot Z]}{\pi + Z_1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.41})$$

Calcul de la hauteur de l'encoche :

$$h_{en1} = h_{z1} - h_{k1} - h_f \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.42})$$

Calcul de la section d'isolation :

$$S_{iso} = \pi \cdot e \left[ \frac{b_{en1} - e}{2} \right] + 2 \cdot h_{21} \cdot \cos \left[ \frac{\theta}{2} \right] + b_{en1} \cdot e_1 + e_1^2 \cdot \tan \left[ \frac{\theta}{2} \right] \quad (\text{II.43})$$

Calcul de la section de l'encoche :

$$S_{en} = \frac{[b_{en1} + b_{en2}] \cdot \left( h_{en1} - \frac{b_{en2}}{2} \right)}{2} + \frac{\pi}{8} \cdot (b_{en2})^2 - S_{iso} \quad (\text{II.44})$$

➤ **Cas d'encoche est de type trapézoïdal semi fermée à fond plat**

Calcul de la largeur inférieure de l'encoche

$$b_{en1} = t_2 - b_{z1} = \left[ \frac{\pi(D_{int} + 0,2 \cdot h_{z1})}{Z_1} \right] - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.45})$$

Calcul de la largeur supérieure de l'encoche

$$b_{en2} = t_3 - b_{z1} = \left[ \frac{\pi(D_{int} + 2h_{z1})}{Z_1} \right] - b_{z1} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.46})$$

Calcul de la largeur de la fente bf

La largeur de la fente est donnée environ deux fois le diamètre du conducteur avec l'isolant.

$$bf = 2 \cdot diso$$

diso : diamètre du conducteur avec l'isolant

Hauteur de la fente hf

$$hf \approx 1,5 \text{ à } 2$$

Hauteur de la clavette hk1

La hauteur de la clavette vaut :

$$hk1 = 0,5 (ben1 - bf) \quad (II.47)$$

Hauteur de l'encoche

$$h_{en1} = h_z - h_{k1} - h_f - e \quad (II.48)$$

Calcul de section d'isolation

$$S_{iso} = (b_{en1} + b_{en2} + 2 \cdot h_{en1}) \cdot e \quad (II.49)$$

e : épaisseur du papier isolant.

$$e \approx 0,4 \text{ mm}$$

Calcul de section de l'encoche

$$S_{en} = 0,5 \cdot h_{en1} \cdot (b_{en1} + b_{en2}) - S_{iso} \quad (II.50)$$

➤ **Cas d'encoche est de type trapézoïdal ouvert**

Calcul de la largeur inférieure de l'encoche

$$b_{en1} = \left( \frac{\pi \cdot D_{int}}{Z} \right) - b_{z1} \quad (II.51)$$

Calcul de la largeur supérieure de l'encoche

$$b_{en2} = \left[ \pi \cdot \left( \frac{D_{int} + 2h_{z1}}{Z_1} \right) \right] - b_{z1} \quad (II.52)$$

Calcul de la hauteur de l'encoche

$$h_{en1} = h_{z1} - e_1 - e \quad (II.53)$$

Calcul de section d'isolation

$$S_{iso} = (b_{en1} - e) + \left[ \frac{(2 \cdot e \cdot h_{en1})}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right] + (b_{en2} \cdot e_1) + e_1^2 \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (II.54)$$

Calcul de section de l'encoche

$$S_{en} = [(b_{en1} + b_{en2}) \cdot \frac{h_{z1}}{2}] \cdot S_{iso} \quad (II.55)$$

➤ **Cas d'encoche de type trapézoïdal ovale**

Calcul de la largeur inférieure de l'encoche

$$b_{en1} = \frac{[\pi \cdot (D_{int} + 2 \cdot h_{z1}) - b_{z1} \cdot Z_1]}{(Z_1 - \pi)} \quad [\text{mm}] \quad (II.56)$$

Calcul de la largeur supérieure de l'encoche

$$b_{en2} = \frac{[\pi \cdot (D_{int} + 2 \cdot h_{z1})] - (b_{z1} \cdot Z_1)}{Z_1 + \pi} \quad (II.57)$$

Calcul de la hauteur de l'encoche

$$h_{en1} = h_{z1} + (h_f + 2 \cdot e) \quad [\text{mm}] \quad (II.58)$$

Calcul de diamètre du conducteur avec l'isolation

$$D_{1s} = h_{z1} - \left( h_f + \frac{b_{en1}}{2} + \frac{b_{en2}}{2} \right) \quad (II.59)$$

Calcul de section d'isolation

$$S_{iso} = \frac{\pi \cdot e}{2} (b_{en2} - e + b_{en1} - e) + \frac{(2 \cdot e \cdot D_{1s})}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (II.60)$$

Calcul de section de l'encoche

$$S_{en} = \left[ \frac{\pi}{8} \cdot [(b_{en1})^2 + (b_{en2})^2] + \left( \frac{b_{en1} + b_{en2}}{2} \right) \cdot D_{1s} \right] - S_{iso} \quad (II.61)$$

$\theta$  : angle entre les parois latérales de l'encoche statorique qui est donné en fonction du nombre d'encoches.

Pour :  $Z_1 = 36 \Rightarrow \theta = 10^\circ$  (proposé par l'Electro Industrie)

#### II.4 Coefficient de remplissage

On définit le coefficient par la relation suivante :

$$K_{en} = \frac{U_{en} \cdot n_{el} \cdot d_{ciso}^2}{S_{en} \cdot 0,8} \quad (II.62)$$

Il doit être choisi de façon que les conducteurs occupent un espace optimal dans l'encoche.

Pour la mise à la main des conducteurs en encoche, le coefficient de remplissage doit être compris entre 0,7 et 0,75.

$$S_{en1} = 0,8 \cdot S_{en}$$

$S_{en1}$  : Section occupée par l'enroulement principal, elle vaut environ 80% de la section totale.

#### II.5. Entrefer

Choisir la forme de l'entrefer présente une grande importance, un faible entrefer peut accentuer l'effet de la réaction d'induit, par contre un grand entrefer impose une grande force magnétomotrice d'excitation, de plus dans la machine synchrone, on cherche à obtenir une forme du champ d'excitation aussi voisine que possible d'une sinusoïde, on fait alors de sorte à accroître progressivement l'épaisseur de l'entrefer à partir de l'axe des pôles et on arrondit les cornes polaires. Relativement il est plus grand que celui d'une machine asynchrone. [10][11]

##### II.5.1. La formule de calcul de l'entrefer

$$\delta = \frac{36 \cdot t_1 \cdot A \cdot 10^{-8}}{X_{ad*} \cdot B_\delta} \quad (II.63)$$

$X_{ad*}$  : Réactance d'axe direct de la réaction magnétique d'induit qui vaut :

$$X_{ad*} = X_{d*} - X_{\delta*} \quad [U. R]$$

$X_{d*}$  : valeur relative de la réactance longitudinale. Elle est donnée en fonction du diamètre extérieur.

$$\text{On prend : } X_{d*} = 1,6 \quad [U. R]$$

##### II.5.2. Valeur minimale de l'entrefer

C'est la valeur minimale de l'entrefer sur l'axe des pièces polaires.

$\delta_{min}$  est donnée par la forme suivante :

$$\delta_{min} = \frac{\delta}{1,125} \quad (II.64)$$

**II.5.3. Valeur maximale de l'entrefer**

C'est la valeur maximale de l'entrefer à sa valeur minimale dans l'axe du pôle est généralement choisie entre 1,5 et 2

$\delta_{\max}$  est donnée par la forme suivante :

$$\delta_{\max} = \frac{\delta}{0.75} \quad (\text{II.65})$$

**II.5.4. valeur moyenne de l'entrefer**

La formule de calcul de  $\delta_{\text{moy}}$  est donnée comme suit :

$$\delta_{\text{moy}} = \frac{(\delta_{\max} - \delta_{\min})}{3} + \delta_{\min} \quad (\text{II.66})$$

**II.6 Dimensionnement du noyau rotorique**

Le noyau polaire est formé d'empilages de tôle magnétiques, d'épaisseur 0.5 mm non isolées entre elles. D'épaisseur de 0.5 [mm]

**II.6.1. Largeurs de l'arc de l'épanouissement polaire**

$$b_p = \alpha_p \cdot \tau \quad (\text{II.67})$$

$\alpha_p$  : coefficient de l'arc polaire donnée en fonction de  $\alpha_i$ .

Pour  $\alpha_i=0,66$  On prend  $\alpha_p =0.7$

**II.6.2. Rayon de l'épanouissement polaire**

$$R_{ep} = \frac{D_{int}}{2 + 8 \cdot D_{int} \frac{(\delta_{\max} - \delta_{\min})}{b_p^2}} \quad (\text{II.68})$$

**II.6.3. Corde de l'épanouissement polaire**

$$b_{ep} = 2 \cdot R_{ep} \cdot \sin\left(\frac{0,5 \cdot b_p}{R_{ep}}\right) \quad (\text{II.69})$$

**II.6.4. Hauteur de l'épanouissement polaire**

$$h_{ep} = h_{ep} + R_{ep} \cdot \sqrt{(R_{ep})^2 + (0,5 \cdot b_{ep})^2} \quad (\text{II.70})$$

$h_{ep} = 2\text{mm}$

**II.6.5. Largeur du pôle**

Elle est donnée en fonction de flux par pôle et de l'induction admissible dans ce pôle

$$b_m = \frac{10^6 \cdot \Phi \cdot \Gamma \cdot m}{K_{ferm} \cdot L_p \cdot B_{pm}} \quad (II.71)$$

$\Gamma \cdot m$  : Valeur préliminaire du coefficient de dispersion du pôle. il est donné par :

$$\Gamma \cdot m = 1 + \frac{K_\Gamma \cdot 35 \cdot \delta}{\tau^2} \quad (II.72)$$

$K_{ferm}$  : coefficient de remplissage des tôles rotorique.

$$K_{ferm} = 0,97.$$

$B_{pm}$  : induction maximale admissible dans le pôle, elle est de l'ordre de 1,4 à 1.6 T.

On prend  $B_{pm} = 1,5T$ .

$L_p$  : Largeur géométrique du stator.

$$L_p = L_i + 4$$

$$\Gamma = 1 + 35 \cdot K_\Gamma \cdot \delta_{moy} / \tau^2 \quad (II.73)$$

$K_\Gamma$  : coefficient calculé à partir de la formule suivante :

$$K_\Gamma = 1,3 \cdot hp + 30 \quad \text{pour } \alpha_p \geq 0,7$$

### II.6.6. Largeur de la fenêtre polaire $h_c$

Elle donnée par la formule suivante :

$$h_c = \frac{b_{e'p} - b_m}{2} + 2 \quad (II.74)$$

### II.6.7. Hauteur bobinée du pôle $h_m$

Elle est donnée par la relation géométrique suivante :

$$h_m = 0,5 \left[ D_{int} - 2 \left( hp + hc + \delta_{min} \frac{b_m}{2} \right) \right] \quad (II.75)$$

### II.6.8. Hauteur du dos du rotor $h_{cr}$

Elle est donnée en fonction de l'induction dans l'entrefer :

$$h_{cr} = \frac{\Gamma \cdot B\delta \cdot L_i \cdot \alpha_i \cdot \tau}{2 \cdot B_{c2} \cdot L_p \cdot K_{ferm}} \quad [\text{mm}] \quad (II.76)$$

$B_{c2}$  : induction magnétique dans le dos du rotor.

$$1,2 < B_{c2} < 1,4 \quad [T]$$

On prend :  $B_{c2} = 1,2 [T]$

**II.6.9. Diamètre intérieur du rotor  $D_2$** 

$D_2$  est donnée par la formule empirique suivante :

$$D_2 = K_{int} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_u}{n}} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.77})$$

$P_u$ : puissance utile [W].

$n$ : vitesse de rotation [tr /min].

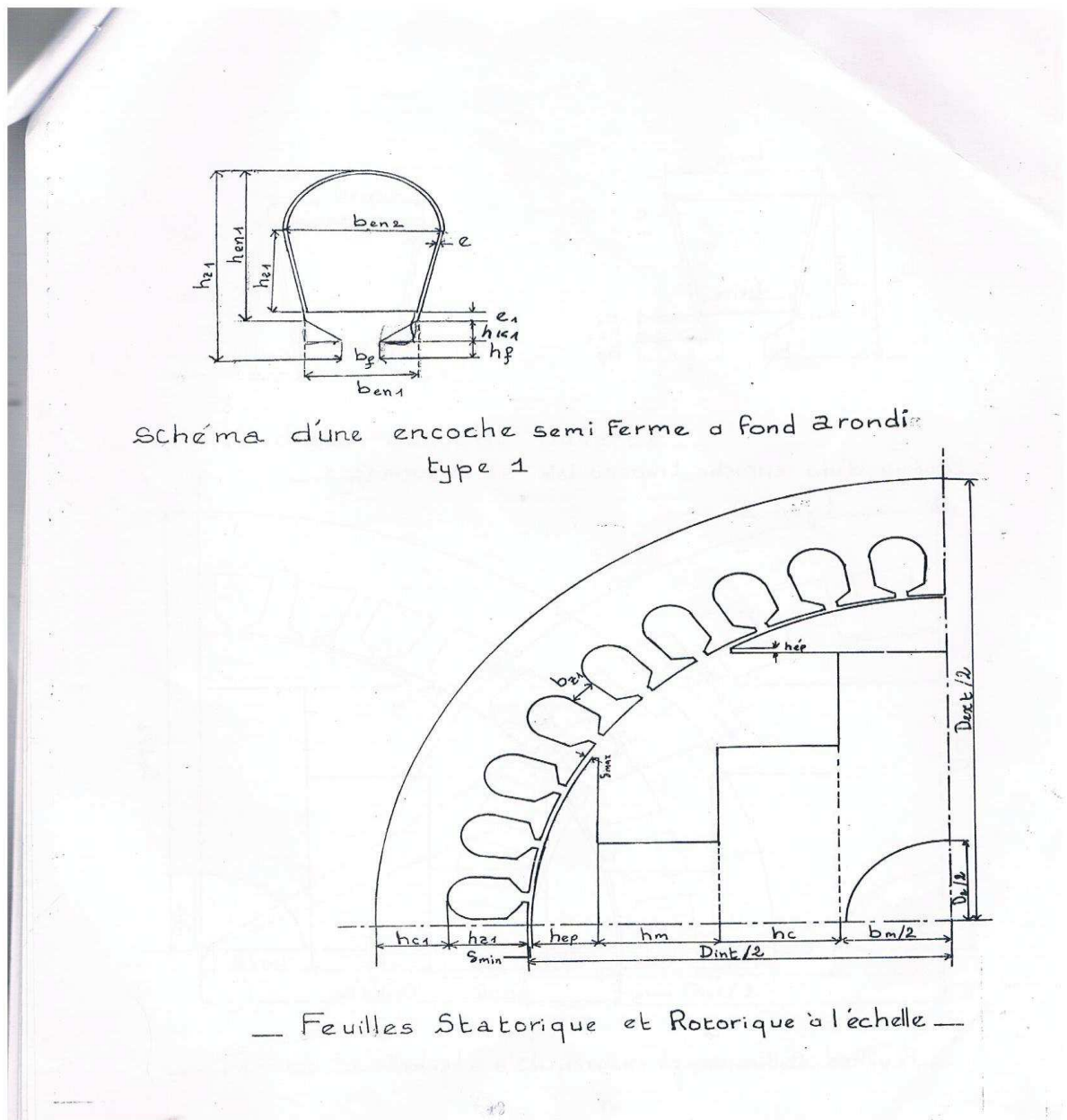
$K_{int}$  : coefficient donnée en fonction du diamètre intérieur  $D_{int}$

Pour  $D_{int}=144$  mm. On prend :  $K_{int}=30$

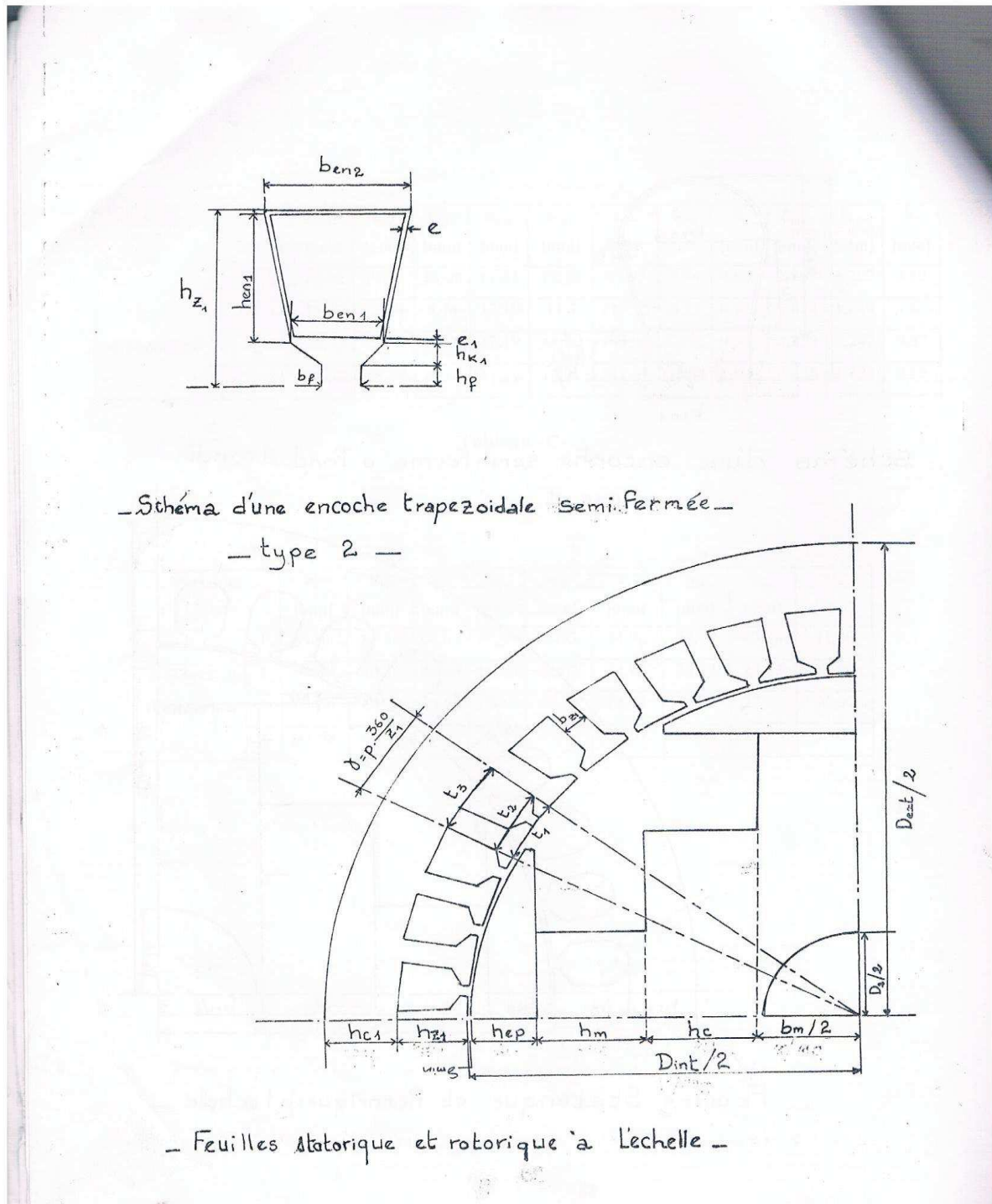
Résultats numériques dans le tableau -3-

Type D'encoches	Type1	Type 2	Type3	Type 3
Variables				
bz1 [mm]	4.82	4.82	4.82	4.82
hcm [mm]	16.63	16.63	16.63	16.63
hz1 [mm]	16.01	16.01	16.01	16.01
ben1 [mm]	10.15	9.82	9.54	10.74
ben2 [mm]	12.38	12.34	12.34	11.35
hen1 [mm]	12.51	12.11	15.36	13.71
$S_{en}$ [mm <sup>2</sup> ]	120.23	115.70	119.91	111.07
$K_{rem}$	0.63	0.73	0.57	0.61
$\delta$ [mm]	0.905	0.932	0.964	0.964
$\delta_{moy}$ [mm]	1.58	1.58	1.58	1.58
$\delta_{min}$ [mm]	1.35	1.35	1.35	1.35
$\delta_{max}$ [mm]	2.03	2.03	2.03	2.03
bf [mm]	2.81	2.97	2.66	2.66
bp [mm]	90.54	90.54	90.54	90.54
Rep [mm]	78.08	78.08	78.08	78.08
bep [mm]	85.56	85.56	85.56	85.56
hep [mm]	13.42	13.42	13.42	13.42
bm [mm]	37.14	38.74	37.14	37.14
hc [mm]	26.20	25.40	26.20	26.20
hm [mm]	22.78	22.78	22.78	22.78
hcr [mm]	21.43	21.43	21.43	21.43
D2 [mm]	41.6	41.6	41.6	41.6

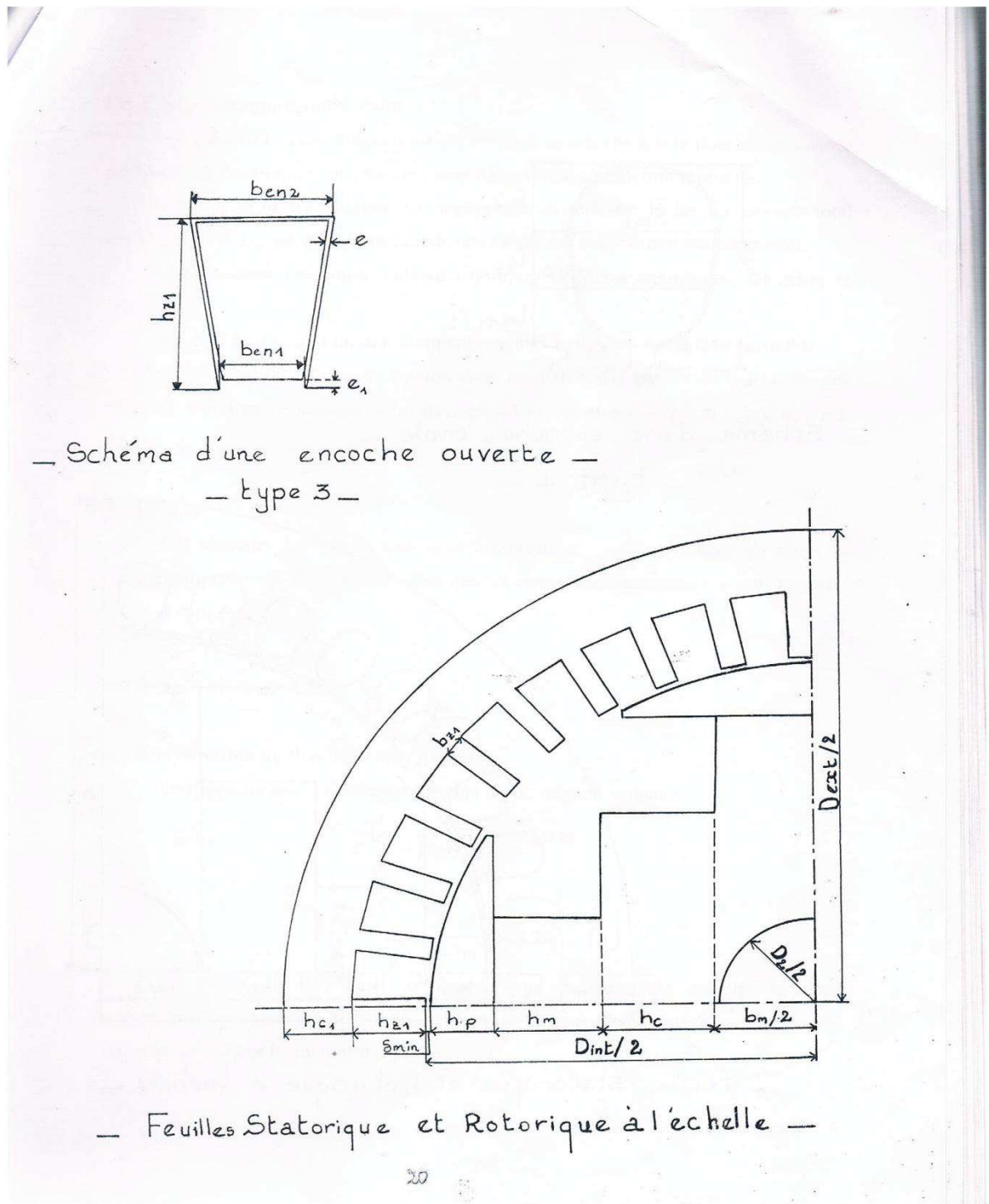
Tableau -3-



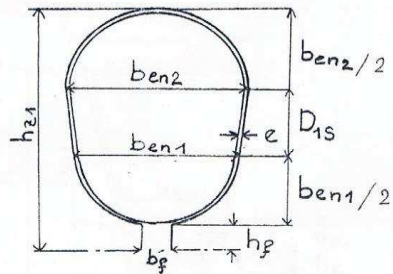
Figure(II.1) : Schéma d'une encoche semi ferme à fond arrondi.



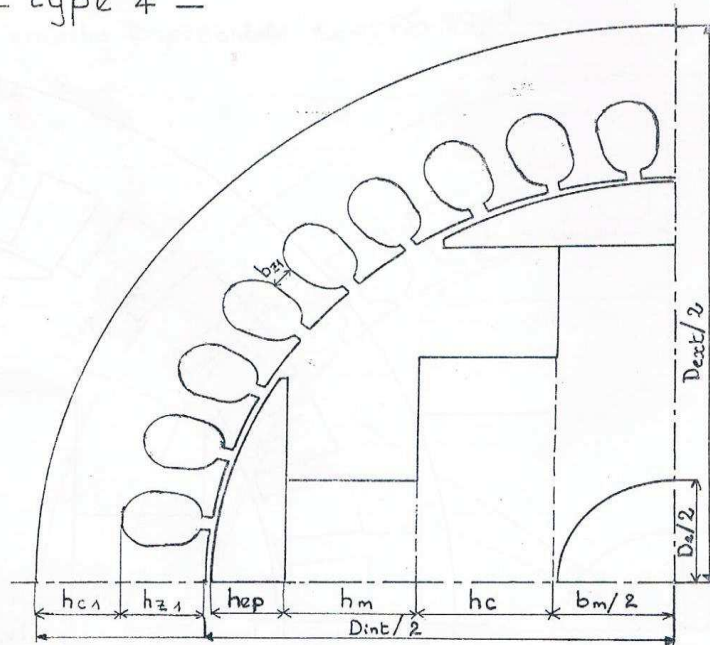
Figure(II.2) : Schéma d'une encoche trapézoïdale semi ferme



Figure(II.3) : Schéma d'une encoche ouverte.



— Schéma d'une encoche ovale —  
 — type 4 —



— Feuilles statorique et Rotorique a l'échelle —

Figure(II.4) : Schéma d'une encoche ovale.

**II.7. Conclusion**

Dans ce chapitre on a pu dimensionner des paramètres de base de la machine synchrone, qui sont nécessaire dans la fabrication de cette dernière. A partir des résultats qu'on a eus on peut passer au dimensionnement de circuit magnétique, et c'est l'étape qu'on va faire dans le chapitre suivant.





# Chapitre III

## Calcul de circuit mangétique

### 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 ( $\Phi$ ) qui correspond à des valeurs de la f.é.m. induite  $E$  de l'enroulement statorique. Pour les différentes valeurs de  $E$ , on aura la caractéristique à vide de la machine  $E = f(F_{ex})$ .

Ainsi que les caractéristiques partiales qui nous permettront de déterminer la F.M.M d'excitation en charge.

$$\Phi = f(F_{\delta zc})$$

$$\Phi_{\Gamma} = f(F_{\delta zc})$$

$$\Phi_{pm} = f(F_{pc})$$

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 de circuit magnétique à vide

Le calcul de circuit magnétique à vide permet la détermination de la F.M.M. 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

Il est donné par la formule suivante :

$$\Phi = \frac{E_n}{4 \cdot K_f \cdot K_{en1} \cdot W \cdot f} \quad [\text{Wb}] \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$$E_n = \frac{P_1 \cdot 10^{-3}}{m \cdot I_{1n}} \quad [\text{V}] \quad (\text{III.2})$$

On a aussi :

$$E_n = K_e \cdot U_n \quad (\text{III.3})$$

La valeur de flux ainsi déterminé nous permettra de calculer la force magnétomotrice dans les différentes parties du circuit magnétique notamment dans l'entrefer, la dent et la culasse statorique.

### III.1.2. F.M.M dans l'entrefer $B\delta$

La force magnétomotrice dans l'entrefer est donnée en fonction de l'induction dans l'entrefer et l'épaisseur de celui-ci :

$$F\delta = 0,8 \cdot \delta_{\text{moy}} \cdot K\delta \cdot B\delta \cdot 10^3 \quad [\text{A}] \quad (\text{III.4})$$

$B\delta$  : Induction dans l'entrefer.

$$B\delta = \frac{\phi \cdot 10^6}{\alpha \cdot l \cdot Li} \quad [\text{T}] \quad (\text{III.5})$$

$K\delta$  : Coefficient d'entrefer donné par le produit de deux coefficients partiels.

$$K\delta = K\delta_1 \cdot K\delta_2 \quad (\text{III.6})$$

$K\delta_1$  : Coefficient d'entrefer qui tient compte de la contribution des encoches statoriques à l'augmentation de l'entrefer.

$K\delta_2 = 1$  il n'y a pas de dents au rotor.

$$K\delta_1 = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5\delta \cdot t_1}{b_{f1}}} \quad (\text{III.7})$$

$$K\delta_2 = 1 + \frac{b_{f2}}{t_2 - b_{f2} + \frac{5\delta \cdot t_2}{b_{f2}}} \quad (\text{III.8})$$

### III.1.3. F.M.M. dans les dents du stator $F_z$

La chute de tension magnétique dans les dents du stator est déterminée en fonction de l'intensité du champ magnétique dans une section de la dent par la hauteur de celle-ci :

$$F_z = H_z \cdot h_{en1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.9})$$

### III.1.4. Induction dans les dents du stator $B_z$

Puisque la perméabilité du fer supérieure à celle de vide, on considère que le flux magnétique d'un pas dentaire calculé en fonction de l'induction dans l'entrefer passera entièrement dans la dent et ne traverse ni les encoches ni les intervalles non magnétiques qui les séparent (isolant entre les tôles de la dent).[10]

$$B_z = \frac{B_\delta \cdot t_1}{K_{\text{fer}} \cdot b_{z1}} \quad [\text{T}] \quad (\text{III.10})$$

A partir du tableau de magnétisation des dents statoriques (T-1), on prélève la valeur du champ  $H_z$  correspondante à  $B_z$ .

La force magnétomotrice est donnée par :

$$F_z = h_{\text{en}1} \cdot H_z \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.11})$$

### III.1.5. F.M.M. dans la culasse du stator $F_{c1}$

Elle est déterminée en effectuant le produit de la valeur de l'intensité du courant dans la culasse et celle de la largeur moyenne des lignes du champ dans le dos du stator :

$$F_{c1} = H_{\text{cs}} \cdot \xi_i \cdot L_{c1} \cdot 10^{-3} \quad [\text{A}] \quad (\text{III.12})$$

$\xi_i$  : Coefficient tenant compte du non uniformité du champ d'induction dans la culasse du stator. Il donné par la courbe  $\xi_i = f(B_{\text{cs}})$  (voir annexe figure 10)

$L_{c1}$  : longueur moyenne des lignes d'induction dans la culasse elle est donnée par la relation géométrique suivante :

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2p} (D_{\text{ext}} - h_{c1}) \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.13})$$

### III.1.6. Induction dans la culasse du stator $B_{\text{cs}}$

Le flux traversant la section droite de la culasse est la moitié du flux sous un pôle, ce qui permet d'écrire :

$$B_{\text{cs}} = \frac{\alpha_i \cdot B_\delta \cdot \tau}{2 \cdot K_{\text{fer}} \cdot h_{c1}} \quad [\text{T}] \quad (\text{III.14})$$

Le nombre 2 qui se trouve au dénominateur vient du fait que le flux traversant la section droite de la culasse est la moitié du flux par pôle.

A partir du tableau de magnétisation (T-2) on lit la valeur de  $H_{\text{cs}}$  correspondante à la valeur de  $B_{\text{cs}}$  trouvée.

$h_{c1}$  : Hauteur de la culasse.

### III.1.7. Coefficient de saturation magnétique du stator $K_{sat}$

On définit le coefficient de saturation du stator par le rapport suivant :

$$K_{sat} = \frac{F_{\delta ZC}}{2F_{\delta}} \quad (III.15)$$

$F_{\delta ZC}$  : F.M.M totale dans le stator et de l'entrefer qui vaut :

$$F_{\delta} = 2F_{\delta} + 2F_z + F_{c1} \quad [A] \quad (III.16)$$

### III.1.8. F.M.M dans le pôle $F_{pm}$

#### III.1.8.1. Flux dans le pôle $\phi_{pm}$

Le flux magnétique total  $\phi_{pm}$  est la somme du flux sous un pôle et le flux de dispersion polaire  $\phi_{\Gamma}$ .

$$\phi_{pm} = \phi \cdot \Gamma_1 \quad [Wb] \quad (III.17)$$

$$\Gamma_1 = \Gamma \cdot K_{sat}$$

$\Gamma$  : coefficient préliminaire du coefficient de dispersion du pôle.

$\lambda_{pc}$  : Coefficient de conductibilité magnétique du flux de dispersion à partir des pôles :

$$\lambda_{pc} = \frac{55 \cdot h_m}{\tau - b_m - (h_m + 2h_p + 2\delta_{moy}) \cdot \frac{\pi}{2p}} \quad (III.18)$$

$\lambda_{pb}$  : Coefficient de conductibilité magnétique dans les sections droites du pôle.

$$\lambda_{pb} = \frac{37 \cdot b_m}{l_p} \quad (III.19)$$

#### III.1.8.2. Induction dans le pôle $B_{pm}$

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{pm} = \frac{\phi_{pm} \cdot 10^6}{l_p \cdot b_m \cdot K_{ferm}} \quad [T] \quad (III.20)$$

$l_p$  : Longueur de calcul du noyau du pôle.

A partir de la valeur de  $B_{pm}$  trouvée, on relève sur le tableau de magnétisation (T-3) la valeur de  $H_{pm}$  correspondante.

D'où la F.M.M dans le pôle :

$$F_{pm} = H_{pm}(h_p + h_m) \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (III.21)$$

**III.1.9. F.M.M dans la culasse du rotor  $F_{c2}$** 

- Induction dans la culasse du rotor  $B_{c2}$ :

$$B_{c2} = \frac{\phi_{pm} \cdot 10^6}{2 \cdot K_{ferm} \cdot h_{c2} \cdot L_p} \quad [T] \quad (III.22)$$

On relève du tableau de magnétisation (T-3) la valeur de  $H_{c2}$  correspondantes à celle de  $B_{c2}$  trouvée.

D'où la F.M.M dans la culasse du rotor sera donc :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3} \quad [A] \quad (III.23)$$

$L_{c2}$  : longueur moyenne des lignes de champ dans la culasse rotorique.

$$L_{c2} = \frac{\pi}{2p} (D_2 + h_{c2}) \quad [mm] \quad (III.24)$$

**III.1.10. F.M.M d'excitation à vide par paire de pole  $F_{ex}$** 

La force magnétomotrice de l'enroulement d'excitation doit composer la somme des chutes de tensions magnétiques partielles :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{ex} = F_{\delta zc} + 2F_{pm} + F_{c2} \quad [A] \quad (III.25)$$

$$F_{ex} = 2 \cdot F_{\delta} + 2F_z + 2F_{pm} + F_{c2} + F_{cs} \quad (III.26)$$

**III.1.11. F.M.M du rotor  $F_{pc}$** 

$$F_{pc} = 2 \cdot F_{pm} + F_{c2} \quad [A] \quad (III.27)$$

**III.1.12. Valeurs réduites des F.M.M et des flux**

La caractéristique à vide  $E_0 = f(F_{ex})$  et la caractéristique de magnétisation partielles sont représentées en valeurs réduites en prenant pour valeurs de base le flux nominal  $\phi_{n0}$  et la F.M.M. à vide en régime nominal  $F_{exn0}$  correspondant à la tension nominale à vide  $E = U_n$

$$F_{\delta zcr} = \frac{F_{\delta zc}}{F_{exn0}}$$

$$F_{exn0r} = \frac{F_{ex}}{F_{exn0}}$$

$$F_{pcr} = \frac{F_{pc}}{F_{exn0}}$$

$$\phi_r = \frac{\phi}{\phi_{n0}}$$

$$\varnothing_{\text{pmr}} = \frac{\varnothing_{\text{pm}}}{\varnothing_{\text{n0}}}$$

$$\varnothing_{\text{p1r}} = \frac{\varnothing_{\text{p1}}}{\varnothing_{\text{n0}}}$$

$$\varnothing_{\text{moyr}} = \frac{\varnothing_{\text{moy}}}{\varnothing_{\text{n0}}}$$

## Encoche de type 01

$\Phi, E$ [U.R]	0.5			1			1.1			1.2			1.3		
$\Phi$ [Wb]	0.0025			0.0046			0.0051			0.0055			0.0060		
E [V]	120.750			241.49			265.65			289.79			313.93		
Variables	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F
Entrefer	0.29	/	221.28	0.58	/	442.57	0.63	/	486.83	0.69	/	531.08	0.75	/	575.34
Dent du stator	0.90	286	3.57	1.80	1520	19.01	1.98	3020	37.78	2.16	7120	89.09	2.34	17200	4028.6
Dos du Stator	0.74	118	10.87	1.48	492	25.55	1.63	864	43.43	1.78	1800	84.45	1.93	4260	192.74
Pole	0.81	89	2.86	1.51	670	21.56	/	9554.8	307.56	2.90	301770	9711	3.00	362000	303430
Dos du rotor	0.78	78	3.42	1.37	270	11.48	1.60	850	37.30	2.10	60000	194.74	2.60	362000	15886
$F_{\delta Zc}$ [A]	529.01			948.73			1092.7			1433.1			1773.8		
$F_{\delta Zc}^*$	0.54			0.97			1.11			1.46			1.81		
$F_{pc}$ [A]	9.15			54.97			652.31			35310			35417		
$F_{pc}^*$	0.0094			0.056			0.66			36.13			36.24		
$F_{ex}$ [A]	572.4			977.20			1707.7			2085.7			21305		
$F_{ex}^*$	0.58			1			1.74			9.34			21.80		
$\Phi_{pm}$ [Wb]	0.0031			0.0056			0.0065			0.0085			0.010		
$\Phi_{pm}^*$	0.68			1.22			1.40			1.84			2.28		
$\Phi_{\Gamma}$ [Wb]	0.000079			0.000143			0.00016			0.00021			0.00026		
$\Phi_{\Gamma}^*$	0.017			0.031			0.035			0.047			0.058		
$\Phi_{p1}$ [Wb]	/			/			0.0065			0.0078			0.0105		
$\Phi_{p1}^*$	/			/			1.405			1.70			2.28		
$\Phi_{p2}$ [Wb]	/			/			0.0066			0.0080			0.0108		
$\Phi_{pmoy}$ [Wb]	/			/			0.0065			0.0079			0.0106		
$\Phi_{pmoy}^*$	/			/			1.42			1.72			2.31		

Tableau -I-

## Encoche de type 02

$\phi_{,E}$ [U.R]	0.5			1			1.1			1.2			1.3		
$\phi$ [Wb]	0.0025			0.0046			0.0051			0.0055			0.0060		
E [V]	120.750			241.49			265.65			289.79			313.93		
Variables	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F
Entrefer	0.29	/	228.88	0.58	/	457.77	0.63	/	503.55	0.69	/	549.19	0.75	/	594.74
Dent du stator	0.90	286	3.463	1.80	1520	18.40	1.98	2890	35.00	2.16	7120	86.23	2.34	17200	208.31
Dos du Stator	0.74	108	10.85	1.48	492	28.85	1.63	864	43.43	1.78	1800	162.15	1.93	4260	214.15
pôle	0.98	107	3.443	1.51	670	21.56	/	4987.7	160.52	/	81543	2624.3	/	302700	9741.8
Dos du rotor	1.30	200	8.77	1.41	320	14.04	1.59	1580	69.33	1.93	14800	649.47	2.51	36200	11497
$F_{\delta Zc}$ [A]	475.14			1094.6			1121.6			1356.8			1772.3		
$F_{\delta Zc}^*$	0.46			0.92			0.96			1.08			1.42		
$F_{pc}$ [A]	15.66			51.50			860.69			6398.4			20633		
$F_{pc}^*$	0.012			0.065			0.69			5.13			16.55		
$F_{ex}$ [A]	482.03			1246.2			1973.5			6611.4			21306		
$F_{ex}^*$	0.38			1			1.58			5.30			17.096		
$\Phi_{pm}$ [Wb]	0.0027			0.0064			0.0072			0.0078			0.0104		
$\Phi_{pm}^*$	0.58			1.38			1.41			1.68			2.26		
$\Phi_{\Gamma}$ [Wb]	0.000071			0.00010			0.00015			0.000206			0.000277		
$\Phi_{\Gamma}^*$	0.015			0.039			0.041			0.045			0.060		
$\Phi_{p1}$ [Wb]	/			/			0.0064			0.0083			0.0104		
$\Phi_{p1}^*$	/			/			1.39			1.80			2.26		
$\Phi_{p2}$ [Wb]	/			/			0.0066			0.0085			0.0107		
$\Phi_{pmoy}$ [Wb]	/			/			0.0065			0.0084			0.0106		
$\Phi_{pmoy}^*$	/			/			1.41			1.83			2.29		

Tableau -II-

## Encoche de type 03

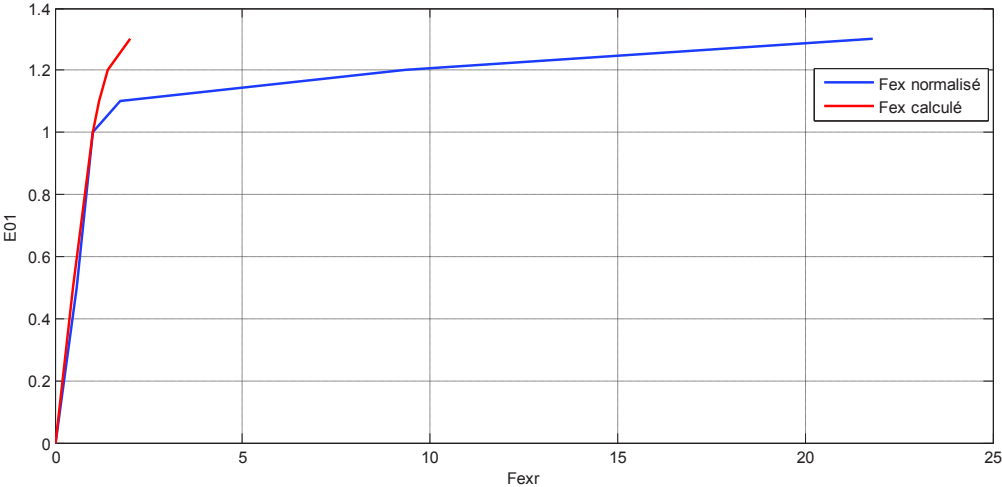
$\phi, E$ [U.R]	0.5			1			1.1			1.2			1.3		
$\phi$ [Wb]	0.0025			0.0046			0.0051			0.0055			0.0060		
E [V]	120.75			241.49			265.65			289.79			313.93		
Variables	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F
Entrefer	0.29	/	234.55	0.58	/	469.11	0.63	/	516.02	0.69	/	562.94	0.75	/	609.85
Dent du stator	0.9	286	4.39	1.8	1520	23.34	1.98	2890	44.39	2.16	7120	109.37	2.34	172000	264.21
Dos du Stator	0.74	108	9.95	1.48	492	26.38	1.63	864	41.98	1.78	1800	84.45	1.93	4260	192.74
pôle	0.78	86	2.76	1.61	1728	55.63	/	9555.3	307.52	/	25906	8337.7	/	304030	9784.4
Dos du rotor	0.67	75	3.29	1.40	300	13.16	1.61	1860	81.62	1.98	189000	829.39	2.68	362000	15886
$F_{\delta Zc}$ [A]	487.85			1011.30			1162.8			1429.1			1940.9		
$F_{\delta Zc}^*$	0.47			0.90			1.03			1.27			1.72		
$F_{pc}$ [A]	8.82			124.39			696.66			17504.0			37455		
$F_{pc}^*$	0.0087			0.12			0.62			15.59			31.58		
$F_{ex}$ [A]	493.39			1122.5			1777.9			8108			21510		
$F_{ex}^*$	0.48			1			1.58			16.12			19.16		
$\phi_{pm}$ [Wb]	0.0027			0.0056			0.0065			0.008			0.0108		
$\phi_{pm}^*$	0.59			1.22			1.41			1.73			2.35		
$\phi_{\Gamma}$ [Wb]	0.0000738			0.000153			0.000176			0.000216			0.000293		
$\phi_{\Gamma}^*$	0.016			0.033			0.038			0.047			0.063		
$\phi_{p1}$ [Wb]	/			/			0.0065			0.008			0.0108		
$\phi_{p1}^*$	/			/			1.41			1.73			2.35		
$\phi_{p2}$ [Wb]	/			/			0.0067			0.0082			0.011		
$\phi_{pmoy}$ [Wb]	/			/			0.0066			0.0081			0.011		
$\phi_{pmoy}^*$	/			/			1.43			1.75			2.38		

Tableau -III-

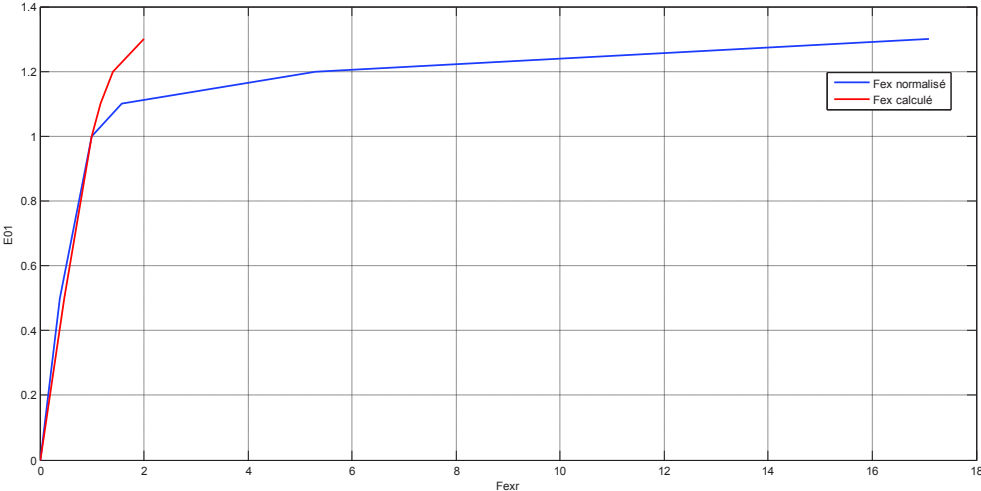
## Encoche de type 04

$\Phi, E$ [U.R]	0.5			1			1.1			1.2			1.3		
$\Phi$ [Wb]	0.0023			0.0046			0.0051			0.0055			0.60		
E [V]	120.75			241.49			265.65			289.79			313.93		
Variables	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F	B	H	F
Entrefer	0.29	/	234.55	0.58	/	469.11	0.63	/	516.02	0.69	/	562.94	0.74	/	609.85
Dent du stator	0.9	286	3.92	1.8	1520	20.84	1.98	2890	39.62	2.16	7120	97.62	2.34	17200	235.83
Dos du Stator	0.74	108	10.55	1.48	492	28.85	1.63	864	43.43	1.78	1800	84.45	1.93	4260	171.32
pôle	0.77	115	3.7	1.61	1860	59.86	/	9021	290.34	/	151050	4861.2	/	303300	9762.2
Dos du rotor	0.67	75	3.29	1.39	290	12.72	1.6	1700	74.60	1.94	156000	684.58	2.58	362000	15886
$F_{\delta Zc}$ [A]	487.81			1008.8			1154.7			1405.6			1862.7		
$F_{\delta Zc}^*$	0.43			0.89			1.02			1.24			1.65		
$F_{pc}$ [A]	10.69			132.44			655.28			10407.0			35410		
$F_{pc}^*$	0.0095			0.11			0.58			9.22			31.37		
$F_{ex}$ [A]	495.22			1128.5			1735.4			11128.0			21387		
$F_{ex}^*$	0.43			1.0			1.53			9.86			18.95		
$\Phi_{pm}$ [Wb]	0.0027			0.0056			0.0064			0.0078			0.0104		
$\Phi_{pm}^*$	0.592			1.22			1.40			1.70			2.26		
$\Phi_{\Gamma}$ [Wb]	0.0000747			0.000154			0.000176			0.000215			0.000285		
$\Phi_{\Gamma}^*$	0.016			0.033			0.038			0.046			0.062		
$\Phi_{p1}$ [Wb]	/			/			0.0064			0.0078			0.0104		
$\Phi_{p1}^*$	/			/			1.40			1.70			2.26		
$\Phi_{p2}$ [Wb]	/			/			0.0065			0.0081			0.0107		
$\Phi_{pmoy}$ [Wb]	/			/			0.0064			0.0080			0.0105		
$\Phi_{pmoy}^*$	/			/			1.42			1.72			2.29		

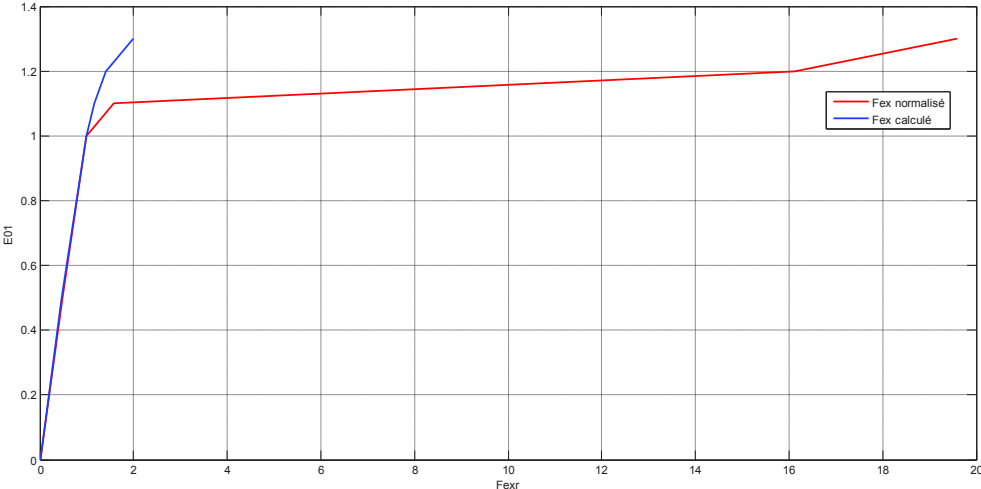
Tableau-IV-



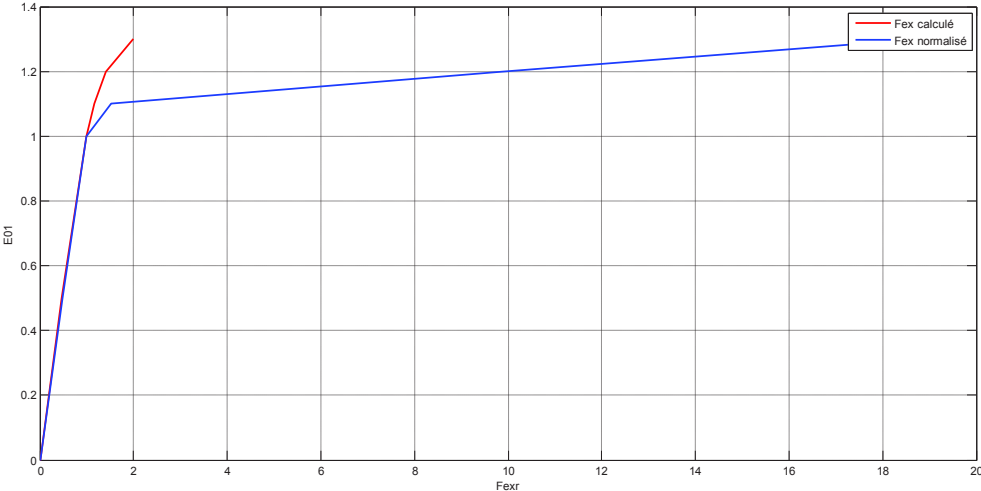
Figure(III.1) : Courbe à vide E<sub>01</sub>=f(F<sub>exr</sub>)



Figure(III.2) : Courbe à vide  $E_{01}=f(F_{exr})$



Figure(III.3) : Courbe à vide  $E_{01}=f(F_{exr})$



Figure(III.4) : Courbe à vide  $E_{01}=f(F_{exr})$

### III.2. Paramètres de l'enroulement statorique

L'enroulement statorique de la machine synchrone est caractérisé par une résistance effective  $R$ , et une réactance de fuite  $X$  liée au champ d'induction mutuelle et au champ de dispersion par le courant qui traverse l'enroulement d'induit. [12]

#### III.2.1. Résistance active par phase $R$

Elle est donnée par la relation suivante :

$$R = \rho_{cu} \frac{w_1 \cdot L_1 \text{ moy} \cdot 10^3}{a_1 \cdot \text{nel} \cdot s_1 \text{ el}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.28})$$

$\rho_{cu}$ : Résistivité du cuivre à 115°C.

$$\rho_{cu} = 244 \cdot 10^{-11} \text{ } [\Omega \cdot \text{m}]$$

$L_1 \text{ moy}$  : Longueur moyenne d'une spire.

nel: Nombre de conducteurs élémentaires.

$W_1$  : Nombre de spire mises en série dans une phase.

##### III.2.1.1. longueur moyenne d'une spire $L_1 \text{ moy}$

$$L_1 \text{ moy} = 2(L_i + L_{1f}) \text{ } [\text{mm}] \quad (\text{III.29})$$

$L_i$  : Longueur virtuelle de la machine.

$L_{1f}$  : Longueur moyenne de la partie frontale de la bobine est donnée par la formule suivante :

$$L_{1f} = (1,16 + 0,14p) \cdot b_1 \text{ moy} + 15 \text{ } [\text{mm}] \quad (\text{III.30})$$

##### III.2.1.2. largeur moyenne d'une spire $b_1 \text{ moy}$

$$b_1 \text{ moy} = T_1 \text{ moy} \cdot y_1 \text{ moy} \text{ } [\text{mm}] \quad (\text{III.31})$$

$T_1 \text{ moy}$ : Pas dentaire moyen, il est donné par la formule suivante :

$$T_1 \text{ moy} = \frac{\pi (d_{int} + h_{z_1})}{Z_1} \quad (\text{III.32})$$

$y_{1 \text{ moy}}$  : Pas moyen qui vaut :

$$y_{1 \text{ moy}} = \frac{Z_1}{2p}$$

**Remarque**

Ces formules sont établies pour un enroulement concentrique.

**III.2.2. Résistance active en unité réduite  $R_{1r}$** 

Elle donnée par la formule suivante:

$$R_{1r} = \frac{R_1 \cdot I_{1n}}{u_n} \quad [\text{U. R}]$$

**III.2.3. Vérification de  $R_{1r}$** 

Après avoir calculé la résistance de l'enroulement statorique, on la recalcule d'une autre façon ainsi nous comparons les résultats obtenus :

$$R_{1r} = \frac{\pi \cdot D_{int} \cdot A \cdot J_1 L_1 \text{moy}}{114 \cdot m_1 \cdot U_{1n} \cdot I_{1n}} \quad [\text{U. R}] \quad (\text{III.33})$$

**III.2.4. Calcule de la réactance de fuite par phase de l'enroulement statorique**

Les réactances de fuites sont dues au champ magnétique de fuite dans les différentes parties de la machine.[5]

Le champ de fuite est composé principalement de :

- Champ de fuite propre aux encoches.
- Champ de fuite des parties frontales.
- Champ de fuite des têtes de bobines.
- Champ de fuite différentiel due aux harmoniques.

**III.2.4.1. coefficient de dispersion de l'encoche  $\lambda_{en1}$** 

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

- **Cas ou l'encoche est de type trapézoïdal semi fermée à fond arrondi :**

Il est donné par la formule suivante :

$$\lambda_{en1} = K_s \left[ \frac{h_f}{b_f} + \frac{h_{k1}}{b_{en1} - b_f} \cdot \log \left[ \frac{b_{en1}}{b_f} \right] + \frac{e_1}{b_{en1}} + \frac{D_{1s}}{b_{en1}} \cdot A_1 \right] \quad (\text{III.34})$$

$K_s$ : Coefficient tenant compte du raccourcissement du pas.

$$K_s = 0,75 \cdot \beta + 0,25 \quad \text{pour } \beta \geq 0,667$$

$\beta$ : Est la valeur de raccourcissement.

Pour un enroulement concentrique (pas de raccourcissement)

$$\beta = 1 \quad K_s = 1$$

$A_1$  : coefficient tenant compte du raccourcissement, exprimé en fonction de  $K_s$  comme suit :

$$A_1 = 0,25 \cdot K_s + \frac{1}{12}$$

- **Cas ou l'encoche est de type trapézoïdal semi fermé :**

Il est donné par la formule suivante :

$$\lambda_{en1} = K_s \left[ \frac{h_f}{b_f} + \frac{h_{k1}}{b_{en1} - b_f} \cdot \text{Log} \left( \frac{b_{en1}}{b_f} \right) + \frac{2 \cdot e_1}{b_{en1} + W_{s1}} \right] + \left( \frac{D_{1s}}{W_{s1}} \right) \cdot A_1 \quad (\text{III.35})$$

Avec :  $W_{s1} = b_{en1} - 2 \cdot e_1$

- **Cas ou l'encoche est de type trapézoïdal ouverte :**

Il est donné par la formule suivante :

$$\lambda_{en1} = K_s \cdot \frac{2 \cdot e}{b_{en1} + b_f} + \frac{D_{1s}}{W_{s1}} \cdot A_1 \quad (\text{III.36})$$

- **Cas ou l'encoche est de type trapézoïdal ovale :**

Il est donné par la formule suivante :

$$\lambda_{en1} = 0,625 \cdot \frac{2 \cdot D_{1s}}{3 \cdot (b_{en1} + b_{en2})} + \frac{h_f}{b_f} \quad (\text{III.37})$$

#### III.2.4.2. Coefficient de dispersion des parties frontales $\lambda f_1$

Il est donné par la formule suivante :

$$\lambda f_1 = 0,34 \cdot \frac{q}{L_i} (L_1 f - 0,64 \beta \cdot \tau) \quad (\text{III.38})$$

$\beta = 1$  pour un enroulement concentrique (pas de raccourcissement).

$L_1 f$  : Longueur des parties frontales de la bobine.

#### III.2.4.3. Coefficient de dispersion différentiel $\lambda d1$

Il est donné par la formule suivante :

$$\lambda d1 = \frac{0,03 \cdot \tau \cdot \alpha_i}{\delta_{\text{moy}} \cdot K \delta \cdot q} \quad (\text{III.39})$$

$\delta_{\text{moy}}$ : Entrefer moyen.

#### III.2.4.4. Coefficient de dispersion des têtes des dents $\lambda_k$

Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$\lambda_k = 0,04k_k + 0,07 \cdot \sqrt{\frac{(t_1 - b_f)}{b_f}} \quad (\text{III.40})$$

La valeur de coefficient  $k_k$  est donnée par la courbe  $K_K = f(D/D_1)$

Voir figure (13).

#### III.2.4.5. Coefficient de dispersion global du stator $\lambda$

Il est donné par la formule suivante :

$$\lambda = \lambda_{df} + \lambda_{en_1} + \lambda_{f_1} + \lambda_z \quad (\text{III.41})$$

D'où la réactance de fuite du stator s'écrit :

$$\begin{aligned} X\Gamma \\ = 1,58 \left( \frac{P \cdot n}{60} \right) \cdot \frac{(W_1)^2}{p \cdot q} \cdot \text{Li} \cdot \lambda \cdot 10^{-8} \quad [\Omega] \end{aligned} \quad (\text{III.42})$$

Lors du calcul le coefficient  $\lambda_z$  a été négligée.

#### III.2.5. Réactance de fuite en unité réduite $X\Gamma_r$

$$X\Gamma_r = X\Gamma \cdot \frac{I_{1n}}{U_{1n}} \quad [\text{U. R}]$$

#### III.2.6. Vérification de la réactance de fuite en unité réduite $X\Gamma_r$

Après avoir calculé la réactance de fuite en unité réduite, on la recalcule d'une autre façon ainsi nous comparons les résultats obtenus.

$$X\Gamma = \frac{0,39 \cdot (D_{int} \cdot A)^2 \cdot \text{Li} \cdot 10^{-11}}{m_1 \cdot U_{en} \cdot Z_1 \cdot I_{1n}} \quad [\text{U. R}] \quad (\text{III.43})$$

**Résultats numériques (voir tableau –A–)**

Variables	Type d'encoches			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
$Y_{l_{moy}}$ [mm]	9	9	9	9
$t_{l_{moy}}$ [mm]	15.77	15.77	15.77	15.77
$b_{l_{moy}}$ [mm]	141.93	141.93	141.93	141.93
$l_{iv}$ [mm]	69.61	69.61	69.61	69.61
$l_{if}$ [mm]	219.37	219.37	219.37	219.37
$l_{l_{moy}}$ [mm]	624.57	624.57	624.57	624.57
$R$ [ $\Omega$ ]	2.02	1.82	2.00	2.00
$R_l$ [U.R]	0.064	0.057	0.063	0.063
$R_{lr}$ [U.R]	0.046	0.041	0.045	0.045
$\lambda_{enl}$	1.28	1.014	1.28	1.29
$\lambda_{dl}$	0.805	0.77	0.76	0.76
$\lambda_{fl}$	1.79	1.79	1.79	1.79
$\lambda_{kl}$	0.148	0.141	0.153	0.150
$\lambda$	3.609	3.73	3.99	4.00
$X_\Gamma$ [ $\Omega$ ]	1.511	1.56	1.672	1.676
$X_{\Gamma r}$ [U.R]	0.047	0.049	0.0527	0.0529
$X_{\Gamma r1}$ [U.R]	0.013	0.013	0.013	0.013

Tableau-A-

### III.3. Calcul de circuit magnétique en charge

Lorsque, on branche un récepteur aux bornes de l'induit, les trois phases de celui-ci débitent un courant triphasé de même pulsation que les f.é.m. qui les produisent, tournant au synchronisme avec le rotor et créant une F.M.M. tournante appelée F.M.M de réaction d'induit de valeur maximale. [9]

$$F_{an} = \frac{0,9 \cdot m_1 \cdot K_{en1} \cdot I_n \cdot K\phi_a \cdot W_1}{P} \quad (\text{III.44})$$

$K\phi_a$  : coefficient de forme de la réaction d'induit. On a  $K\phi_a = 1$

- Le calcul de champ produit par cette F.M.M. se trouve considérablement simplifié en utilisant la théorie des deux réactions proposées par BLONDEL, qui est la suivante :

On décompose la F.M.M. réaction d'induit en deux composantes suivant les axes principaux du circuit magnétique :

- composante longitudinale qui est confondue avec l'axe du pôle, d'une amplitude :  
 $F_{ad} = F_{an} \cdot \cos \Psi$
- composante transversale qui confondue avec l'axe interpolaire, d'une amplitude :  
 $F_{aq} = F_{an} \cdot \sin \Psi$

Cette F.M.M. de réaction magnétique d'induit agit sur la F.M.M. engendrée par l'enroulement d'excitation.

Pour déterminer la force magnétomotrice d'excitation en charge, on fait appel à la caractéristique à vide et partielles suivantes :

$$E^* = f(F_{ex}^*)$$

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

$$\phi^* = f(F_{\delta zc}^*)$$

$$\phi\Gamma^* = f(F_{\delta zc}^*)$$

Ces caractéristiques sont tracées à partir des résultats obtenus dans le calcul du circuit magnétiques à vide.

#### Remarque :

Pour des raisons de facilités, ces caractéristiques sont représentées en unité réduite.

#### III.3.1. Diagramme de BLANDEL

Ce diagramme est construit à partir des données :

$$U_{1n}^* = 1 \quad I_{1n}^* = 1 \quad X_{\delta}^* = 0.08 \quad \varphi = 36.86^\circ$$

Pour la machine à pole saillants, il est indispensable de tenir compte de l'effet de la réaction magnétique d'induit suivant l'axe longitudinal et l'axe transversal.

### III.3.2. Détermination de la f.é.m. longitudinale correspondant au régime nominal d'un alternateur qui débite sur une charge inductive mixte

Les flux résultant se décompose en deux composantes, l'une transversale  $\phi_q$  l'autre longitudinale  $\phi_l$ , ce qui nous donne :

$$\phi_t = \phi_r + \phi_f$$

$\phi_t$ : Flux total.

$\phi_r$ : Flux résultant sous un pole.

$\phi_f$ : Flux de fuite de l'enroulement statorique.

La force électromotrice induite dans cet enroulement par la variation de ce flux entraînera la création d'une f.é.m. induite dans cet enroulement, s'écrit comme suit :

$$E_{\delta d}^* = V + (R + j.X_{\delta}^*).I_{1n} + E_{aq} \quad (\text{III.45})$$

### III.3.3. Construction du diagramme de BLONDEL

La construction diagramme de BLABDEL s'effectue de la façon suivante:

- On trace un vecteur ( $\bar{V}$ ) de la tension et le vecteur ( $\bar{I}$ ) de courant avec un dépassement ( $\varphi$ ) arrière.
- A partir de l'extrémité du vecteur  $\bar{OA} = \bar{V}$ , on compose le vecteur de la chute de tension ohmique  $\bar{AB} = R\bar{I}_n$  et le vecteur de la chute de tension inductive  $\bar{BC} = j.X_{\delta}^*.\bar{I}_n$
- La résultante de ces vecteurs représente le vecteur de la f.é.m. résultante  $\bar{E}_{\delta} = \bar{OC}$  créée par le flux de l'entrefer.

Du point C on trace le vecteur  $\bar{CD} = \frac{E_{aq}}{\cos \varphi} = j.X_{aq}.\bar{I}_{1n}$  qui représente la f.é.m. de réaction magnétique d'induit. La perpendiculaire du point C sur la direction du vecteur tracé de l'origine de  $\bar{V}$  au point D représente le vecteur  $\bar{CE} = E_{aq} = j.X_{aq}\bar{I}_q$  qui représente la chute de tension due à la réaction magnétique transversale.

En traçant du point E la chute de tension due à la réaction longitudinale, on aura comme résultante en graduer et en direction le vecteur total de la f.é.m. due aux flux d'excitation  $\bar{OE} = E_{\delta d}$  par conséquent l'angle  $\Psi$  entre  $\bar{E}_{\delta d}$  et  $\bar{I}_{1n}$  est aisément déterminé.

$X_{aq}$ : Réactance de réaction d'induit suivant l'axe transversal. Une fois la valeur de  $E_{\delta r}$  est déterminée, on lit la valeur de  $F_{\delta zc}$  correspondante à la valeur  $E_{\delta}^*$ , d'où le calcul du coefficient de saturation par paire de pole.

$$K_{sat} = \frac{F_{\delta zc}^*}{2F_{\delta}^*}$$

Une fois que  $K_{sat}$  calculé, un peut lire les valeurs de  $X_q$ ,  $X_d$  et le coefficient  $K_{qd}$  qui prennent en considération en considération la saturation voir la figure (12).

La F.M.M. transversale de la réaction d'induit en prenant en considération la saturation est donnée par la relation suivante :

$$\frac{F_{aq}^*}{\cos \Psi} = X_q \cdot K_{aq} \cdot F_{anr}$$

Avec :

$F_{anr}$  : La F.M.M. du stator en unité réduite est donnée par :

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

$K_{aq}$  : Coefficient de réaction magnétique selon l'axe transversal qui est donné par le tableau T-4.

$X_q$  : Réactance inductive transversale.

Une fois que  $\frac{F_{aq}^*}{\cos \Psi}$  déterminé, on porte cette valeur sur la caractéristique  $\Phi^* = f(F_{\delta_{zc}}^*)$  afin de déterminer la valeur de  $\frac{E_{aq}^*}{\cos \Psi}$  correspondante, qu'on portera sur le diagramme de BLANDEL  $\frac{E_{aq}^*}{\cos \Psi} = \overline{CD}$ .

A partir du point C on abaisse une perpendiculaire sur le vecteur tracé de l'origine de  $\overline{V}^*$  à l'extrémité du vecteur  $\overline{CD} = \frac{E_{aq}^*}{\cos \Psi}$ , on obtient le vecteur  $E_{\delta d}^* = \overline{OE}$  auquel correspond une valeur de la F.M.M. ( $F_{\delta d}^*$ ) relevée de la caractéristique  $\Phi^* = f(F_{ex}^*)$   $F_{\delta d}^* = \overline{OF}$

On porte de puis l'origine des F.M.M. de la valeur de  $F_{\delta d}^*$  sur la caractéristique

$\Phi^* = f(F_{\delta_{zc}}^*)$ , on lit la valeur du  $\Phi_{\delta d}^*$  correspondante, puis on ajout la valeur de la F.M.M. de réaction d'induit longitudinale  $F_{ad}^*$  qui est donnée par la relation suivante :

$$F_{ad}^* = X_d \cdot K_{ad} \cdot \sin \Psi \cdot F_{an}^* + K_{qd} \cdot F_{an}^* \cdot \cos \Psi \quad (\text{III.46})$$

On aura comme résultante la F.M.M. longitudinale :

$$\overline{OG} = F_{\delta a}^* = F_{\delta d}^* + F_{ad}^* \quad (\text{III.47})$$

En portant la valeur de  $F_{\delta a}^*$  sur la caractéristique  $\Phi_{\Gamma}^* = f(F_{\delta_{zc}}^*)$ , on lit la valeur de flux de dispersion  $\Phi_{\Gamma}$  qu'on ajoute aux flux  $\Phi_{\delta d}^*$  pour avoir le flux total qui traverse les pôles et la culasse rotorique auquel correspond une F.M.M.  $F_{pc}^*$

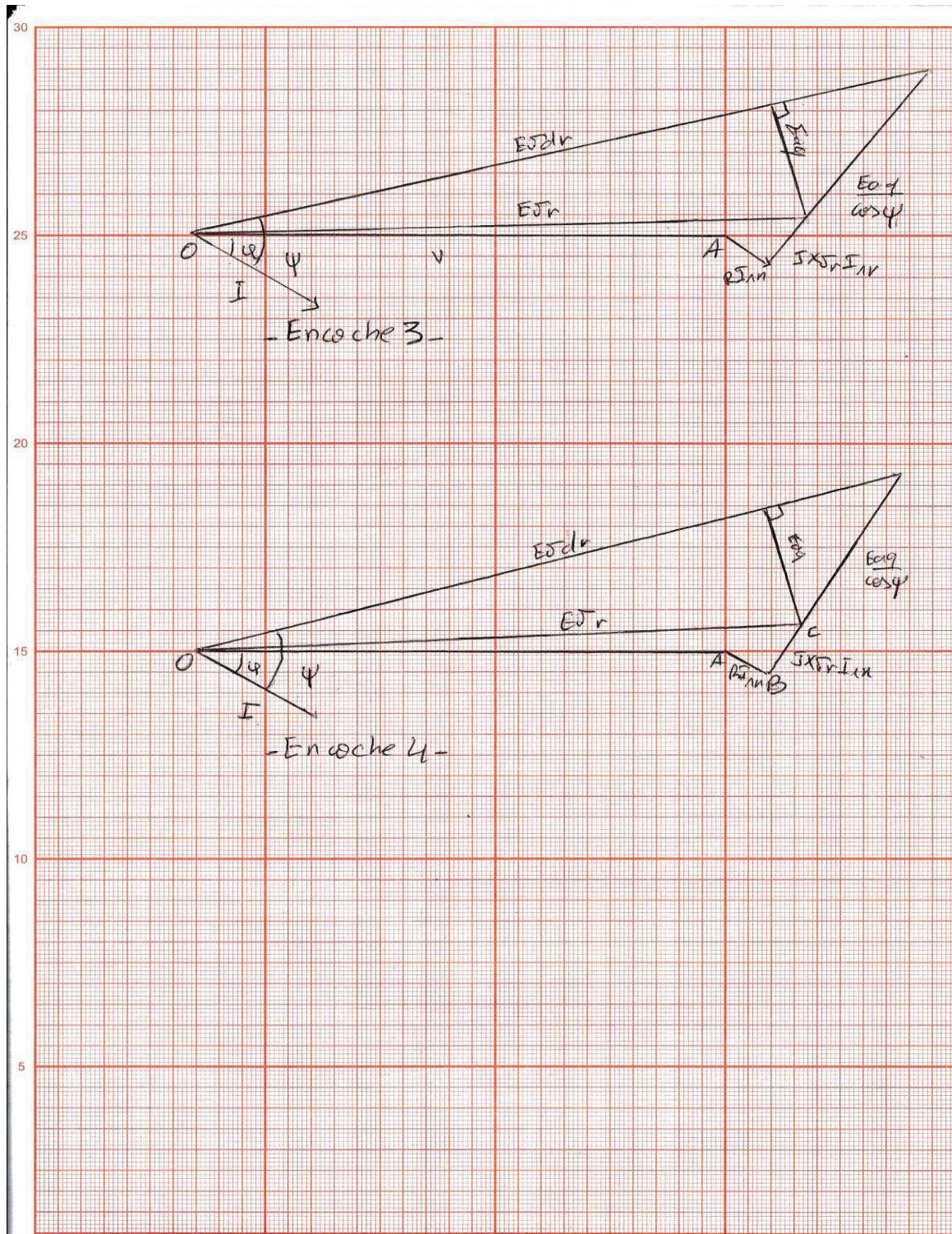
Lu sur la caractéristique  $\Phi_{pm}^* = f(F_{pc}^*)$ . [9][10]

En ajoutant le terme de la F.M.M.  $F_{pc}^* = \overline{GH}$  à la F.M.M.  $F_{\delta a}^*$ , on obtient la force magnétomotrice totale d'excitation en charge :

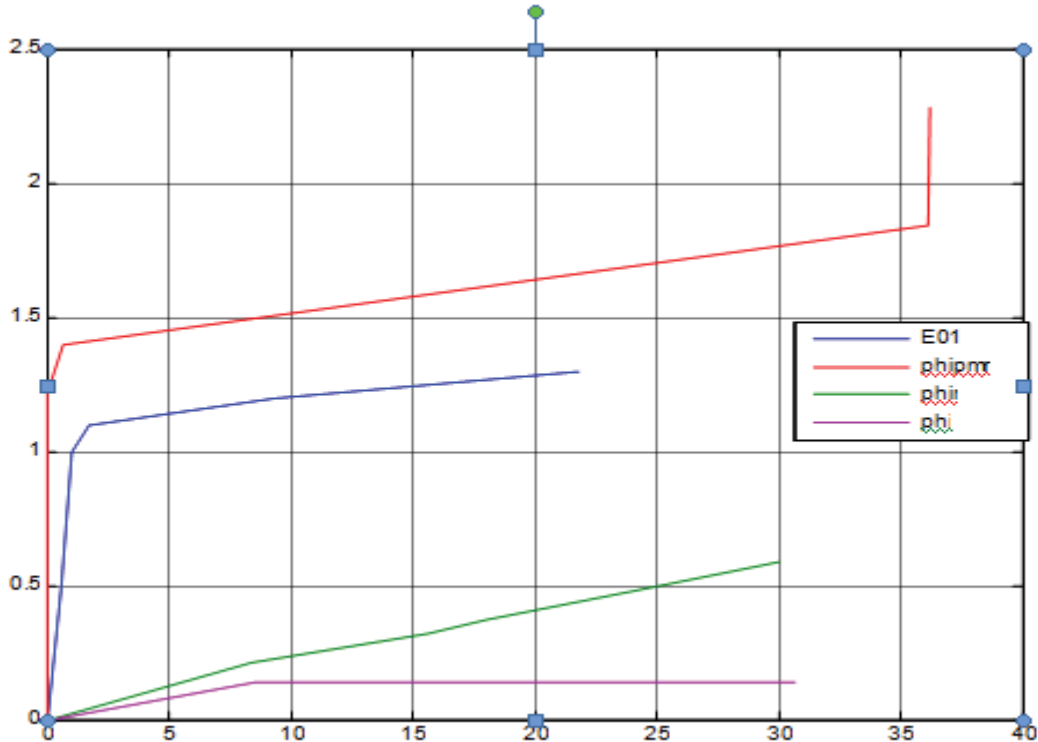
$$\begin{aligned}\overline{OH} &= F_{pn}^* = F_{\delta d}^* + F_{ad}^* + F_{ad}^* \\ F_{pn} &= F_{pn}^* \cdot F_{exno}\end{aligned}\tag{III.48}$$

**Résultats numériques (voir tableau-B-)**

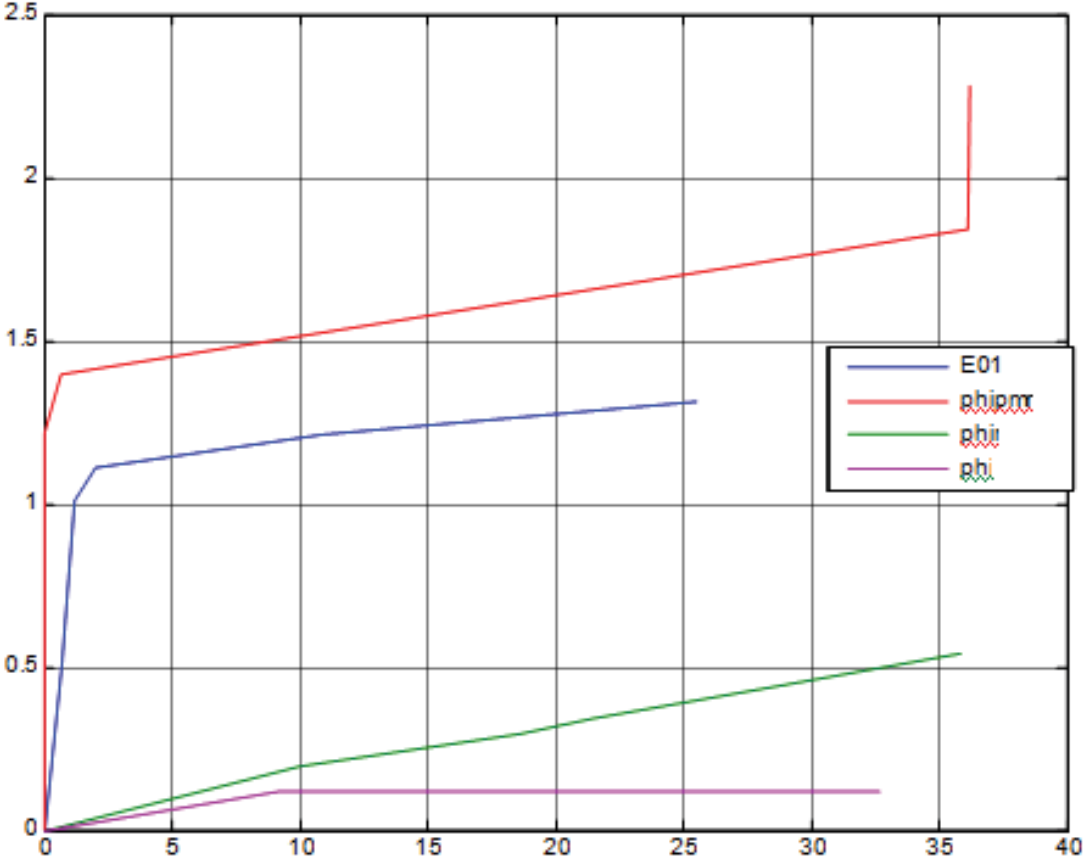




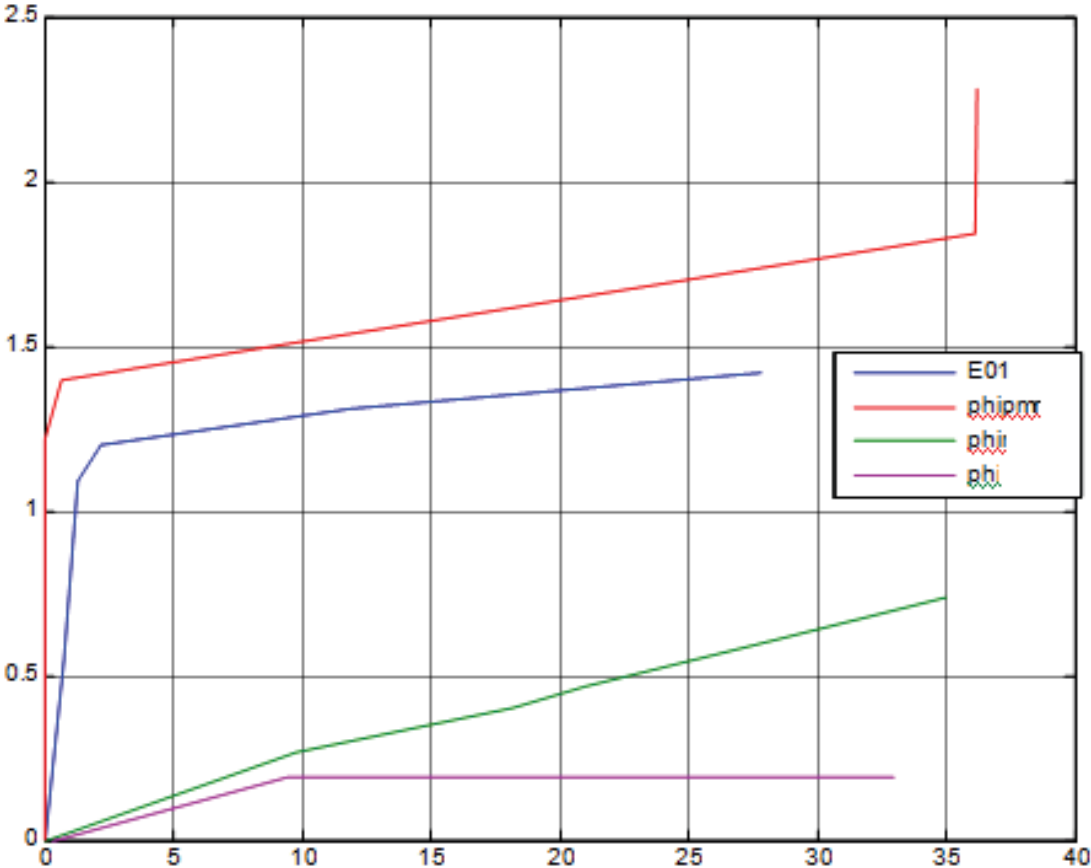
Figure(III.6) : Diagramme de Blondel



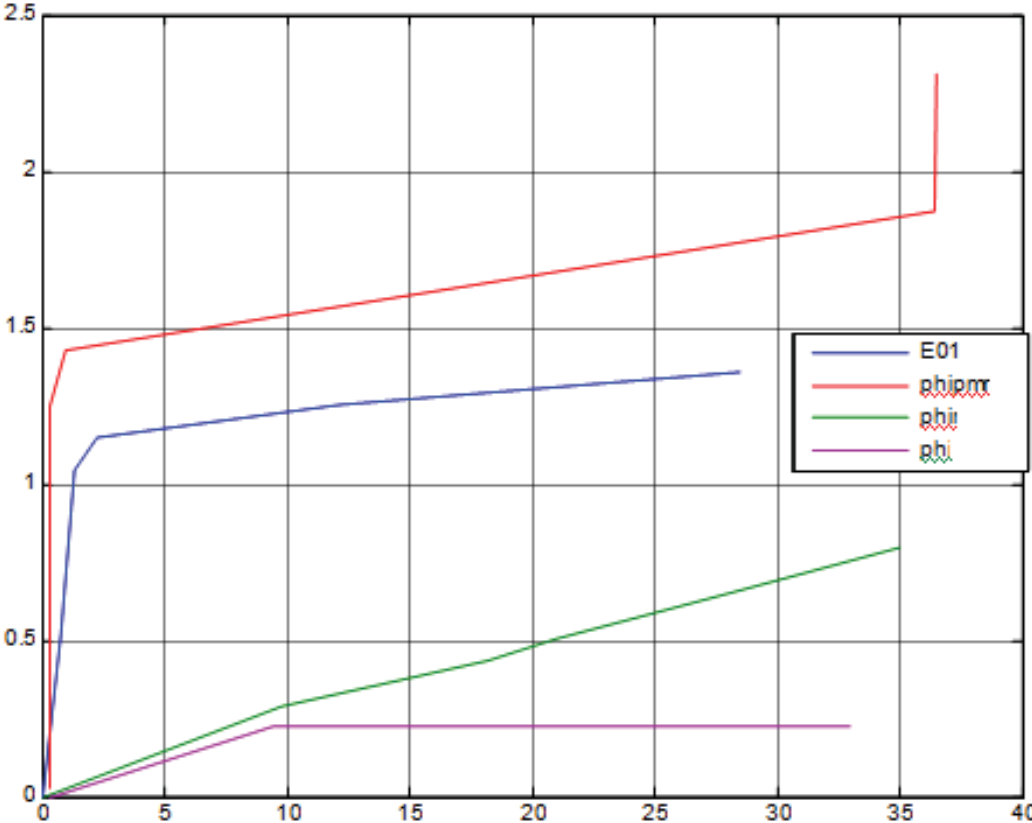
Figure(III.7) : caractéristiques partielles



Figure(III.8) : caractéristiques partielles



Figure(III.9) : caractéristiques partielles



Figure(III.10) : caractéristiques partielles

variables	Type d'encoches			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
$E_{\delta^*} [\text{U.R.}]$	1.13	1.14	1.15	1.14
$K_{\text{sat1}}$	1.26	1.051	1.052	1.055
$F_{\text{an}^*} [\text{U.R.}]$	0.87	0.69	0.77	0.76
$X_q [\Omega]$	0.82	0.83	0.85	0.85
$X_d [\Omega]$	0.87	0.96	0.96	0.96
$K_{\text{qd}}$	0.0023	0.0020	0.0020	0.0020
$K_{\text{ad}}$	0.87	0.87	0.87	0.87
$K_{\text{aq}}$	0.35	0.35	0.35	0.35
$F_{\text{aq}^*} \cos \Psi [\text{U.R.}]$	0.24	0.20	0.22	0.22
$E_{\text{aq}^*} \cos \Psi [\text{U.R.}]$	0.39	0.40	0.18	0.44
$E_{\delta d^*} [\text{U.R.}]$	1.10	1.12	1.12	1.11
$F_{\delta d^*} [\text{U.R.}]$	1.45	1.30	1.40	1.50
$F_{\text{ad}^*} [\text{U.R.}]$	0.48	0.46	0.43	0.45
$\Phi_{\delta d^*} [\text{U.R.}]$	1.3	1.29	1.19	1.26
$\Phi_{\delta^*} [\text{U.R.}]$	0.08	0.07	0.08	0.07
$F_{\text{pc}^*} [\text{U.R.}]$	0.13	0.15	0.06	0.1
$F_{\text{pn}^*} [\text{U.R.}]$	2.06	1.85	1.80	2.05
$F_{\text{pn}} [\text{A}]$	2143.23	2305.47	2520.50	2313.42
$\Psi [^\circ]$	47	48	47	48

Tableau-B-

### III.4. Dimensionnement de l'enroulement supplémentaire

L'enroulement supplémentaire est destiné à créer l'excitation dans les pôles. Il est installé dans les encoches statoriques, son pas et son nombre de phase sont les mêmes que ceux de l'enroulement de base.

Il occupe jusqu'à 20% du volume de l'encoche et assure 30% de la charge du circuit d'excitation, 70% étant assurés par l'enroulement de base. [12]

#### III.4.1. Nombre de spires de l'enroulement supplémentaire $W_{sup}$

Comme l'enroulement supplémentaire et l'enroulement de base sont logés dans les mêmes encoches, par conséquent, ils sont traversés par un même flux, d'où le rapport de transformation suivant :

$$\frac{U_1}{U_{sup}} = \frac{W_1}{W_{sup}} \Rightarrow W_{sup} = \frac{W_1 \cdot U_{sup}}{u_1} \quad [\text{spire}] \quad (\text{III.49})$$

$U_{sup}$  : Tension aux bornes de l'enroulement supplémentaire.

$U_1$  : tension composée aux bornes de l'enroulement principale.

- Nombre de conducteurs par encoche  $N_{sup}$  :

$$N_{sup} = \frac{W_{sup} \cdot a_1}{p \cdot q_1} \Rightarrow W_{sup} = N_{sup} \cdot \frac{q_1 \cdot p}{a_1} \quad (\text{III.50})$$

Avec :  $N_{sup} = 2$  conducteurs.

#### III.4.2. Tension aux bornes de l'enroulement supplémentaire $U_{sup}$

$$U_{sup} = U_{1n} \cdot K_e \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{W_{sup}}{W_1} \quad (\text{III.51})$$

#### III.4.3. Résistance de l'enroulement supplémentaire $R_{sup}$

$$R_{sup} = \frac{2 \cdot \rho_{cu} (I_p + I_{1f}) \cdot W_{sup} \cdot 10^3}{S_{sup}} \quad (\text{III.52})$$

$S_{sup}$  : Section d'un conducteur de l'enroulement supplémentaire.

$$S_{sup} = S_{1el}$$

$S_{1el}$  : section d'un conducteur de l'enroulement principal.

### III.5. Dimensionnement de l'enroulement d'excitation

La force magnétomotrice d'excitation en charge de l'alternateur étant déterminée par une construction graphique, il reste à dimensionner l'enroulement d'excitation qui puisse engendrer cette F.M.M.

Cet enroulement d'excitation est destiné à créer un champ magnétique, dont la F.M.M. d'excitation en charge doit être égale au nombre d'Ampères-tours au niveau de chaque paire de pole.[12]

$$F_{pn} = 2 \cdot W_{ex} \cdot I_{ex} \quad [A] \quad (III.53)$$

$W_{ex}$  : Nombre de spire par pole.

$I_{ex}$  : Courant d'excitation.

#### III.5.1. Longueur moyenne approximative d'une spire de l'enroulement d'excitation $L_{exmoy}$

En prenant en considération l'empilement des spires, cette longueur est donnée par la formule suivante :

$$L_{exmoy} = 2,5 \cdot (L_p + b_m) \quad [mm] \quad (III.54)$$

$b_m$  : Largeur de pole.

#### III.5.2. Section des conducteurs de l'enroulement d'excitation $S_{ex}$

$$S_{ex} = \frac{1,15 \cdot mt_2 \cdot p \cdot F_{pn} \cdot I_{exmoy}}{57 \cdot U_{ex}} \cdot 10^{-3} \quad (III.55)$$

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

$$U_{ex} = U_{sup} - U_b$$

$U_b$  : Chute de tension dans les balais. (2 Voltes)

$mt_2$  : coefficient de température.  $mt_2 = 1,2$

#### III.5.3. Nombre de spires de l'enroulement d'excitation $W_{ex}$

$$W_{ex} = \frac{1,15 \cdot F_{pn}}{J_{ex} \cdot S_{ex}} \quad (III.56)$$

$J_{ex}$  : Densité de courant de l'enroulement d'excitation, comprise entre [2,5 à 4] [ $A/mm^2$ ]

#### III.5.4. Résistance de l'enroulement d'excitation $R_{ex}$

$$R_{ex} = \frac{2 \cdot mt_2 \cdot \rho_{cu} \cdot p \cdot W_{ex} \cdot L_{exmoy}}{S_{ex}} \cdot 10^3 \quad (III.57)$$

**III.5.6. Courant d'excitation nominal en charge.  $I_{ex}$** 

$$I_{ex} = \frac{F_{pn}}{2 \cdot W_{ex}} \quad (III.58)$$

- Si  $U_{ex}$  : désigne la tension redressée fournie par l'enroulement supplémentaire, le courant maximum d'excitation sera :

$$I_{maxex} = \frac{U_{ex}}{R_{ex}}$$

- Coefficient de sécurité de l'excitation en cas de régime forcé  $k_{sex}$

$$k_{sex} = \frac{I_{maxex}}{I_{ex}}$$

**III.5.7. Puissance nominale de l'excitation  $P_{ex}$** 

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{maxex}$$

**III.5.8. Vérification de la densité de courant de l'excitation  $J'_{ex}$** 

Après le choix des sections normalisées des conducteurs de l'enroulement d'excitation, on détermine définitivement la densité du courant de l'enroulement d'excitation.

$$J'_{ex} = \frac{I_{ex}}{a_1 \cdot S_{ex}}$$

- Résultats numériques. Voir tableau-C-

variables	Type d'encoches			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
$W_{sup}$	12	12	12	12
$U_{sup}$ [V]	27.13	27.13	27.13	27.13
$R_{sup}$ [ $\Omega$ ]	0.13	0.12	0.07	0.13
$L_{exmoy}$ [mm]	335.14	339.14	335.14	335.14
$S_{ex}$ [mm <sup>2</sup> ]	1.38	1.50	1.62	1.49
$N_{el}$	1	1	2	1
$S_{exnor}$ [mm <sup>2</sup> ]	1.368	1.539	1.767	1.539
$d_{exnor}$ [mm]	1.405	1.485	1.585	1.485
$U_{ex}$ [V]	25.13	25.13	25.12	25.13
$W_{ex}$	590	586	593	583
$I_{ex}$ [A]	1.80	1.96	2.12	1.94
$R_{ex}$ [ $\Omega$ ]	16.83	15.46	14.31	15.59
$I_{exmax}$ [A]	1.49	1.62	1.75	1.61
$K_{sex}$	0.82	0.82	0.82	0.82
$P_{ex}$ [W]	37.51	40.83	44.11	40.48
$J_{ex}$ [A/mm <sup>2</sup> ]	3	3	3	3

Tableau-C-

### III.6. Calcul des paramètres de la machine

Les réactances, résistances et constantes de temps constituent les éléments essentiels qui permettent d'étudier les différents régimes de fonctionnement de la machine.[7]

#### III.6.1. Résistance de l'enroulement du stator en régime stable

##### ➤ Résistance inductive longitudinale de la réaction d'induit $X_{ad*}$ :

Elle est donnée par la forme suivante en unité réduite :

$$X_{ad*} = \frac{K_{ad} \cdot F_{an}}{K_{sat [0,5]} \cdot F_{\delta}} \quad (III.59)$$

$K_{sat [0,5]}$ : Coefficient de saturation pour  $E_r = 0,5$  [U. R]

$F_{\delta}$ : F.M.M. de l'entrefer pour un régime nominal  $E_r = 1$  [U. R]

$F_{an}$ : F.M.M. du stator.

$K_{ad}$ : Coefficient longitudinal de la réaction d'induit.

Il est donné en fonction du rapport de :

$$\frac{\delta_{max}}{\delta_{min}} \quad \text{Et} \quad \frac{\delta}{\tau} \cdot \alpha_p \quad \text{pour:} \quad \frac{\delta_{max}}{\delta_{min}} = 1,5 \quad \text{et} \quad \alpha_p = 0,7$$

D'où :  $K_{ad} = 0,87$

Voir tableau (T-4)

##### ➤ Résistance inductive transversale de réaction d'induit $X_{aq*}$ :

Elle est donnée par la forme suivante en unité réduite :

$$X_{aq*} = \frac{0,5K_{aq} \cdot (1 + K_{\delta}) \cdot F_{an}}{K_{sat [0,5]} \cdot F_{\delta}} \quad (III.60)$$

$K_{aq}$ : coefficient transversal de la réaction d'induit, donnée en fonction de :

$$\frac{\delta_{max}}{\delta_{min}} \quad \text{Et} \quad \frac{\delta}{\tau} \cdot \alpha_p$$

Pour  $\frac{\delta_{max}}{\delta_{min}} = 1,5$   $K_{aq} = 0.35$

Voir tableau (T-4)

➤ **Résistance inductive longitudinale synchrone  $X_{d*}$ :**

$$X_{d*} = X_{ad*} + X_{\delta*} \quad [\text{U. R}]$$

Réactance synchrone transversale  $X_{d*}$  :

$$X_{q*} = X_{aq*} + X_{\delta*} \quad [\text{U. R}]$$

### III.6.2. Résistance de l'enroulement d'excitation

#### III.6.2.1. Résistance active de l'enroulement d'excitation rapportée à l'enroulement du stator à la température de fonctionnement $R_{ex*}$

$$R_{ex*} = \frac{3,6 \cdot m t_2 \cdot F_{an} \cdot (K_{ad})^2 \cdot L_{exmoy}}{\phi \cdot f \cdot W_{ex} \cdot S_{ex} \cdot 10^6} \quad (\text{III.61})$$

#### III.6.2.2. Inductance de l'enroulement d'excitation $X_{ex*}$

$$X_{ex*} = 1,27 \cdot K_{ad} \cdot X_{ad*} \left( 1 + \frac{4 \cdot K_{sat[0,5]} \cdot F_{\delta} \cdot \lambda_{pd}}{\phi \cdot 10^{11}} \right) \quad (\text{III.62})$$

$\lambda_{pd}$  : Coefficient de conductibilité magnétique du flux de diversion de l'enroulement d'excitation.

$$\lambda_{pd} = \lambda_{ep} + 0,65 \cdot \lambda_{pc} + 0,38 \cdot \lambda_{pb} \quad (\text{III.63})$$

$\lambda_{ep} \cdot \lambda_{pc} \cdot \lambda_{pb}$  : Coefficients de conductibilité du flux de dispersion dans les différentes parties du pole.

#### III.6.2.3. Réactance de dispersion de l'enroulement d'excitation $X_{ex*\delta}$

$$X_{ex*\delta} = X_{ex*} - X_{ad*} \quad [\text{U. R}]$$

### III.6.3. Réactance transitoires et subtransitoires de l'enroulement du stator

#### III.6.3.1. Réactance transitoires longitudinale de l'enroulement statorique

$$X'_{d*} = X_{\delta*} + \frac{X_{ad*} \cdot X_{ex*\delta}}{X_{ad*} + X_{ex*\delta}} \quad (\text{III.64})$$

#### III.6.3.2. Réactance transitoire transversales de l'enroulement statorique

$$X'_{q} \approx X_{q*}$$

#### III.6.3.3. Réactance subtransitoire longitudinale

$$X''_{d*} \approx X'_{d*}$$

**III.6.3.4. Réactance subtransitoire transversales**

$$X''_{q*} \approx X'_{d*} \approx X_{q*}$$

**III.6.4. Valeurs minimales et maximales des réactances inductives en unité relative**

$$X_{d*} = 1,5 \div 2,9$$

$$X_{q*} = 0,60 \div 1,6$$

$$X_{d*} = 0,20 \div 0,6$$

$$X''_{d*} = 0,05 \div 0,2$$

Ces valeurs sont données pour les alternateurs synchrones sans enroulement amortisseur.

**III.6.5. Résistance pour les courants inverses et homopolaires****III.6.5.1. Réactance de l'enroulement du stator pour les courants inverses  $X_{2*}$** 

La machine fonctionne sur une faible résistance en régime équivalent au régime au court-circuit.

$$X_{2*} = \sqrt{X''_{d*} \cdot X''_{q*}} \quad (\text{III.65})$$

**III.6.5.2. Réactance de l'enroulement du stator pour les courants inverses  $X_{3*}$** 

La machine fonctionne sur une grande résistance en régime équivalent au régime à vide.

$$X_{3*} = 0,5 \cdot (X''_{d*} + X''_{q*}) \quad (\text{III.66})$$

**III.6.5.3. Résistance active d'une phase de l'enroulement statorique pour les courants homopolaire  $R_{0*}$** 

$$R_{0*} = R_{1*} \cdot m t_2 \quad (\text{III.67})$$

**III.6.6. Constantes de temps****III.6.6.1. Constantes de temps de l'enroulement d'excitation avec un enroulement statorique ouvert  $Td_0$** 

$$Td_0 = \frac{X_{ex*} \cdot 30}{\pi \cdot p \cdot n \cdot R_{ex*}} \quad (\text{III.68})$$

**III.6.6.2. Constantes de temps de l'enroulement d'excitation avec un enroulement statorique fermé  $T'_d$** 

$$T'_d = \frac{Td_0 \cdot X'_{d*}}{X_{d*}} \quad (\text{III.69})$$

**III.6.6.3. Constantes de temps de l'enroulement du stator avec un enroulement rotorique fermé  $T_a$** 

$$T_a = \frac{X_{2*}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_{1r}} \quad (\text{III.70})$$

**III.6.7. Valeurs minimales et maximales des constantes du temps**

Pour les alternateurs synchrones sans enroulement amortisseur on a :

$$Td_0 = 1 \div 10$$

$$T'_d = 1,0 \div 3,3$$

$$T_a = 0,1 \div 0,5$$

- **Résultats numériques voir tableau-D-**

variables	Type d'encoches			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
$X_{ad}^*$	1.32	4.16	1.53	1.52
$X_{aq}^*$	0.54	1.72	0.63	0.62
$X_d^*$	1.4	4.24	1.16	1.60
$X_q^*$	0.62	1.8	0.71	0.70
$R_{exr}$	0.005	0.012	0.04	0.04
$X_{exr}$	1.45	1.59	1.39	1.72
$\lambda_{pd}$	21.74	21.42	21.77	22.07
$X'_d{}^*$	0.20	0.47	0.22	0.22
$X''_d{}^*$	0.20	0.47	0.22	0.22
$X'_q{}^*$	0.62	1.8	0.71	0.70
$X''_q{}^*$	0.60	1.8	0.71	0.70
$X_2^*$	0.35	0.47	0.22	0.32
$X_3^*$	0.35	0.47	0.22	0.52
$R_0^*$	0.07	0.059	0.07	0.076
$T_{d0}$ [S]	0.92	1.16	1.25	1.25
$T_d$ [S]	0.13	0.13	0.17	0.17
$T_a$ [S]	0.01	0.02	0.01	0.011

Tableau-D-

### III.7. Calcul des pertes et du rendement de l'alternateur en régime nominal

L'énergie dissipée dans la machine sous forme de pertes classée comme suit :

- Une fraction de cette énergie sera dissipée dans la machine de pertes d'énergies par frottement des parties tournantes, appelées pertes mécaniques.
- Des pertes d'énergie dues à la circulation des courants dans les enroulements appelées, pertes électriques et des pertes provoquées par la variation périodique du flux dans les armatures magnétiques appelées pertes mécaniques. [10]

#### III.7.1. Pertes magnétiques principales

Ces pertes se produisent dans les armatures magnétiques par suite de la variation périodique du champ.

Une grande partie de ces pertes est localisée au niveau des dents et de la culasse statorique, puisque les pertes au rotor sont négligeables du fait que le flux dans celui-ci possède une fréquence de variation très faible. [10]

#### III.7.2. Pertes dans les dos du stator

Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{cl} = 4,4. B_{cs}^2 . m_{c1} \quad [W] \quad (III.71)$$

$m_{c1}$  : Masse du dos du stator qui est donnée par la relation suivante :

$$m_{c1} = \gamma_f . \pi . (D_{ext} - h_{cl}) . h_{cl} . l_i . K_{fer} . 10^{-6} \quad [kg] \quad (III.72)$$

$\gamma_f$  : Densité volumique de la tôle.

$$\gamma_f = 7.8$$

#### III.7.3. Pertes dans les dents du stator

Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{z1} = 4,4. B_{zs}^2 . m_{z1} \quad [W] \quad (III.73)$$

$m_{z1}$  : Masse des dents du stator qui dépend du type d'encoche utilisé.

- **Cas d'encoche est de type trapézoïdal semi fermée à fond arrondi :**

$$P_{z1} = 4,4. B_{zs}^2 . m_{z1} \quad [W] \quad (III.74)$$

- **Cas ou l'encoche est de type trapézoïdal semi fermé :**

$$m_{Z1} = \gamma_1 \cdot b_{z1} \cdot h_{en1} \cdot Z_1 \cdot l_i \cdot K_{fer} \cdot 10^{-6} \quad (III.75)$$

**Cas ou l'encoche est de type trapézoïdal ouverte :**

$$m_{Z1} = \gamma_1 \cdot b_{z1} \cdot h_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_i \cdot K_{fer} \cdot 10^{-6} \quad (III.76)$$

- **Cas ou l'encoche est de type trapézoïdal ovale :**

$$m_{Z1} = \gamma_1 \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot \left( D_{1s} + \left( \frac{b_{en2}}{2} \right) \right) \cdot l_i \cdot K_{fer} \cdot 10^{-6} \quad (III.77)$$

$B_{z1}$ : Induction maximale dans les dents.

#### III.7.4.Somme des pertes magnétiques principales

Elles sont données par la formule suivant :

$$P_{z1} = P_{cl} + P_m \quad [W] \quad (III.78)$$

#### III.7.5Pertes supplémentaires

Elles sont dues à une magnétisation des armatures magnétiques par le champ de fuite dans les enroulements.

**Valeur moyenne des pertes superficielles spécifiques par rapport à  $1 \text{ m}^2$  de la surface de l'épanouissement polaire :**

$$P_{sup1} = 1.8 \cdot (Z_1 \cdot n \cdot 10^{-4})^{1.5} \cdot (0.1 \cdot B_0 \cdot t_1)^2 \quad [W] \quad (III.79)$$

$B_0$  : Amplitude de l'oscillation de l'induction.

$$B_0 = \beta_0 \cdot K_\delta \cdot B_\delta \quad (III.80)$$

$\beta_0$  Dépend de la relation  $\left(\frac{b_f}{B_\delta}\right)$ . **Voir tableau T5**

**Pertes superficielles de la machine**

$$P_{sup2} = 2 \cdot p \cdot \tau \cdot \alpha \cdot P_{SUP1} \cdot k_p \cdot 10^{-6} \quad [W] \quad (III.81)$$

$$k_p = 0.6 \quad \text{Pour } \frac{S_{\max}}{S_{\min}} = 1.5$$

### III.7.6. Pertes électriques

Ce sont des pertes par effet joule dans l'enroulement. Elles sont proportionnelles au carré du courant qui traverse les conducteurs.

➤ **Pertes électriques principales dans l'enroulement statorique**

$$P_{el} = 1,38. m. (R_1 \cdot I_{ln}^2) + \left(\frac{I_{ex}}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot R_{sup} \quad [W] \quad (III.82)$$

➤ **Pertes électriques supplémentaires approximatives**

$$P_{sup} = 0,005. P_i \cdot 10^3 \quad [W] \quad (III.83)$$

➤ **Pertes d'excitations**

$$P_p = R_{ex} \cdot I_{ex}^2 + 2 \cdot U_b \cdot I_{ex} \quad [W] \quad (III.84)$$

$U_b$  : Chutes de tension dans les balais, elle est en fonction de types de balais et de la pression exercée sur eux :

Généralement on prend  $U_b = (1 \text{ à } 1.5)$

Soit  $U_b$

### III.7.7. Pertes mécaniques

Elles comportent les pertes par frottement des tourillons dans les paliers, les pertes par frottement des balais sur les bagues et les pertes par frottement lors de la rotation du rotor dans le milieu environnant, ainsi que les pertes par ventilation. [10]

➤ **Pertes par frottement et ventilation**

$$P_{ml} = 8 \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_{int}}{100}\right)^3 \quad [W] \quad (III.85)$$

➤ **Pertes dues aux frottements entre les bagues et les balais**

$$P_{m2} = 2,6 \cdot I_{ex} \cdot D_{int} \cdot n \cdot 10^{-6} \quad [W] \quad (III.86)$$

➤ **Somme des pertes mécanique**

$$P_{mec} = P_{m1} + P_{m2} \quad [W] \quad (III.87)$$

### III.7.8. Somme des pertes magnétiques totales

$$P_{fers} = P_{cl} + P_{z1} + P_{sup2} \quad [W] \quad (III.88)$$

**III.7.9. Somme des pertes**

$$P_{\text{som}} = P_{\text{fer}} + P_{\text{cl}} + P_{\text{sup}} + P_{\text{p}} + P_{\text{mec}} \quad [\text{W}] \quad (\text{III.89})$$

**III.9. Calcul du rendement  $\eta$** 

$$\eta = \left( 1 - \frac{P_{\text{som}} \cdot 10^{-3}}{P_{\text{u}} + P_{\text{som}} \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 100 \quad (\text{III.90})$$

**III.10. Calcul de la chute de tension  $\Delta u$** 

$$\Delta u = \frac{E_{10} - U_{1n}}{E_{0n}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{III.91})$$

$E_{10}$  : F.é.m. à vide relevée de la caractéristique  $E^* = f(F_{\text{ex}}^*)$

Remarque :

Avec  $I_{\text{ex}} = \text{constant}$  et  $n = \text{constant}$ , la variation de la tension  $\Delta u$  ne doit pas passer 30%.

$bf/\delta$	1	2	3	4	8
$B_0$	0.05	0.11	0.25	0.33	0.37

**Tableau-5-**

**Résultats numériques voir tableau-E-**

variables	Type d'encoches			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
$m_{c1}$ [kg]	7.75	7.75	7.75	7.75
$P_{c1}$ [W]	75.39	75.39	75.39	75.39
$m_{z1}$ [kg]	1.55	1.46	1.93	1.10
$P_{z1}$ [W]	21.55	20.86	27.57	15.73
$B_0$	0.15	0.15	0.66	0.12
$P_{sup1}$ [W]	6.25	6.25	6.25	6.25
$P_{sup2}$ [W]	0.022	0.22	0.43	0.06
$P_{el}$ [W]	439.89	397.60	435.68	435.67
$P_{sup}$ [W]	20	20	20	20
$P_p$ [W]	88.47	63.67	93.65	63.11
$P_{m1}$ [W]	80.41	80.41	80.41	80.41
$P_{m2}$ [W]	1.15	1.26	1.36	1.25
$P_{mcc}$ [W]	81.57	81.68	81.78	81.66
$P_{fers}$ [W]	96.96	109.47	102.97	91.37
$P_{som}$ [W]	796.91	709.41	659.20	691.83
$\eta$ [%]	83.2	84.6	86.1	83.5
$\Delta U$ [%]	16.41	23.10	17.60	15.32

Tableau-E-

**III.11.Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons calculé les différents paramètres de la machine synchrone pour différents types d'encoches, et l'exécution du programme informatique sur MATLAB nous a donné des résultats pour pouvoir comparer ces différents types et voir finalement leur influence sur le rendement de l'alternateur.

Le travail qui nous a été demandé étant achevé, nous pouvons conclure que nous sommes parvenus à des résultats satisfaisants du fait qu'ils répondent aux exigences économiques et industrielles ; parmi les quatre encoches, nous constatons qu'on peut diminuer le nombre de conducteurs d'un type à un autre tout en gardant les mêmes performances. Nous avons constaté aussi la facilité d'usinage de l'encoche de type (3), vue son ouverture complète et par la même occasion on obtient le meilleur rendement. Nous pouvons dire aussi que quelque soit le type d'encoches utilisé, parmi les quatre étudiés, les performances de la machine aussi construite sont très appréciables. Nous sommes très optimistes quand aux résultats des rendements obtenus et des caractéristiques de fonctionnement de la machine.

Il est à signaler que ce calcul a été réalisé sur la base d'un programme informatique élaboré à cet effet, ce qui nous a permis un gain de temps considérables dans l'exécution de ce travail et une nette optimisation des résultats.

Pour terminer, on peut ajouter que la construction est un domaine ouvert à toute amélioration et surtout à une optimisation des paramètres. Ceux-ci toujours dans le but d'obtenir le meilleur rendement et des performances souhaitées que ce soit à l'usage industriel ou électroménager.[10]

**Annexe**

S <sub>ext</sub> nr	d <sub>iso</sub>	d <sub>nu</sub>
0,883	1,14	1,06
0,985 *	1,20 *	1,12 *
1,094	1,26	1,18
1,227	1,33	1,25
1,368	1,405	1,32
1,539	1,485	1,40
1,767	1,588	1,50
2,011	1,685	1,6
2,27	1,785	1,70
2,54	1,895	1,80
2,83	1,995	1,9
3,14	2,095	2,00

Tableau de section normalisée.

$$B[T] = f(H [A/M]).$$

B[T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Tableau de magnétisation T-1.

$$B[T] = f(H [A/M]).$$

B[T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	191	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	720
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5330	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Tableau de magnétisation T-2.

$$B[T] = f(H [A/M]).$$

B[T]	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	78	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1,0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	18600	2020	2100	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11200	11800	12400
1,9	13000	13600	14200	14800	15600	15600	17300	18100	18900	19800
2,0	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2,1	60000	67000	74000	81000	88000	95000	102000	169000	116000	123000
2,2	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2,3	290000	298000	306000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

Tableau de magnétisation T-3.

$\alpha$	$\delta_{mac} / \delta_{min} = 1$			$\delta_{mac} / \delta_{min} = 1,5$			$\delta_{mac} / \delta_{min} = 2$		
	$\delta/\tau = 0$	0,01	0,03	$\delta/\tau = 0$	0,01	0,03	$\delta/\tau = 0$	0,01	0,03
Coefficient $K_{ad}$									
0,5	0,91	0,90	0,89	0,93	0,92	0,91	0,93	0,92	0,91
0,6	0,88	0,87	0,86	0,90	0,89	0,88	0,90	0,89	0,88
0,7	0,85	0,84	0,83	0,87	0,86	0,86	0,88	0,87	0,87
0,8	0,82	0,81	0,80	0,85	0,84	0,84	0,85	0,84	0,84
0,9	0,80	0,80	0,79	0,83	0,82	0,82	0,83	0,82	0,82
Coefficient $K_{aq}$									
0,5	0,2	0,27	0,35	0,18	0,25	0,34	0,17	0,23	0,33
0,6	0,29	0,35	0,42	0,25	0,32	0,40	0,22	0,30	0,38
0,7	0,39	0,44	0,51	0,35	0,40	0,48	0,31	0,37	0,44
0,8	0,50	0,55	0,61	0,45	0,50	0,56	0,40	0,45	0,51
0,9	0,64	0,68	0,71	0,56	0,62	0,63	0,50	0,53	0,57

Tableau T-4

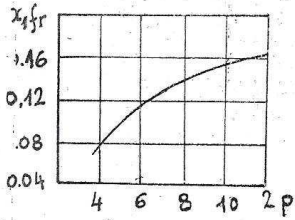


fig: 1

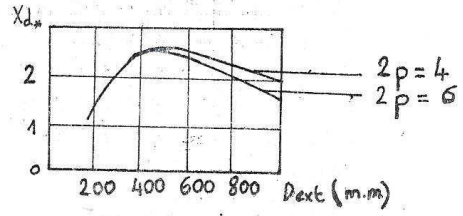


fig: 5

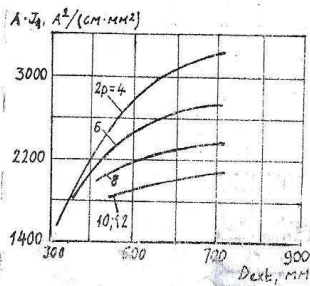


fig: 2

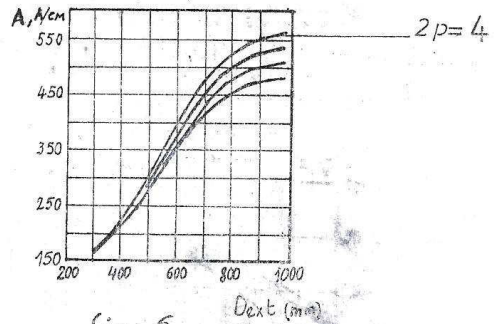


fig: 6

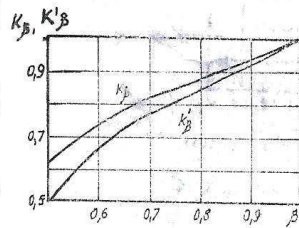


fig: 3

$K_{\beta} = f(\beta) ; K'_{\beta} = f(\beta)$

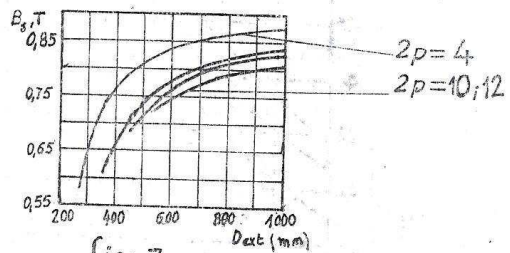


fig: 7

$B_{\beta} = f(D_{ext})$

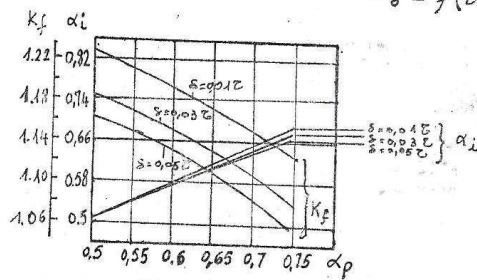


fig: 4

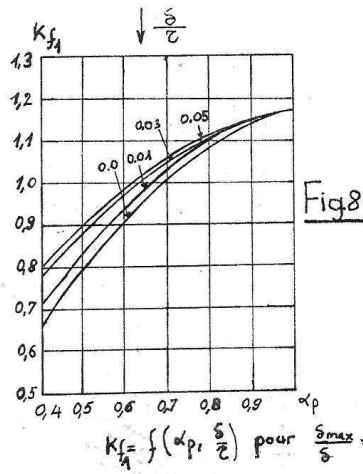


Fig. 8

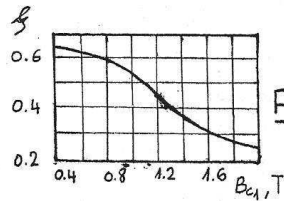
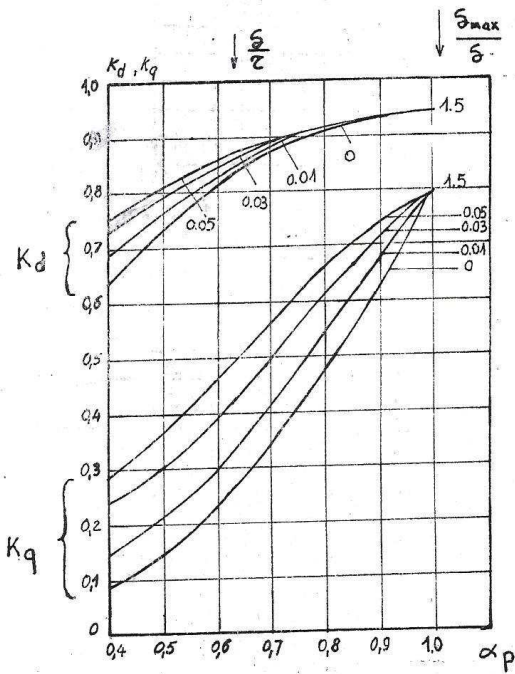


Fig. 10

$f = f(B_{ca,T})$



$K_d = f\left(\alpha_p, \frac{\delta}{c}\right); K_q = f\left(\alpha_p, \frac{\delta}{c}\right)$   
 pour  $\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1.5$

Fig. 9

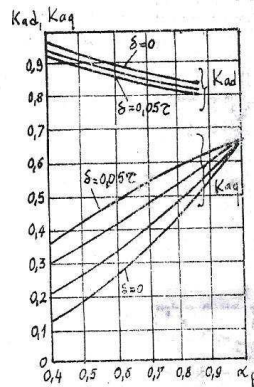


Fig. 11

$K_{ad} = f(\alpha_p)$  pour  $\frac{\delta_{max}}{\delta} = 1.5$  et  $\frac{\delta}{c} = 0 \div 0.05$

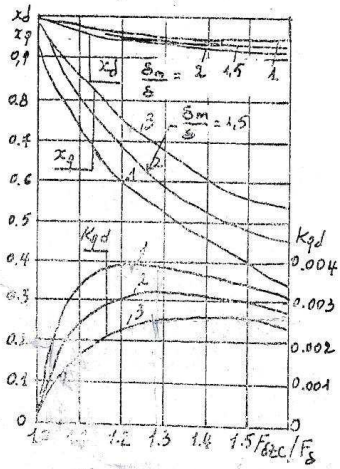


Fig 12

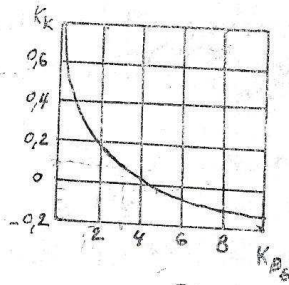


Fig 13

[1] : THESE; promotion : 2009 Université de Tizi-Ouzou.

Etude des performances d'une machine synchrone à pole lisse.

(150VA)

[2]: THESE; promotion : 2003 Université de Tizi-Ouzou.

Etude de la machine synchrone.

[3] : A.IVANOV SMOLENSKI.

Machines électriques. Volume I et Volume II.

Edition Mir Moscou. 1983.

[4]: THESE; promotion : 2008 Université de Tizi-Ouzou.

Etude d'un couplage d'alternateur au réseau électrique et essai.

[5]: A.BELOT.

Calcul des machines électriques tournantes

Ecole Supérieur d'Electricité

[6]: M.KOSTENKO et L.PIOTROVEKI.

Machines électriques. Volume II

Edition Mir Moscou. 1979.

[7]: J. L. DALMASSO. 1985.

Cours délectrotechnique.

Machines tournantes à courant alternatif.

[8]: THESE; promotion : 2012 Université de Tizi-Ouzou.

Etude et dimensionnement de machine synchrone à pole lisse et à pole saillant.

(35KVA).

[9]: K.BELHARET, THESE; promotion : 1996 Université de Tizi-Ouzou.

Optimisation du circuit magnétique d'une machine Synchrone Auto-excitée à pôle saillant.

(3KVA)

[10]: THESE; promotion : 1996 Université de Tizi-Ouzou.

Influence de type d'encoches sur le rendement d'une machine synchrone auto-excitée.

[11] : THESE; promotion : 1992 Université de Tizi-Ouzou.

Calcul de machine synchrone triphasée à entrefer excentrique auto-excitée.

(4KW, 5,5KW).

[12] : Mr SEDDIKI et Mr MOHELLBI, THESE; promotion : 1991 Université de Tizi-Ouzou.

Calcul des machines synchrone triphasées auto-excitées à pôle saillants et élaboration d'un programme informatique.