

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique
Département d'Electrotechnique



POLYCOPIE DE COURS

Unité d'enseignement : UED 3.1

Matière : Conception des Systèmes Electriques – CSE–

Destiné aux étudiants de licence S5

Dispensé par :

Mme MOHELLEBI Zehor Epouse OUDNI

Année universitaire: 2016 à ce jour

INTRODUCTION

Ce cours est destiné aux étudiants semestre 5, de troisième année licence en électrotechnique. Cette matière est dans l'unité découverte, intitulée conception des systèmes électriques (CSE), dispensé sous forme d'un seul cours par semaine.

Le nombre de crédit est de : **1**

Le coefficient : **1**

L'objectif de l'enseignement est de donner aux étudiants des notions fondamentales de conception des machines électriques, et s'intéresser par la suite à la méthodologie adoptée par les constructeurs, notamment, le calcul des parties actives du transformateur, du moteur asynchrone ainsi que du moteur à courant continu.

Le cours est structuré en trois chapitres

Le chapitre 1, est consacré au transformateur de manière générale, ensuite, on aborde la spécificité du transformateur de distribution en se rapprochant du cas pratique, construit par une entreprise locale Electro-Industries,

Un exemple de calcul d'un transformateur est réalisé, des supports, tels que des schémas de transformateurs, des bobines et connections sont joints en annexe et mis à la disposition de l'étudiant.

Le chapitre 2, aborde le moteur asynchrone à cage d'écureuil, le choix de ce moteur est pertinent, puisque le dimensionnement du stator est identique à celui de la machine synchrone, le dimensionnement de la cage d'écureuil est abordé avec les différentes formulations analytico-empiriques. Des supports en schémas sont joints en annexe, mis à la disposition des étudiants.

Le chapitre 3, est dédié à la machine à courant continu, où les différentes parties de la machine ont fait l'objet de dimensionnement, ce qui a fait aboutir au calcul des différentes forces magnétomotrices dans les différentes parties de la machine. Des supports en schémas sont joints en annexe, mis à la disposition des étudiants.

L'annexe, regroupe les différents schémas de construction du transformateur et moteurs électriques, différents types de bobinages, ainsi que des abaques permettant de lire les différents paramètres dépendants du type et puissance de la machine, et les tables de magnétisation qui nous permettent de récupérer le champ magnétique en fonction de l'induction magnétique calculée dans les différentes parties de la machine

CHAPITRE I : Le transformateur

I. Conception du transformateur	01
1.1. Définition	01
I.2. Fonctionnement d'un transformateur	01
I.2.1. Détermination du rapport de transformation	01
I.2.2. Auto régulation et rendement	02
I.2. 3.Constitution générale d'un transformateur	03
a. Les transformateurs monophasés	04
b. Les transformateurs triphasés	04
I.2.4. Les enroulements des transformateurs	04
1. Disposition des enroulements	04
2. Enroulement en galettes alternées	04
3. L'enroulement concentrique	05
3.1. L'enroulement concentrique des bobines basses tension (B.T)	05
3.2. Enroulement concentrique des bobines haute tension H.T	05
I.2.5.Les enroulements des transformateurs	05
I.2.6. Connexions et couplages entre les bobines des phases	05
I.2.7 Marche en parallèle	06
1.2.8. Caractéristiques des transformateurs pour réseaux de distribution	06
I.3. Le transformateur de distribution moyenne et basse tension M.T/B.T	07
I.3.1.Les éléments fondamentaux de conception du transformateur	07
1. La partie active	07
a. Le circuit magnétique	07
b. Les enroulements basse et haute tension	07
c. L'isolation	07
d. La commutation	08
2. La partie constructive	08
I.3.2. La protection des transformateurs	08
1. Contrôle qualité et essais électriques	09

1.1. Contrôle qualité	09
a. Contrôle qualité/Réception de marchandise	09
b. Contrôle laboratoire	09
c. Contrôle de production	10
d. Plate forme d'essais	10
1.2. Les essais électriques	10
I.4. Calcul d'un transformateur de distribution	10
I.4.1. Caractéristiques du transformateur	11
I.4.2. Calcul de la section d'un noyau	11
I.4.3. Calcul du nombre de spires par phase pour la tension primaire	11
I.4.4. Calcul du nombre de spires par phase pour la tension secondaire	12
I.4.5. Calcul de la tension entre spires	12
I.4.6. Calcul des courants dans les enroulements primaires et secondaires	12
I.4.7. Calcul de la section et du diamètre du fil des enroulements primaires et secondaires	13
I.4.8. Constitution et dimensions des enroulements	13
I.4.9. Détermination de la hauteur des noyaux magnétiques	14
I.4.10. Dimensions des fenêtres du circuit magnétique	15
I.4.11. Diamètre du circuit magnétique	15
CHAPITRE II Conception du moteur asynchrone	
II. Introduction Générale	16
II .1. Définition	17
1. Le cahier des charges	17
2. La classe d'isolation	17
3. L'indice de protection	18
4. Matériaux utilisés dans la construction	19
a. Matériaux de construction mécanique	19
b. Matériaux actifs	19
c. Matériaux isolants	20
II. 2. Dimensionnement du moteur asynchrone triphasé	20
II.2.1. Introduction	20
II.2.2. Dimensions Principales et Contraintes Electromagnétiques	20

1. Puissance Electromagnétique	20
2. La Charge Linéaire	21
3. Diamètre Intérieur du Stator	21
4. Induction dans l'Entrefer	21
5. Facteur de Bobinage	22
6. Nombre d'encoches par pôle et par phase	22
7. Nombre d'encoches statorique	22
8. Choix de l'enroulement statorique	22
9. Le pas dentaire	22
10. Courant nominal dans une phase statorique	23
11. Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche	23
12. Nombre de spires par phase	23
13. Section effective d'un conducteur	23
II.3. Dimensionnement de la feuille statorique	24
1. La largeur de la dent	25
2. Hauteur du dos du stator	25
3. Hauteur de la dent	26
4. Largeur minimale de l'encoche	26
5. Largeur maximale de l'encoche	27
6. Hauteur de l'encoche	27
7. Section occupée par les conducteurs	27
8. Coefficient de remplissage de l'encoche	28
9. Détermination de l'entrefer	28
II.4. Dimensionnement du rotor	29
1. Diamètre extérieur du rotor	29
2. Le pas dentaire	29
3. Courant dans la barre	29
II.4.1. Dimensionnement de la feuille rotorique	30
1. Hauteur de la feuille rotorique	30

2. Largeur de la dent rotorique	30
3. Hauteur de la dent rotorique	31
4. Diamètre supérieur de l'encoche rotorique :	31
5. Diamètre inférieur de l'encoche rotorique :	31
6. Hauteur de l'encoche rotorique	31
7. Section de la barre rotorique	31
8. Densité de courant dans la barre rotorique	31
II.4.2.. Dimensionnement de l'anneau rotorique	32
1. Section de l'anneau	32
2. Hauteur de l'anneau	32
3. La largeur de l'anneau	32
4. Diamètre de l'anneau	32
CHAPITRE III Dimensionnement d'une machine à courant continu	
III. Dimensionnement d'une machine à courant continu	33
III.1.Calcul des dimensions principales	33
1. Introduction	33
2. Calcul de la longueur virtuelle l_i	33
3. Diamètre extérieur de l'induit	33
4. La puissance électromagnétique	33
5. Induction magnétique dans l'entrefer	34
6. Hauteur de la culasse h_c	34
7. Détermination du nombre de lamelles	34
8. Détermination du nombre de lamelles	34
9. Calcul du courant nominal d'induit	34
10. Nombre de conducteurs dans une encoche	35
11. Calcul de la section effective d'un conducteur	35
12. Nombre total des conducteurs	36
III.2.Dimensionnement des encoches et des dents du rotor	36
1. Largeur de la dent b_{z2}	36

2. Surface totale de l'encoche	36
III.3. Dimensionnement de l'enroulement rotorique	36
III.3.1. Réalisation d'induit en Tambour	36
a. Encoches Elémentaires	36
b. La section	36
III.3.2. Classification des enroulements d'induit	37
III.4. Calcul du circuit magnétique et de la f.m.m d'excitation à vide F_0	38
III.4.1. Détermination du flux sous un pôle	38
III.4.2. Chute de tension magnétique (F.m.m) dans l'entrefer	38
III.4.3. .La chute de tension magnétique dans les dents	38
III.4.4.. Chute de tension magnétique dans la culasse du rotor (dos d'induit)	39
1. Induction dans la culasse du rotor (induit)	39
2. F.m.m dans la culasse du rotor (induit)	39
III.4.5. Chute de tension dans le pôle	39
III.4.6. Chute de tension magnétique dans la culasse du stator F_{c1}	40
1. Section droite traversée par le flux	40
2. F.m.m dans la culasse du stator F_{c1}	40
III.4.7 .Force d'excitation magnétique à vide par pôle	40

I. Conception du transformateur

1.1. Définition [1]

Les transformateurs sont des appareils statiques à induction, destinés à transformer un système de courant alternatif en un autre système de courant alternatif, d'intensité et de tension différente. Ils sont inutilisables en courant continu.

Les transformateurs dont aucun organe n'est mobile, se construisent selon leur destination, en monophasé ou en polyphasé.

1.2. Fonctionnement d'un transformateur [5], [6]

Si l'on relie le bobinage primaire d'un transformateur au réseau, il en résulte un courant alternatif qui donne naissance à un flux de même fréquence, dans le circuit magnétique. Sous l'influence de ce flux variable, une force électromotrice variable de même fréquence, va prendre naissance dans les spires du bobinage secondaire.

Remarque :

a. Dans une spire du primaire, la f.e.m induite par le flux du circuit magnétique est opposée à la tension primaire du réseau : c'est une force contre-électromotrice (f.c.e.m) .

b. Dans une spire de l'enroulement, c'est une force électromotrice, car elle s'ajoute aux f.e .m induites dans les autres spires du secondaire.

En supposant qu'il n'y ait pas de fuites magnétiques dans le fer, la tension efficace U_2 au secondaire est :

$$U_2 = \frac{\omega \phi N_2}{\sqrt{2}} [V] \quad (I.1)$$

N_2 : Nombre de spires du secondaire

ϕ : flux magnétique maximal dans le fer ,en webers [wb]

$$\omega = 2 * \pi * f, f = 50 \text{ Hz} \quad (I.2)$$

Exemple : si $f=50\text{Hz}$, $N_2=1$ (une spire), la section du fer $S= 100 \text{ cm}^2 =0.01\text{m}^2$, une induction maximale $B_{\max}=1\text{T}$.

La f.e.m produite dans une spire est :

$$\phi=B*S = 1*0.01=0.01. \phi=0.01 \text{ wb} ; E = \frac{\omega \phi N_2}{\sqrt{2}} = \frac{314*0.01*1}{\sqrt{2}} [V]=2.22[V]. E=2.22 [V]. \quad (I.3)$$

I.2.1. Détermination du rapport de transformation

Dans la théorie élémentaire du transformateur, on considère un appareil parfait, dans lequel les résistances des bobines sont nulles, les fuites magnétiques et la réluctance du circuit

magnétique sont également nulles.

Si l'on désigne par N_1 , le nombre de spires du bobinage primaire et N_2 , le nombre de spires de l'enroulement secondaire, on aura :

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2}$$

Qui donne le rapport de transformation théorique du transformateur, en considérant U_1 et U_2 des tensions respectivement du primaire et du secondaire, prises lorsque le transformateur est à vide, alors, le rapport de transformation est :

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (\text{I.4})$$

Remarque :

a. En régime à vide $\frac{U_1}{U_2}$, ne diffère pas plus de 1% du rapport de transformation théorique

b. Lorsque U_1 et U_2 sont des tensions prises en charge, le rapport de transformation $\frac{U_1}{U_2}$ surpasse de 4 à 5% le rapport $\frac{N_1}{N_2}$, il en résulte que, pour une même tension primaire U_1 , la tension secondaire U_2 , est plus faible en charge qu'à vide.

Cette chute de tension provient de la résistance ohmique des enroulements primaires et secondaires et des fuites de flux dans le circuit magnétique, lorsque la charge augmente.

1.2.2. Autorégulation et Rendement

Un transformateur est auto-régulateur à vide et en charge, ce phénomène est général, à tout instant, le flux dû au courant secondaire s'oppose aux variations du flux primaire qui donne naissance à ce courant et crée un deuxième flux dirigé en sens inverse. Ce courant est démagnétisant, il diminue l'aimantation du noyau magnétique et par suite, l'inductance propre du primaire qui soumise à la même tension, est traversée par un courant I_1 , progressivement plus important d'où :

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (\text{I.5})$$

Le rendement du transformateur est évalué à partir de la tension secondaire et la somme des pertes. Etant donné toutes les pertes du transformateur sont mesurables, on peut exprimer le rendement vrai de cet appareil comme suit :

Rendement = Puissance secondaire / (Puissance secondaire + Pertes Totales)

$$\text{Rend} = \frac{P_2}{P_1}, \text{ Avec } P_1 = (\text{Puissance secondaire} + \text{Pertes Totales}) \quad (\text{I.6})$$

La puissance active débitée au secondaire par un transformateur, dépend du facteur de puissance du circuit d'utilisation.

Les pertes dans un transformateur résultent des courants de Foucault et de l'hystérésis dans les tôles, ces pertes sont sensiblement les mêmes à vide et en charge.

Les pertes par effet joule sont proportionnelles au carré de l'intensité apparente dans chacun des enroulements.

Remarques

a. Un transformateur est dit élévateur lorsqu'il fournit au secondaire une tension plus élevée que celle qu'il reçoit au bobinage primaire, les transformateurs sont réversibles.

b. L'ensemble des bobines, inductrices et induites, enroulées sur un circuit magnétique, constitue un transformateur.

c. Le circuit inducteur s'appelle le primaire, le circuit induit le secondaire. L'enroulement qui compte le moins de spires est nommé Basse Tension, l'autre est l'enroulement Haute Tension.

d. Influence de la fréquence du réseau sur un transformateur

Un transformateur construit pour une fréquence de 25Hz peut être utilisé sans inconvénient à la fréquence de 50Hz, par contre, un transformateur construit pour fonctionner à la fréquence de 50Hz, risque de s'échauffer dangereusement sur un réseau de 25Hz.

I.2.3. Constitution générale d'un transformateur

Un transformateur comprend :

1. Un circuit magnétique fermé.

Celui-ci est constitué de tôles d'acier minces assemblées de telle sorte que les entrefers soient réduits au minimum.

2. Un enroulement primaire et un enroulement secondaire

Ces deux enroulements (sans contact électrique entre eux), sont répartis sur les noyaux du circuit magnétique. Ils ont toujours des nombres de spires différents.

3. Les accessoires, qui comprennent généralement

- La cuve en tôle mince

- le couvercle avec les bornes primaires, secondaires et neutre

- L'huile de refroidissement exemple la BORAC.

- Un conservateur d'huile et un dessiccateur d'air contenant une matière déshydratante, telle que le gel de silice. On notera que le dessiccateur est spécifique au transformateur au pyralène (type de refroidissement)

I.2.4. Constitution du circuit magnétique du transformateur

Elle diffère selon qu'il s'agit d'un transformateur monophasé (02 ou 03 colonnes), ou triphasé (03 colonnes).

a. Les transformateurs monophasés

Ils sont généralement à deux colonnes, mais ils sont à trois colonnes lorsqu'ils sont de type cuirassé et ce, pour les petits modèles, dans ces derniers le bobinage se place sur le noyau central de sorte qu'il est complètement enveloppé par le circuit magnétique, ce qui réduit au maximum les pertes de flux.

b. Les transformateurs triphasés

Ils possèdent trois colonnes qui servent de support aux trois phases du bobinage

Remarque :

Les circuits magnétiques des transformateurs sont composés de tôles électriques de faible épaisseur, à coefficient d'hystérésis réduit et à grande résistivité.

Ces tôles sont en acier doux à 4% de silicium et leur épaisseur varie de 0.35 à 5 mm, selon la destination et l'importance du transformateur.

I.2.5. Les enroulements des transformateurs

Deux types d'enroulements sont utilisés pour réaliser les bobines B.T et H.T des transformateurs, ils sont réalisés en galettes alternés ou en concentriques selon les exigences du cahier des charges.

1. Disposition des enroulements

Les deux enroulements, primaires et secondaires, sont constitués par des bobines réparties sur les noyaux, de façon que le flux qui traverse un enroulement traverse l'autre. Le sens de l'enroulement doit être le même pour toutes les bobines afin d'avoir des flux additifs dans les noyaux.

Remarque:

Les bobines basse tension et haute tension, peuvent être soit alternées, soit concentriques

2. Enroulement en galettes alternées

Ce procédé n'est utilisé qu'en basse et moyenne tension, jusqu'à 6000V pour un transformateur à refroidissement à l'air et 15000V pour le refroidissement à l'huile. Les bobines sont constituées par des galettes de fil de cuivre enrubanné pour résister à la tension de fonctionnement. Ces galettes hautes et basses tension sont alternativement disposées le long du noyau magnétique isolé par des cales. Ces bobines sont séparées entre elles par des cales (généralement en bois).

Remarque :

L'isolement entre bobines alternées peut également se faire par des disques en matière isolantes.

Dans les bobines H.T, la différence de potentiel entre deux couches superposées ne doit pas dépasser **100V** pour les transformateurs à refroidissement par air, et **150V** pour ceux qui utilisent l'huile pour le refroidissement.

L'enroulement en galettes se fait sur un tour muni d'un changement de vitesse, commandé par une pédale. Un gabaris en bois, ou en matière isolante, fixé sur le plateau du tour, sert de support au bobinage.

3. L'enroulement concentrique

3.1. L'enroulement concentrique des bobines basses tension (B.T)

Cet enroulement s'exécute en couche successives sur un mandrin en bois.

Dans les bobinages concentriques, l'enroulement B.T peut s'effectuer avec du fil rond (gros fil), ou méplat sur toute la hauteur des noyaux.

Remarque :

Quand il s'agit de fortes intensités, on est amené à adopter un enroulement à plusieurs conducteurs en parallèle .Ce procédé permet de limiter les courants de Foucault qui prendraient naissance dans des conducteurs trop importants, les couches sont séparées soit par un isolant, soit par un canal de refroidissement pour les puissances importantes.

L'enroulement B.T se place autour du noyau magnétique, isolé de celui-ci par son support en tube isolant. Dans d'autres cas la B.T est maintenue à distance du noyau par des cales ou des baguettes isolantes qui laissent circuler l'huile entre fer et bobinage.

3.2. Enroulement concentrique des bobines hautes tension H.T

Il se fait sur un cylindre isolant qui enveloppera le circuit B.T sur toute la hauteur d'un noyau. Les galettes en fil rond sont bobinées avec interposition de papier ou de toile entre couches.

La qualité de ces isolants est fonction de la différence de potentiel qui existe entre ces couches. Les galettes d'extrémités reliées au réseau, doivent avoir un isolement renforcé pour résister aux surtensions transitoires susceptibles de se produire en service.

Le réglage axial du cylindre H.T sur la B.T est obtenu au moyen de réglettes isolantes, formant des canaux qui assurent la circulation de l'air ou de l'huile de refroidissement.

1.2.6. Connexions et couplages entre les bobines des phases

L'association des trois circuits primaires et secondaires permet d'effectuer douze(12) couplages en partant des étoile-triangle et zigzag. De ces douze (12) couplages, deux (02) seulement ont été retenus pour les réseaux de distribution. Ce sont les couplages normalisés

Triangle-Etoile et Etoile-Zigzag

Le Comité Electrotechnique International (CEI) , a adopté les symboles suivant pour désigner les différents couplages :

H.T	Etoile	Y	Triangle	D ou Δ	
B.T	Etoile	y	Triangle	d	zigzag

Figure. I.1. Symboles des connexions des phases normalisées

I.2.7. Marche en parallèle des transformateurs

Pour faire fonctionner en parallèle deux transformateurs, plusieurs conditions sont nécessaires, ils doivent avoir en particulier .

- Le même rapport de transformation à vide
- Les mêmes sens de rotation des phases
- Les mêmes décalages angulaires
- Les mêmes chûtes de tension interne en marche
- Un rapport de puissance qui ne dépasse pas 2

Remarque :

La mise en parallèle s'effectue dans de bonnes conditions lorsque l'échange de courant entre les transformateurs est pratiquement nul sous tous les régimes de fonctionnement.

La mise en parallèle sur un réseau s'effectue en reliant aux mêmes fils de la ligne, les bornes homologues HT et B.T de chacun des transformateurs, mais avant de faire ces branchements, il est conseillé d'effectuer des mesures préconisées par la CEI.

I.2.8. Caractéristiques des transformateurs pour réseau de distribution

Leur choix porte en particulier sur :

- Le nombre de phases (généralement trois 03)
- La fréquence généralement 50 Hz
- La puissance Nominale en KVA
- Gamme des puissances normalisées des transformateurs
Elle est établie en fonction de leur utilisation et de la tension d'alimentation.
- La tension nominale moyenne voir tableau de gamme
- Les tensions nominales basses tensions, les tensions du secondaire seront de 400V et 230V. Si le transformateur n'a qu'une tension secondaire, celle-ci devra être de 400V selon la norme (NF C52-112).
- Les couplages normalisés $\Delta y_n 11$ (Triangle-Etoile avec neutre sorti) et $Y_{zn} 11$ (Etoile-Zigzag avec neutre sorti sur l'étoile zigzag)

Tensions Nominales du Primaire (KV)	Puissance Nominale (KVA)	
	Transformateur en cabine	Transformateur sur poteau
5.5 – 10 - 15 - 20	15 – 50 – 100 – 160 – 250- 400 630 – 800- 1000- 1250- 1600	25- 50- 100- 160
30	25- 50 – 100 – 160 – 250- 400 630 – 800- 1000- 1250- 1600	25- 50 – 100 – 160

Tableau. I.2. Gamme des puissances normalisées des transformateurs

I.3. Le transformateur de distribution moyenne et basse tension M.T/B.T [7]

I.3.1. Les éléments fondamentaux de conception du transformateur

Le transformateur est constitué de deux parties qui ont fait l'objet d'un dimensionnement très rigoureux, la partie active et la partie constructive

1. La partie active

Elle est constituée d'un circuit magnétique fermé portant deux enroulements, le primaire et le secondaire.

a. Le circuit magnétique

L'assemblage de tôles magnétique à grains orientés d'épaisseur 0.3mm, constitue les colonnes et les culasses du circuit magnétique. Ce dernier possède une structure en gradin qui lui donne une forme circulaire, dans le but de diminuer au maximum l'effet de bord, ainsi minimiser la dispersion du flux magnétique. Les pertes par inversion d'aimantation sont approximativement égales à : $P=0.97 \text{ W/Kg}$ pour une induction $B=1.5\text{T}$

b. Les enroulements basse et haute tension

Ils sont constitués de fils ronds ou rectangulaire (méplat) en cuivre.

- L'enroulement ou bobine B.T est réalisé avec du fil en cuivre méplat isolé au papier.
- L'enroulement ou bobine H.T est réalisé avec du fil en cuivre rond isolé au vernis pour le bobinage en couches et avec du fil rond en cuivre guipé (isolé au papier) pour le bobinage à galettes et méplat de cuivre pour les enroulements alternés (cas de grand ampérage)

c. L'isolation

Les isolants utilisés sont de très haute qualité, tel que le papier Presspahn et le bois comprimé. Toute trace d'humidité est éliminée du matériau isolant par un séchage au cours du processus jusqu'à l'encuvage.

d. La commutation

pour adapter le rapport de transformation aux conditions de tensions locales du réseau , l'enroulement H.T est muni d'un commutateur qui permet d'effectuer des réglages sur une plage de $\pm 2 \times 2.5\%$ ce qui donne 5 positions ou sur une plage de $\pm 5\%$ soit 3 positions de la tension nominale U_n .

Le réglage de la tension intervient quand des chûtes de tension sont signalées dans les réseaux.

Les commutateurs sont généralement montés horizontalement entre la culasse supérieure et le couvercle. Les dispositifs de réglage des commutateurs se trouvent sur le couvercle du transformateur et ne doivent être manœuvrés que lorsque le transformateur est hors tension.

2. La partie constructive

Elle est constituée de trois éléments, la cuve, le couvercle et le conservateur d'huile. Le rôle de la cuve est la protection mécanique de la partie active. Elle sert de contenant au liquide diélectrique (l'huile) et assure le refroidissement naturel du transformateur.

La construction de la cuve est étroitement liée au calcul thermique du transformateur, par sa fonction, la cuve doit présenter une grande surface d'échange de chaleur en contact avec le milieu ambiant selon les données du cahier des charges fourni. La cuve est de forme rectangulaire, constituée de quatre parois ondulées qui sont destinées à la dissipation de la chaleur.

Le couvercle sert à fermer la cuve et sert aussi de support à plusieurs accessoires qui sont les suivants :

Le conservateur d'huile, manette de commutateur, poche de thermomètre, anneaux de suspension, isolateurs et traversées et mise à la terre. Le transformateur est équipé d'un assécher d'air qui sert à absorber l'humidité de l'air dans le conservateur d'huile lors de refroidissement du transformateur.

I.3.2. La protection des transformateurs

La simplicité de la conception du transformateur ne doit pas faire oublier que celui-ci est un élément primordial dans le transport et la distribution d'énergie, c'est pour cela qu'il faut prévoir des organes de surveillance et de protection qui garantiront à l'utilisateur la meilleure sécurité au cours de l'exploitation.

La protection du transformateur se résume en trois fonctions

- Protéger le transformateur contre les perturbations extérieures, courts circuits, surtensions, surcharges
- Préserver les réseaux connectés et l'environnement des effets des défauts se produisant sur le transformateur.
- Surveiller le fonctionnement du transformateur, avertir d'une évolution dangereuse et limiter les dégâts en cas d'avaris.

Organe de protection	de fonction
Relais Buchholz	Il met hors tension le transformateur en cas de dégagement Important de gaz et le protège en cas de fuite importante d'huile
Le thermomètre	Placé dans une poche à thermomètre, muni d'une sonde pour capter le niveau de température par rapport aux températures finales admissibles par le constructeur
L'assecheur d'air	Evite la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile due à l'humidité de l'air ambiant et de la formation de l'eau de condensation dans le conservateur d'huile
Indicateur de niveau magnétique	Il indique la hauteur d'huile dans le conservateur des transformateurs
Soupape de sécurité	Elimine la surpression subite dans la cuve grâce à sa rapidité d'ouverture (quelques millisecondes)
Cornes d'éclateurs	Ils protègent contre les surtensions et peuvent provoquer le déclenchement du disjoncteur de protection par défaut à la terre

Tableau. I.3. Organes de protection des transformateurs

I.3. 3. Contrôle qualité et essais électriques[7]

A.1. Contrôle qualité

Le contrôle qualité a pour rôle de veiller sur la qualité de la matière rentant dans la fabrication du transformateur, on distingue quatre procédés de contrôle :

- Contrôle qualité/Réception de marchandise
- Contrôle du laboratoire
- Contrôle de production
- Plate forme d'essais

a. Contrôle qualité/Réception de marchandise

Les différents contrôles effectués selon les normes en vigueur CEI 76 , pour une température ambiante de fonctionnement de 40°C et une altitude inférieure ou égale à 1000 m sont :

- Contrôle dimensionnel de pièces avec les instruments de mesure nécessaires
- Dimensionnement des conducteurs de cuivre rond isolé au vernis isolé au papier (guipé) et le méplat, (diamètre, isolation, accroissement, épaisseur, largeur, chevauchement)
- Vérification de la tension de claquage pour l'huile traitée doit être ≥ 50 KV.

b. Contrôle laboratoire

Des essais sont effectués au laboratoire pour étudier les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux pour garantir la bonne qualité des produits .

c. Contrôle de production

Le contrôle en cours de production est permanent. Il se fait au niveau de la fabrication mécanique et électrique.

d. Plate forme d'essais

La conformité du transformateur est vérifiée à travers les essais effectués sur la plate forme d'essai qui répond aux exigences des normes en vigueur

1.2. Les essais électriques

Buts des essais :

- Vérifier le fonctionnement correct des transformateurs
- Vérifier leur conformité aux spécifications techniques des clients et aux normes en vigueur.

Les différents types d'essais sont :

- Essais individuels ou de routine ; à effectuer sur tous les transformateurs sans exception. Ils sont les suivants :
 - Mesure de la résistance des enroulements
 - mesure du rapport de transformation et vérification du couplage .
 - Mesure des pertes et du courant à vide
 - Mesure des pertes dans la charge et de la tension de court-circuit.
 - Epreuves diélectriques :
 - ❖ Par tension appliquée à fréquence industrielle
 - ❖ Par tension induite
- Essais de type : ils sont destinés à tester un nouveau transformateur (prototype), ce sont des essais complémentaires aux essais de routine.ils sont les suivants :
 - Essai d'échauffement.
 - Essai de tenue au choc de foudre.

I.4. Calcul d'un transformateur de distribution [6], [7]

Pour pouvoir entamer le dimensionnement d'un transformateur, il faut disposer d'un cahier des charges ou des caractéristiques provenant d'une plaque signalétique, et d'un certain nombre de paramètres relevés dans des abaques et tableaux de valeurs préconisés par les constructeurs des transformateurs , ou exigés par les normes en vigueur.

La construction d'un transformateur de distribution est réalisée selon la norme CEI76 , pour une température ambiante de 40°C et une altitude de moins de 1000 m, en dehors de ces critères, la CEI 76 , est associée aux exigences des clients, à titre d'exemple :

La société de fabrication des transformateur de distribution Electro-Industries Azazga ,Tizi-Ouzou ,Algérie , fabrique ses transformateurs selon la norme CEI 76 , normes internes et celles en vigueur du donneur de licence , associées aux spécifications de la SONELGAZ , qui est leur client.

I.4.1. Caractéristiques du transformateur

Les caractéristiques du transformateur à dimensionner sont les suivantes :

Caractéristiques du transformateur de distribution						
Puissance utile P_u (KVA)	Tension primaire U_{n1} (V)	Tension secondaire U_{n2} (V)	Montage	Rendement (%)	Induction admissible (T)	Fréquence Hz
03	220	110	Etoile	95	1	50

Tableau. I.4. Caractéristiques du transformateur de distribution

I.4.2. Calcul de la section d'un noyau

$$S_n(fer + Isolant) = c \sqrt{\frac{P_u}{3 * f}} \quad (I.7)$$

c : constante de Bichter , sa valeur est choisie dans l'intervalle donné.

$$4 < c < 5$$

On prend : **c=5.4** , d'où la section du fer avec l'isolant

$$S_n = S_n(fer+Isolant)=24.4 \text{ cm}^2$$

On adoptera : **$S_n=25 \text{ cm}^2$** , Chacun des trois noyaux aura 25 cm^2

La section nette d'un noyau représente la section du fer uniquement (sans l'isolation), elle est donnée par :

$$S'_n = K_{rem} * S_n \quad (I.8)$$

Avec $K_{rem}=0.9$, représente le coefficient de remplissage .

$$S'_n = 0.9 * 25 = 22.5 \text{ cm}^2 \quad \text{d'où} \quad S'_n = \mathbf{22.5 \text{ cm}^2}$$

I.4.3. Calcul du nombre de spires par phase pour la tension primaire

$$N_1 = \frac{U_{n1}}{\sqrt{3} * 4.44 * B * S'_n * f} \quad (I.9)$$

$N_1=254$ Spires.

I.4.4. Calcul de la tension entre spires

$$U_s = \frac{U_{n1}}{\sqrt{3} * N_1} \quad (\text{I.10})$$

$$U_s = 0.51 \text{ V.}$$

I.4.5. Calcul des courants dans les enroulements primaires et secondaires

a. Dans le primaire :

$$I_1 = \frac{P_u}{\sqrt{3} * U_1 * \eta} \quad (\text{I.11})$$

$$I_1 = 8.29 \text{ [A]}$$

b. Dans le secondaire

$$I_2 = \frac{P_u}{\sqrt{3} * U_2} \quad (\text{I.12})$$

$$I_2 = 15.76 \text{ [A]}$$

I.4.6. Calcul du nombre de spires par phase pour la tension secondaire

On admet une chute de tension , uniquement dans l'enroulement secondaire, elle vaut 5.4% de la tension U_2 . Soit :

$$(5.4 * 110) / 100 = 5.94 \text{ [V]} ;$$

$$\text{On adoptera : } \Delta U_2 = 6 \text{ [V]}$$

Dans ces conditions , la tension à vide du secondaire devra être de :

$$U_{2v} = 110 + 6 = 116 \text{ V} ; \quad U_{2v} = 116 \text{ [V]} .$$

Ce qui donne un rapport de transformation à vide de :

$$\alpha = \frac{U_{1\text{reseau}}}{U_{2v}} \quad (\text{I.13})$$

$$U_{1\text{reseau}} = U_1$$

Soit : $\alpha = 1.896$, on adoptera : $\alpha = 1.90$.

On a également :

$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} \quad (\text{I.14})$$

Donc :

$$N_2 = \frac{N_1}{\alpha} \quad (\text{I.15})$$

Ou encore :

Soit:

$$N_2 = \frac{N_1}{U_1} * U_{2v} \quad (\text{I.16})$$

$N_2=132$ spires.

I.4.7. Calcul de la section et du diamètre du fil des enroulements primaires et secondaires

1. Pour le circuit primaire

La densité de courant du fil de cuivre utilisé est donnée :

$$J= 2.2 \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

La section est donnée par :

$$S_p = \frac{I_1}{J}$$

$$S_p= 8.29/2.2, \text{ soit : } S_p=3.77 \text{ mm}^2$$

Le diamètre du fil de cuivre normalisé est :

- Pour une isolation avec deux couches
d_{iso2}=2.47 mm²
- Pour une isolation avec une seule couche
d_{iso1}=2.36 mm²

2. Pour le circuit secondaire

La section du fil de cuivre est :

$$S_s = \frac{I_2}{J} \quad (\text{I.17})$$

$$S_s=7.16 \text{ mm}^2$$

Le diamètre du fil de cuivre normalisé :

- Avec deux couches : **d_{iso2}=3.31 mm²**
- Avec une seule couche : **d_{iso1}=3.20 mm²**

I.4.8. Constitution et dimensions des enroulements

Etant donné les indications obtenus jusqu'ici, en considérant la bobine est à 3 couches de spires , on aura :

- Pour le primaire

01 couche à 84 spires et deux couches à 83 spires.

La longueur de la bobine sera donc : $l_{b1} = d_{1iso2} * 84$

soit : $l_{b1} = 207.48 \text{ mm}$

La longueur normalisée est : $l_{b1} = 210 \text{ mm}$

➤ Pour le secondaire

En considérant la bobine est à deux couches, on aura :

$132/2 = 66$ spires par couche et la longueur de la bobine sera :

$l_{b2} = d_{2iso2} * 66$; d'où $l_{b1} = 220 \text{ mm}$

Conclusion

Le circuit secondaire ayant la plus grande longueur pour son bobinage. On enroulera toutes les bobines sur 220mm de long.

Le secondaire nécessitera deux couches de 66 spires.

Le circuit primaire, qui comprend 254 spires avec $d_{1iso2} = 2.47 \text{ mm}$, logera une couche de $(220/2.47)$, soit :

- Pour la première couche **89** spires
- Deux couches nécessiteront $89 * 2 = 178$ spires
- la troisième couche comprendra : $(254 - 178) = 76$ spires.

Le vide laissé par une longueur de 13 spires $(89 - 76)$, sera comblé par une bande de presspahn, enroulé sur la troisième couche.

I.4.9. Détermination de la hauteur des noyaux magnétiques

Connaissant la longueur des bobines, il est possible de déterminer la hauteur des noyaux qui, dans la pratique, varie de 3 à 5 fois de la longueur d'un noyau.

Les bobines ayant 220 mm de long (Secondaire) , il faut encore tenir compte d'un certain jeu global et de l'isolement à la masse, sont :

Dimensions	[mm]	Total [mm]
Jeu supérieur	04	18
Joues des bobines	06	
Jeu intérieur	04	
Foisonnement	04	

Tableau. I.5. Dimensions supplémentaires correctives

Après la détermination de ces dimensions, on peut évaluer la hauteur des noyaux qui vaut $h_{noyau} = 220 + 18 = 238 \text{ mm}$

$h_{\text{noyau}} = 238 \text{ mm}$

I.4.10. Dimensions des fenêtres du circuit magnétique [6]

L'enroulement pris par une demi bobine comprend, dans l'ordre, en partant du noyau vers l'extérieur de la bobine .

Dimensions	[mm]
Un intervalle entre le noyau et le cylindre de la bobine	14.00
L'épaisseur de l'isolation du cylindre (support du secondaire)	3 .00
Deux couches de fil de cuivre de 3.11mm de diamètre	6.60
L'épaisseur de l'isolation du cylindre (support du primaire)	3.00
Trois couches de fil de cuivre de 2.47mm de diamètre	7.40
Le dépassement des joues de bobines	5.00
Le ½ jeu entre deux joues de bobines	3.00
Un enroulement global \Longrightarrow TOTAL	42

Tableau. I.6. Dimension globale d'un enroulement

I.4.11. Diamètre du circuit magnétique

Dimensions du circuit magnétique	
Dimensions des noyaux	50 [mm ²]
Dimensions des culasses	50 [mm ²]
Hauteur des noyaux	$H_{\text{noy}} = 238$ [mm]
Hauteur du circuit magnétique	$H_{\text{CM}} = 238 + 50 + 50 = 338$ [mm]
Largeur du circuit magnétique	$L_{\text{CM}} = (3 * 50) + (2 * 84) = 328$

Tableau. I.7. Dimension globale du circuit magnétique du transformateur

Les parties essentielles du transformateur étant calculées, nous pourrions procéder au montage de celui-ci à l'aide des différents accessoires et schémas de montage.

II. Introduction générale

Les machines à courant alternatif sont reliées directement au réseau de distribution soit en monophasé soit en triphasé. Pour les applications de faible et moyenne puissance le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de fortes puissances, les moteurs alternatifs sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalés de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité. Ces moteurs alternatifs se déclinent en trois types

- Les moteurs universels; asynchrones et synchrones.

Ces deux dernières machines ne diffèrent que par leurs rotors. Inventée par Tesla, la machine asynchrone (ou machine à induction), est la machine électrique la plus répandue, car c'est actuellement celle qui offre le meilleur rapport qualité prix.

La machine asynchrone, connue également sous le terme « anglo-saxon » de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Les machines possédant un rotor « en cage d'écureuil » sont aussi connues sous le nom de machines à cage d'écureuil. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas toujours synchronisée à la fréquence des courants qui les traversent.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. La machine asynchrone est utilisée aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires, automobiles électriques), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.

On distingue plusieurs types de moteurs asynchrones Monophasés; triphasés à cage; triphasés à rotor bobiné. Pour fonctionner en courant monophasé, les machines asynchrones nécessitent un système de démarrage entre autre associer un condensateur permanent ou de démarrage parfois les deux et pour les grands moteurs on les construit avec une double cage d'écureuil, l'une pour le démarrage et l'autre pour le maintien du fonctionnement.

II.1. Définition

Pour la conception (construction) des machines électriques , il faut définir certaines caractéristiques de base qui permettent d'entamer le dimensionnement des différentes parties de la machine électrique quelle soit tournante ou statique . Concernant les machines tournantes les caractéristiques les plus importantes sont présentées sous forme de cahier des charges

1. Cahier des charges [2] [5]

Il est constitué de onze caractéristiques essentielles qui sont :

1. Le type de machine (Synchrone, Asynchrone, à Courant Continu, à Réductance)
2. Le mode de construction (- Machines à flux Axial, -Machines à flux Radial)
3. La puissance de la machine
 - Pour les moteurs électriques, la puissance Nominale sur l'arbre est donnée.
 - Pour les Générateurs Asynchrones et à Courant Continu , la puissance débitée en (Watt) est donnée.
 - Pour un Alternateur, la puissance apparente S_n en (V.A) est donnée.
4. La vitesse de la machine
5. Le nombre de paire de pôles (p).
6. La fréquence de travail (f).
7. Tension Nominale (U_n).
8. Nombre de phases (m).
9. Régime de fonctionnement (Continu ou Intermittent).
10. Classe d'Isolation de la machine.
11. Indice de Protection (Degré de Protection).

2..Classe d'Isolation

La classe d'isolation nous renseigne sur la température maximale que doivent supporter les matériaux conducteurs et les isolations, pour éviter l'échauffement, voir, l'endommagement du circuit magnétique de la machine ou l'ensemble. Le tableau ci-après représente les différentes classes d'isolation utilisées dans la construction des machines électriques.

Classe d'Isolation	Température maximale Admissible °C
E	120
B	130
F	155
H	180

Tableau II.1. Classe d'isolation

3. L'indice de Protection

Cette caractéristique est spécifique aux carcasses des machines électriques tournantes, l'indice de protection est caractérisé par les deux lettres suivi de deux chiffres, le premier concerne la protection contre les liquides et le deuxième concerne la protection contre les objets solides « IPxy ». Le tableau suivant donne les détails de cette caractéristique.

IP	1 ^{ier} CHIFFRE	IP	2 ^{ième} CHIFFRE
0	Pas de protection	0	Pas de protection
1	Protège contre les corps solides dont le diamètre est supérieur à 50mm	1	Protège contre les chûtes verticales de gouttes d'eau
2	Protège contre les corps solides dont le diamètre est supérieur à 12 mm	2	Protège contre l'eau de pluie jusqu'à 15% de la verticale
3	Protège contre les corps solides dont le diamètre est supérieur à 2.5 mm	3	Protège contre l'eau de pluie jusqu'à 60% de la verticale
4	Protège contre les corps solides dont le diamètre est supérieur à 1 mm	4	Protège contre les projections d'eau de toutes les directions
5	Protège contre les poussières	5	Protège contre les projections d'eau de toutes les directions à la lance
		6	Protège contre les projections d'eau assimilables aux paquets de mer
		7	Protège contre les effets de l'immersion entre 0.15 et 1m
		8	Protège contre les effets de l'immersion sous pression

Tableau. II.2. indices de protection

Exemple : cas d'une machine IP55

IP : Indice de protection

5 : Machine protégée contre les poussières et contre les projections d'eau dans toutes les directions provenant d'une lance de débit 12.5l/min sous 0.3bar à une distance de 3m de la machine.

4. Matériaux utilisés dans la construction

On distingue trois catégories matériaux utilisés pour la construction des machines électriques.

a. Matériaux de Construction Mécaniques

b. Matériaux actifs (Magnétiques et Conducteurs d'électricité).

c. Matériaux Isolants.

a. Matériaux de Construction Mécaniques

Ce sont les matériaux utilisés pour la fabrication des pièces destinées à transmettre et recevoir des charges mécaniques et à donner à certains éléments les formes requises pour que la machine fonctionne normalement.

Exemple : - La fonte ordinaire

- L'Acier au carbone

- les matières plastiques

b. Matériaux Actifs

b.1. Matériaux conducteurs

Le conducteur le plus utilisé en électrotechnique est le cuivre, néanmoins , on retrouve l'aluminium dans certaines machines, comme les barres rotoriques des machines asynchrones à cage d'écureuil.

b.2. Matériaux magnétiques

Pour la fabrication du circuit magnétique d'une machine électrique, on utilise de l'acier magnétique appelé aussi tôle magnétique.

Il existe deux types de tôle magnétique

1. Tôle à grains non orientés utilisés pour les machines électriques tournantes

2. Tôle à grains orientés, ce type de tôle a subi un traitement lors du laminage à froid, permettant ainsi une orientation de la structure du métal dans le même sens que le laminage, direction de facile aimantation donc la direction du laminage. Cette tôle est utilisée pour la construction du circuit magnétique du transformateur

c. Matériaux Isolants

Ces isolants sont utilisés dans les pièces actives des machines électriques. Ainsi, les matériaux utilisés doivent avoir une bonne rigidité diélectrique, et une bonne tenue à la chaleur.

Exemples d'Isolants : Mica, Céramique, Verre, Vernis, Papier Presspahn

II. 2.Dimensionnement du moteur asynchrone triphasé [2] [5] [7]

II.2.1. Introduction

La conception du moteur asynchrone triphasés, passe nécessairement par le dimensionnement du stator et du rotor, celui-ci est basé sur des formulations analytiques et empiriques associés à des données et abaques fournis par les constructeurs des machines électriques ainsi que le Comité International d'Electrotechnique CEI. La norme qui régit la construction des machines électriques tournantes est la CEI34, par contre pour les transformateurs de distribution de l'énergie électrique est la CEI76.

II.2.2. Dimensions Principales et Contraintes Electromagnétiques

Tout calcul d'un moteur électrique commence par le choix des dimensions principales et des matériaux de ses parties actives et constructives, les dimensions principales sont données

- Le diamètre intérieur du stator D_1 .
- La longueur virtuelle de l'armature magnétique.

1. Puissance Electromagnétique

Lors du fonctionnement d'un moteur asynchrone, il y a transmission d'énergie du stator vers le rotor sous forme d'un champ tournant à travers l'entrefer.

Ce transfert d'énergie a un rapport direct avec les forces électromagnétique développées dans le rotor engendrant un couple moteur qui représente le couple électromagnétique du moteur d'où la puissance électromagnétique donnée comme suit :

$$P_i = m_1 * E_n * I_n \quad (\text{II.1})$$

$$P_i = m_1 * K_e * U_n * I_n [W] \quad (\text{II.2})$$

$$P_i = K_e * S_n \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Avec : } K_e = \frac{E_n}{U_n} \quad K_e = 0,9 \div 0,98 \quad (\text{II.4})$$

P_i : Puissance électromagnétique [KW]

U_n : tension nominale [V]

m_1 : nombre de phases du stator.

E_n : force électromotrices [V].

I_n : courant de phase [A].

S_n : puissance apparent [V.A].

η : rendement du moteur [%]

$\cos\phi$: facteur de puissance.

2. La Charge Linéaire

C'est le courant total de la partie d'encoche par unité de longueur du périmètre de l'induit. D'autre part on peut considérer que cette charge représente le courant circulant dans un conducteur fictif. Elle caractérise l'utilisation électrique du moteur, ce qui nous incite à choisir des valeurs aussi grandes que possible, pour éviter l'augmentation de :

- la densité de courant [J], c'est-à-dire des pertes Joule et des échauffements
- de la profondeur des encoches, c'est-à-dire une augmentation des dimensions d'où un coût élevé ou de l'induction ce qui augmentera les pertes fer et les échauffements.

$$A = \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1} \quad (\text{II.5})$$

I_1 : Courant statorique

A : Charge linéaire en [A/mm]

D_1 : le diamètre intérieur du stator;

W_1 : nombre de spires de l'enroulement statorique d'une phase.

3. Diamètre Intérieur du Stator

Le diamètre intérieur du stator est donné en fonction du diamètre extérieur pour différentes valeurs du nombre de pôles par le tableau suivant :

2p	2	4	6
D_1 [mm]	$0.61 D_{\text{ext}} - 4$	$0.68 D_{\text{ext}} - 5$	$0.72 D_{\text{ext}} - 3$

Tableau.II.3. Diamètre intérieur du stator

4. Induction dans l'Entrefer

L'induction B_δ dans l'entrefer est l'une des grandeurs les plus importantes dans le dimensionnement des machines électrique.

Elle caractérise l'utilisation magnétique de la machine, il est indiqué de prendre les valeurs les plus élevées possible de B_δ . Toutefois, afin d'éviter la saturation du fer magnétique, dans certains cas particuliers on peut atteindre des valeurs de B_δ allant jusqu'à 1,3T.

Son expression est telle que :

$$B_\delta = \frac{6,11 \cdot P_1 \cdot 10^{12}}{\alpha_1 \cdot K_f \cdot K_{\text{enr1}} \cdot D_1^2 \cdot A_1 \cdot L_i \cdot N_1} \quad [\text{T}] \quad (\text{II.6})$$

5. Facteur de Bobinage

Le facteur de bobinage est défini comme étant le produit des trois facteurs suivant :

Facteur de distribution K_{d1} ; Facteur de raccourcissement K_{r1} ; Facteur d'obliquité K_{ob} .

$$K_{enr1} = K_{d1} * K_{r1} * K_{ob} \quad (II.7)$$

d'où
$$K_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{q1 * \sin\left(\frac{\theta}{2} * q1\right)}$$

Avec:
$$\theta = 2 * \pi * q1 * p / Z1$$

$q1$: nombre d'encoches par pôles et par phases

$Z1$: nombre d'encoches statorique

θ : angle électrique entre deux encoches consécutives

K_{r1} : facteur de raccourcissement pour le fondamental, il est donné par :

$$K_{r1} = \sin\left(\beta * \frac{\pi}{2}\right)$$

Avec:
$$\beta = \frac{y1}{\tau}$$

β : le pas relatif

$y1$: le pas de l'enroulement

τ : le pas polaire.

Pour l'enroulement de type concentrique, il y a pas de raccourcissement

$\beta = 1$ (car $\tau = y1$) d'où $K_{r1} = 1$.

6. Nombre d'encoches par pôle et par phase

Le nombre d'encoches par pôle et par phase $q1$ du stator doit être dans tous les cas supérieur à 2, afin de réduire les effets dû aux harmoniques d'ordre supérieures.

7. Nombre d'encoches statorique

Son calcul se fait à l'aide de l'expression suivante :

$$Z1 = 2 * m1 * p1 * q1. \quad (II.8)$$

8. Choix de l'enroulement statorique

L'enroulement concentrique est le plus utilisé pour ce type de moteurs, l'enroulement est réalisé à une ou plusieurs couches, leur utilisation dans l'industrie est justifié par leur facilités de construction et leur rapidité de réalisation.

9. Le pas dentaire

Le pas dentaire est défini comme étant la distance séparant les deux axes de deux encoches voisines. Il est donné par :

$$t1 = \frac{\pi * D1}{Z1} [\text{mm}] \quad (II.9)$$

10. Courant nominal dans une phase statorique

Le courant nominal dans une phase est donné par l'expression suivante :

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.10})$$

Avec :

P_n : puissance nominale en [kW] ;

U_n : tension simple en [V] ;

η : rendement nominal ;

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

11. Nombre de conducteurs effectifs dans une encoche

$$U_{en1} = \frac{A \cdot t_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}}{I_n} \quad (\text{II.11})$$

a_1 : nombre de branches parallèles de l'enroulement statorique

12. Nombre de spires par phase

Son expression est donné par :

$$W_1 = \frac{P \cdot q_1 \cdot U_{en1}}{a_1} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

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

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot P \cdot m} \quad (\text{II.13})$$

13. Section effective d'un conducteur

$$S_{eff} = \frac{I_{1n}}{a_1 \cdot J_1} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.14})$$

J_1 : Densité de courant, elle est donnée en fonction du diamètre extérieur suivant le degré de protection de la machine et de la classe d'isolation.

Remarque :

Lorsque $S_{eff} > 1.8 \text{ mm}^2$. On devise cette section en sections élémentaires.

$$S_{el} = \frac{S_{eff}}{N_{el}} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.15})$$

La section des conducteurs étant normalisée, on choisira la section normalisée la plus proche de celle calculée.

Les sections normalisées son données par le tableau suivant :

Diamètre (d)	Diamètre isolé (d_{iso})	Section	Section isolée
0.53	0.567	0.22	0.252
0.58	0.60	0.26	0.282
0.61	0.62	0.292	0.301
0.63	0.64	0.311	0.321
0.75	0.815	0.442	0.521
0.80	0.865	0.503	0.581
0.85	0.915	0.667	0.657
0.90	0.965	0.735	0.731
0.95	1.08	0.785	0.915

Tableau.II.4. Sections normalisées avec isolation

II.3. Dimensionnement de la feuille statorique

La feuille statorique est représentée par la figure ci-dessous

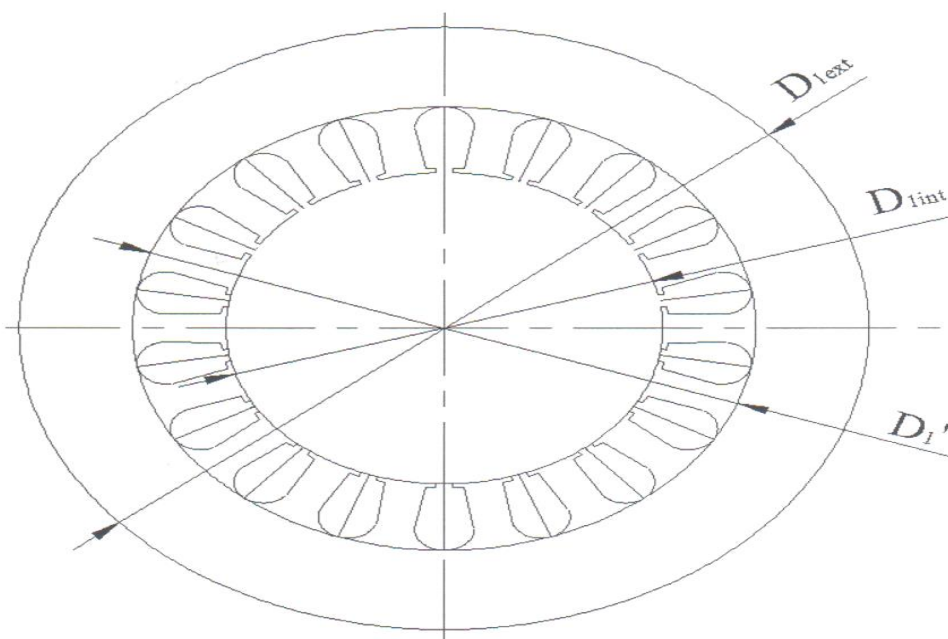


Figure .II.1. Feuille statorique du moteur asynchrone

1. La largeur de la dent

En se basant sur la loi de la conservation du flux, la largeur de la dent est donnée par :

$$b_{z1} = \frac{t_1 * B_\delta}{K_{fer} * B_{z1max}} \text{ [mm]} \quad (\text{II.16})$$

t_1 : Pas dentaire

B_δ : Induction dans l'entrefer

K_{fer} : Coefficient de remplissage du paquet statorique

B_{z1max} : Induction maximale dans la dent du stator

L'induction maximale admissible dans les dents du stator ainsi que dans la culasse du stator est donnée en fonction de hauteur d'axe h , ainsi que le nombre de paires de pôles .

h [mm]	2p	B_{z1max}	B_{c1max}
50-132	2 et 4	1.75-1.95	1.50-1.65
	6	1.75-1.95	1.45-1.60
160	2	1.75-2.0	1.45-1.70
	4	1.75-2.0	1.45-1.70
180-250	2	1.70-1.90	1.45-1.65
	4	1.70-1.90	1.45-1.65

Tableau.II.5. Inductions admissibles dans les dents et culasse du stator

2. Hauteur du dos du stator

Elle définie par l'expression suivante :

$$h_{c1} = \frac{0.5 * \alpha_i * \tau * B_\delta}{K_{fer} * B_{c1max}} \text{ [mm]} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

τ : pas polaire

α_i : coefficient de recouvrement polaire

B_{c1max} : induction magnétique admissible dans le dos du stator

Elle donnée en annexe par le Tableau.5.

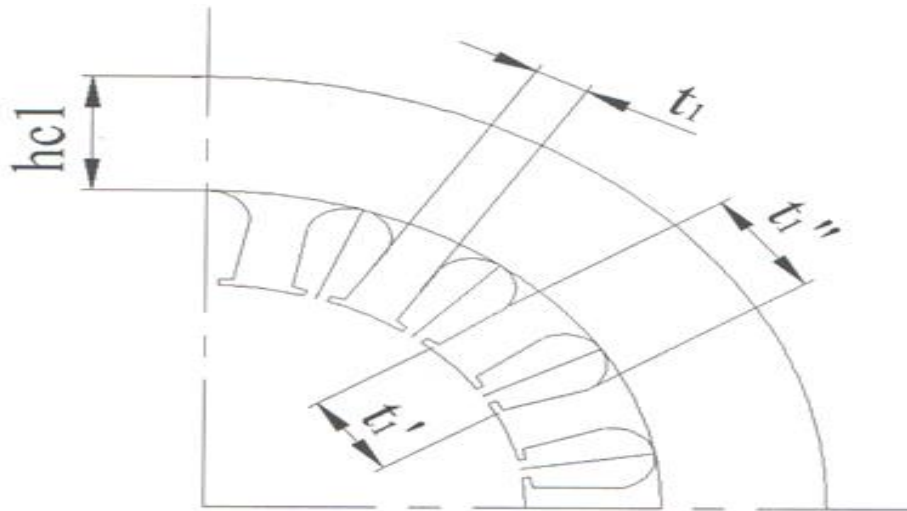


Figure.II.2.représentation des pas dentaires statorique

3. Hauteur de la dent

Elle est donnée géométriquement par :

$$h_{z1} = 0.5 * (D_{ext} - D_1) - h_{c1} \text{ [mm]} \quad (\text{II.18})$$

4. Largeur minimale de l'encoche

La largeur minimale de l'encoche s'exprime par la formule suivante :

$$b_{enc1} = \pi * \left(\frac{D_1 + 0.2 * h_{z1}}{Z_1} \right) - b_{z1} \text{ [mm]} \quad (\text{II.19})$$

Avec:

Z_1 : nombre d'encoches statorique

h_{z1} : hauteur de la dent.

Le schéma de l'encoche statorique est donné par la figure ci- après.

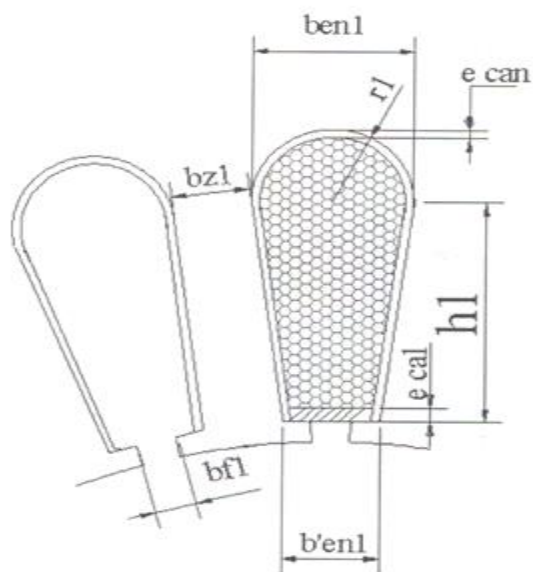


Figure.II.3. Représentation d'une encoche statorique.

5. Largeur maximale de l'encoche

La largeur maximale de l'encoche est définie par :

$$b_{enc2} = \frac{(D_1 + 2 \cdot h_{z1})}{Z_1} - b_{z1} \text{ [mm]} \quad (\text{II.20})$$

b_{enc2} représente b'_{en1} de la figure.4.

6. Hauteur de l'encoche

Elle est donnée par :

$$H_{enc1} = h_{z1} - (h_{k1} + h_{f1}) \text{ [mm]} \quad (\text{II.21})$$

Avec:

h_{f1} : La hauteur de fente de l'encoche statorique

$$h_{f1} = (0.8 \div 1.2) \text{ [mm]}$$

h_{k1} : La hauteur de la clavette, elle donnée par :

$$h_{k1} = 0.5 * (b_{enc1} - b_{f1}) \text{ [mm]}$$

b_{f1} : Largeur de la fente d'encoche statorique

$$b_{f1} \leq 4 \text{ [mm]}$$

7. Section occupée par les conducteurs

Pour une encoche trapézoïdale, la section occupée par les conducteurs est donnée par :

$$S_{enc1} = 0.5 * (b_{enc1} + b_{enc2}) * h_{enc1} - S_{iso} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{II.22})$$

S_{iso} : la section occupée par l'isolation de l'encoche.

$$S_{iso} = e_1 * (b_{enc2} + 2 * h_{enc1}) + e_2 * b_{enc1} + e_3 * \frac{(b_{enc2} + b_{enc1})}{2} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{II.23})$$

Avec:

e_1 : épaisseur de revêtement de l'encoche

$$e_1 = (0.37 \div 0.4) \text{ [mm]}$$

e_2 : épaisseur de fermeture de l'encoche

$$e_2 = 0.5 \text{ [mm]}$$

e_3 : épaisseur de la cale du milieu

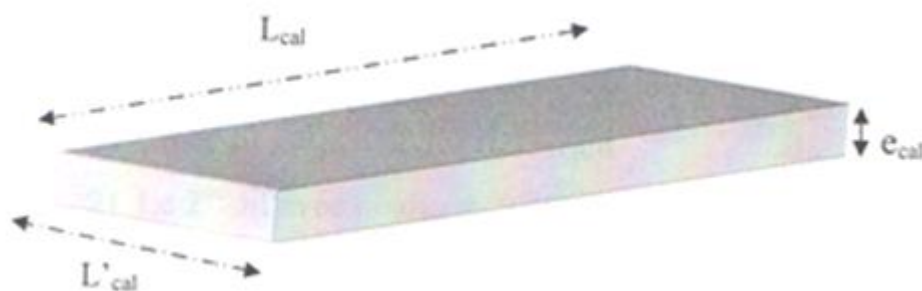


Figure .II.4..Cale de fermeture de l'encoche

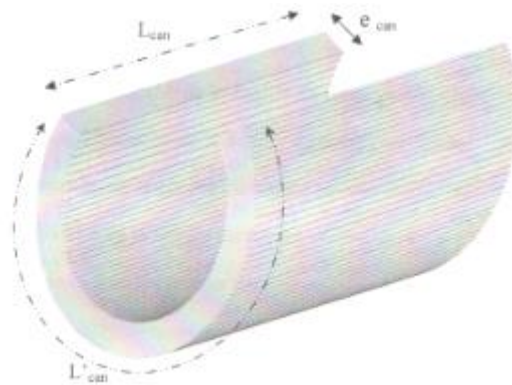


Figure.II.5. Caniveau d'encoche.

8. Coefficient de remplissage de l'encoche

Il est donné par la formule suivante :

$$K_{ren1} = \frac{W_1 * N_{el} * d_{iso}^2}{S_{enc1}} \quad (II.24)$$

Avec:

W_1 : nombre de conducteurs dans l'encoche

d_{iso} : diamètre du conducteur avec isolation

S_{enc1} : section d'encoche

N_{el} : nombre de conducteurs élémentaires.

Remarque

Le coefficient de remplissage de l'encoche, K_{ren1} doit être compris entre 0.7 et 0.75.

Si cette condition n'est pas vérifiée, un redimensionnement sera nécessaire.

9. Détermination de l'entrefer

Pour réduire le courant magnétisant et avoir un bon facteur de puissance, l'entrefer doit être maintenu le plus faible possible.

Mais un entrefer assez grand est avantageux pour minimiser les pertes supplémentaires dues à la pulsation des champs harmoniques

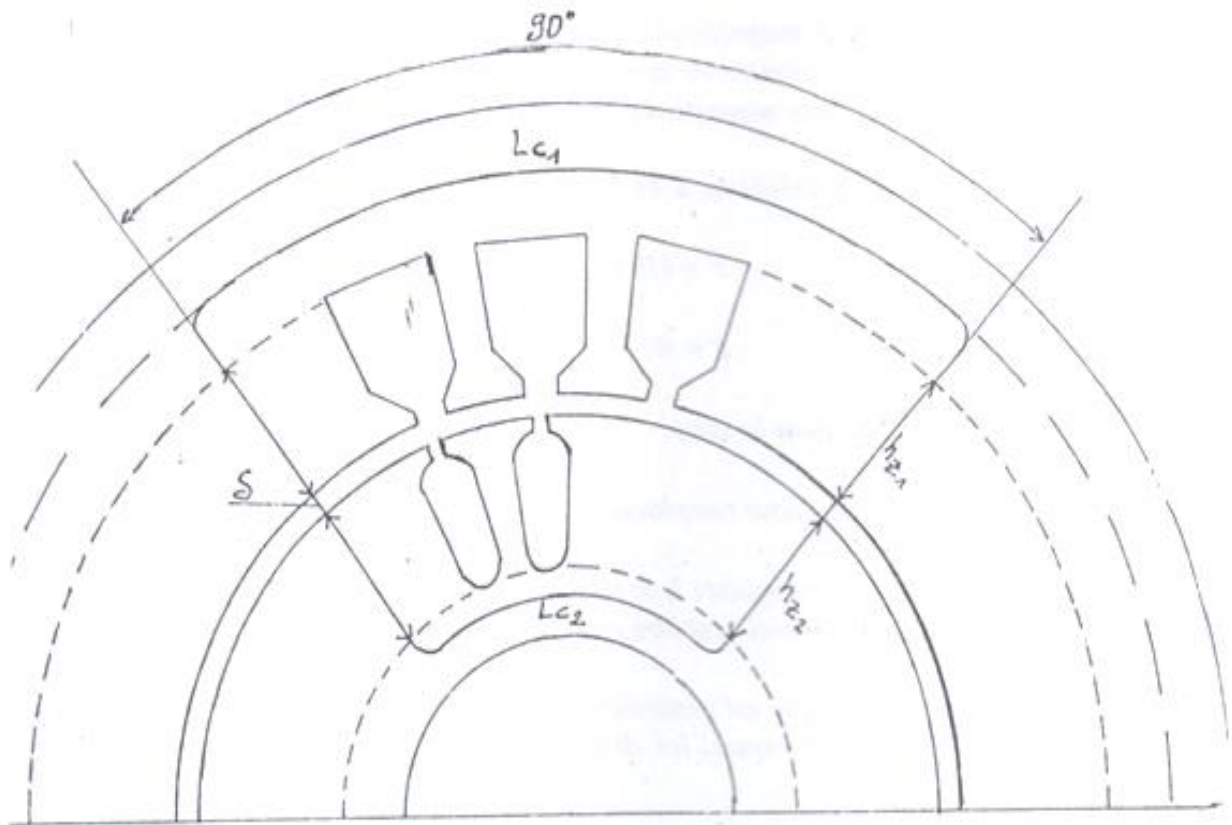


Figure.II.6.Schéma du circuit magnétique statorique et rotorique.

II.4. Dimensionnement du rotor

1. Diamètre extérieur du rotor

Connaissant le diamètre intérieur du stator et l'épaisseur de l'entrefer, le diamètre extérieur du rotor s'exprime par :

$$D_2 = D_1 - 2 * \delta \quad (\text{II.25})$$

2. Le pas dentaire

Le pas dentaire est donné la formule suivante :

$$t_2 = \pi * \frac{D_2}{Z_2} \quad (\text{II.26})$$

Z_2 : nombre d'encoches rotorique

3. Courant dans la barre

En général, le courant dans une phase de l'enroulement rotorique est donné par :

$$I_2 = \frac{I_n * m_1 * W_1 * K_{enr1} * \cos \varphi_1}{m_2 * W_2 * K_{enr2}} \quad (\text{II.27})$$

I_n : courant nominal statorique en [A]

m_1 : nombre de phases du stator

K_{enr1} : facteur de bobinage statorique

m_2 : nombre de phases rotorique

K_{enr2} : facteur de bobinage rotorique

W_2 : nombre de spires rotorique

II.4.1. Dimensionnement de la feuille rotorique

1. Hauteur de la feuille rotorique

La hauteur de la culasse rotorique est donnée par :

$$h_{c2} = 0.5 * \frac{\alpha_i * B_\delta}{K_{fer} * B_{c2}} \text{ [mm]} \quad (\text{II.28})$$

Avec:

τ : le pas polaire

B_δ : induction dans l'entrefer

B_{c2} : induction dans la culasse rotorique

K_{fer} : coefficient de remplissage du paquet rotorique

2. Largeur de la dent rotorique

En se basant sur la loi de conservation du flux, la largeur de la dent est donnée par :

$$B_{c2} = \frac{t_2 * B_\delta}{K_{fer} * B_{z2max}} \text{ [mm]} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

t_2 : pas dentaire au rotor

B_{z2max} : induction maximale dans la dent du rotor.

L'induction maximale dans la dent du rotor ainsi que dans la culasse est donnée par le tableau suivant :

h[mm]	2p	B_{z2max}	B_{c2max}
50-132	2	1.75-1.95	1.35-1.45
	4	1.75-1.95	1.15-1.25
160-225	2	1.75-1.95	1.35-1.45
	4	1.55-1.80	1.15-1.25
180-250	2	1.60-1.85	1.35-1.45
	4	1.80-2.00	1.15-1.25

Tableau.II.6. Inductions admissibles dans les dents et culasse du rotor

3. Hauteur de la dent rotorique

$$h_{z2} = 0.5 * (D_2 - D_{2int}) - h_{c2} \text{ [mm]} \quad (\text{II.30})$$

D_{2int} : diamètre intérieur du rotor.

$$0.3 D_2 < D_{2int} < 0.35 D_2$$

D_2 : diamètre extérieur du rotor.

4. Diamètre supérieur de l'encoche rotorique :

Le diamètre supérieur de l'encoche est donné par l'expression :

$$d'_2 = \frac{\pi * (D_2 - 2 * h_{f2}) - Z_2 * b_{z2}}{(Z_2 + \pi)} \text{ [mm]} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

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

5. Diamètre inférieur de l'encoche rotorique :

Il est donné par l'expression suivante :

$$d_2 = \frac{\pi * (D_2 - 2 * h_{z2}) - Z_2 * b_{z2}}{(Z_2 - \pi)} \text{ [mm]} \quad (\text{II.32})$$

6. Hauteur de l'encoche rotorique

La hauteur de l'encoche est donnée géométriquement par :

$$h_{enc2} = h_2 + 0.5 * (d'_2 + d_2) \text{ [mm]} \quad (\text{II.33})$$

Avec:

$$h_2 = h_{z2} - h_{f2} - 0.5 * (d'_2 + d_2) \text{ [mm]} \quad (\text{II.34})$$

7. Section de la barre rotorique

La section de la barre rotorique est donnée par l'expression suivante :

$$S_b = 0.25 * \pi * (d_2'^2 + d_2^2) + 0.5 * (d'_2 + d_2) * h_2 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{II.35})$$

8. Densité de courant dans la barre rotorique

Elle est donnée par :

$$J_b = \frac{I_b}{S_b} \text{ [A/mm}^2\text{]} \quad (\text{II.36})$$

J_b : doit vérifier la condition ci-dessous :

$$2.5 < J_b < 3.5 \quad \text{[A/mm}^2\text{]}$$

II.4.2.. Dimensionnement de l'anneau rotorique

1. Section de l'anneau

La section de l'anneau de la cage est donnée par :

$$S_{an} = (0.35 \div 0.4) \frac{Z_2 * S_b}{2 * p} [\text{mm}^2] \quad (\text{II.37})$$

2. Hauteur de l'anneau

La hauteur de l'anneau de la cage est donnée par :

$$h_{an} = (1.1 \div 1.25) * h_{z2} [\text{mm}] \quad (\text{II.38})$$

3. La largeur de l'anneau

La largeur de l'anneau de la cage est donnée par :

$$b_{an} = \frac{S_{an}}{h_{an}} [\text{mm}] \quad (\text{II.39})$$

4. Diamètre de l'anneau

Le diamètre de l'anneau de la cage est donnée par :

$$D_{anmoy} = D_2 - h_{an} [\text{mm}] \quad (\text{II.40})$$

III. Dimensionnement d'une machine à courant continu [2][3][4]

III.1. Calcul des dimensions principales

1. Introduction

Le calcul d'une machine électrique passe inévitablement par:

- Le choix du diamètre D'induit
- Le calcul de la longueur virtuelle l_i de la partie active , puis vient le calcul électromagnétique, thermique et mécanique.
- Les résultats obtenus après calculs doivent être vérifiés par rapport à ceux attendus. Dans le cas où ils ne sont pas conformes, on procède à des corrections sur les dimensions et paramètres de départ.
- L'opération doit être répétée jusqu'à obtention d'une variante de machine répondant au mieux au cahier des charges.

2. Calcul de la longueur virtuelle l_i

$$l_i = \frac{6.1 * P_i * 10^{12}}{\alpha_i * A * B_\delta * D_{ind}^2 * N_n} \quad (III.1)$$

l_i : longueur virtuelle du paquet magnétique en [mm]

A: Charge Linéaire [A/m]

P_i : Puissance électromagnétique [Kw]

D_{ind} : Diamètre extérieur de l'induit [mm]

B_δ : Induction dans l'entrefer [T]

α_i : coefficient de recouvrement polaire

3. Diamètre extérieur de l'induit

Il est choisi sur la base de la courbe $D_{ind} = f(P_n/N_n)$

Exemple: $P_n=7.5Kw$; $N_n=1500tr/mn$,

on lit sur la courbe $D_{ind}=f(P_n/N_n)$; $D_{ind}=150$ mm

4. La puissance électromagnétique

$$P_i = K_m * P_n = \frac{P_n(1 + \eta)}{2 * \eta} \quad (III.2)$$

K_m : Coefficient qui tient compte des chûtes ohmiques dans les enroulements de l'induit

5. Induction magnétique dans l'entrefer

La valeur de B_δ est donnée par la courbe $B_\delta = f(D_2)$

6. Largeur de l'épanouissement polaire

$$B_\delta = \alpha_i * \tau \quad [T] \tag{III.3}$$

τ : pas polaire;

$$\tau = \pi * D_{ind} / 2 * p \quad [mm] \tag{III.4}$$

7. Hauteur de la culasse h_c

$$h_c = \frac{B_\delta * \alpha_i * \tau * l_i * K_{ren}}{2 * B_{cr} * l_c} \tag{III.5}$$

Avec : h_c en [mm] et $0.8 T < B_{cr} < 1.4 T$

8. Détermination du nombre de lamelles

$$U_{kmoy} = Un * \mu / K \tag{III.6}$$

U_{kmoy} doit être inférieur à 1.6 V entre deux lamelles consécutives.

K : nombre de lamelles nécessaires donné par le tableau suivant :

μ	K	U_{kmoy}
1	31	28.38
2	67	14.19
3	93	9.46

Tableau.III.1. nombre de lamelles

9. Calcul du courant nominal d'induit

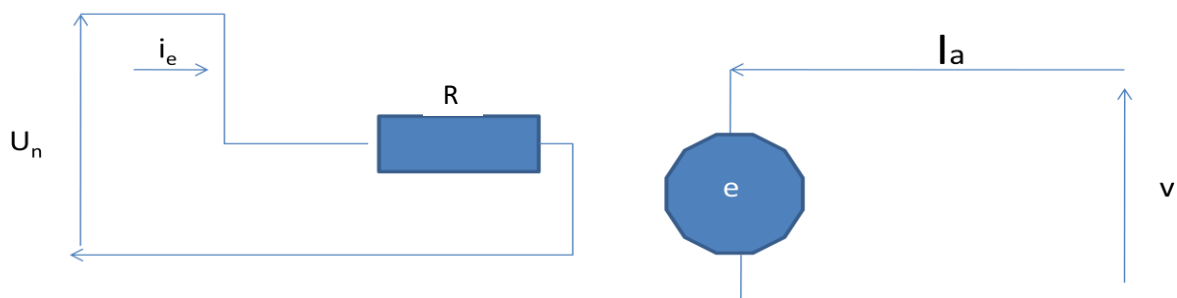


Figure.III.1.Machine à courant continu à excitation indépendante

Pour une machine à Excitation Indépendante régime moteur ,le courant induit est déterminé comme suit :

$$I_a = \frac{P_n * 10^{-3}}{U_n * \eta} \quad (III.7)$$

I_a : courant induit en [A]

U_n : tension nominale

P_n : puissance nominale [Kw]

η : rendement de la machine

- Pour un enroulement à excitation shunt, le courant de l'induit est donné comme suit:

$$I_a = \frac{P_n * 10^{-3}}{U_n * \eta} (1 - K_i) \quad (III.8)$$

K_i : coefficient qui tient compte de l'enroulement d'excitation shunt

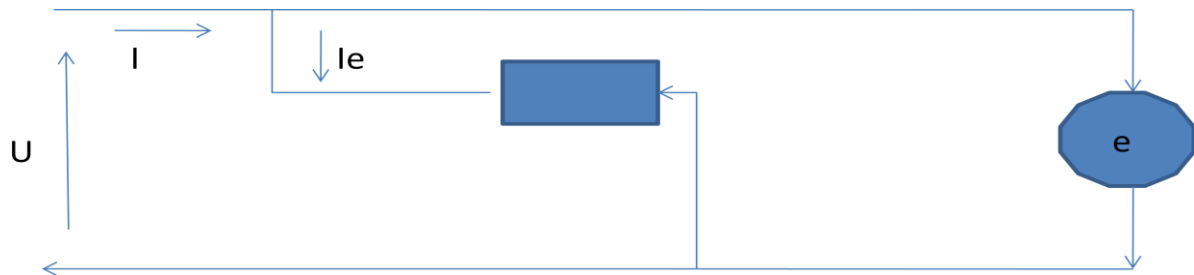


Figure.III.2.Machine à courant continu à excitation shunt

10. Nombre de conducteurs dans une encoche

$$U_{en} = \frac{A * t_2 * a}{I_a} \quad (III.9)$$

t_2 : pas dentaire en [mm] ; distance entre deux encoches voisines; dépend de la hauteur d'axe

h(cm)	8 ÷ 20
t_2 (cm)	1 ÷ 2

Tableau.III.2. pas dentaire

11. Calcul de la section effective d'un conducteur

$$S = \frac{I_a}{2 * J} \quad [\text{mm}^2] \quad (III.10)$$

J:densité de courant en [A/mm²]

12. Nombre total des conducteurs

$$N = Z_2 * U_{en} \quad (\text{III.11})$$

Z_2 : nombre d'encoches

III.2. Dimensionnement des encoches et des dents du rotor

1. Largeur de la dent b_{z2}

$$b_{z2} = \frac{t_2 * B_\delta}{K_{fer} * B_{z2max}} \quad (\text{III.12})$$

K_{fer} : Facteur de remplissage du paquet d'acier qui dépend de l'isolation des tôles.

- Pour les tôles vernis : $0.90 < K_{fer} < 0.92$
- L'induction maximale admissible dans la dent

$$1.70 \text{ T} < B_{z2max} < 1.87 \text{ T}$$

2. Surface totale de l'encoche

$$S_{enc} = \frac{\pi}{8} \left[(2 * r_g - b_t)^2 + (2 * r_p - b_t)^2 \right] + 0.5 * (r_g - r_p - b_t) * h_r \quad (\text{III.13})$$

r_g et r_p , représentent le grand rayon et le petit rayon de l'encoche qui sont donnés en fonction de la puissance du moteur.

b_t : est donné en fonction de la hauteur d'axe donc dépend aussi de la puissance de la machine

h_r : hauteur entre les deux rayons.

III.3. Dimensionnement de l'enroulement rotorique

III.3.1. Réalisation d'induit en Tambour

L'enroulement d'induit a généralement deux couches: une couche supérieure et une couche inférieure.

a . Encoches Élémentaires

On appelle encoches élémentaires une encoche avec deux côtés actifs.

b. La section

Une partie de l'enroulement induit comprend une à plusieurs spires et connectées à deux lames du collecteur; la sortie de l'enroulement est située entre deux lames du collecteur qui se suivent

III.3.2. Classification des enroulements d'induit

1. Enroulement imbriqué simple
2. Enroulement ondulé simple
3. Enroulement imbriqué multiple
4. Enroulement ondulé multiple

➤ **Enroulement imbriqué simple**

Pour réaliser un enroulement et le connecter au collecteur, il faut déterminer les pas d'enroulement et le pas au collecteur .

- **Le 1^{er} pas partiel**

C'est la distance entre le 1^{er} et le 2^{ème} côté actif d'une même section.

$$y_1 = \frac{Z_{el}}{2 * p} \pm \varepsilon = \text{Nombre entier} \begin{cases} +\varepsilon \text{ pas allongé} \\ -\varepsilon \text{ pas raccourci} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Avec Z_{el} : nombre d'encoches élémentaires

- **Le 2^{ème} pas partiel**

C'est la distance entre le second côté actif de la section et le 1^{er} côté actif de la section qui suit la 1^{ère}.

$$y_2 = y - y_1 \quad (\text{III.15})$$

- **Le pas résultant y_c (le pas au collecteur)**

C'est la distance entre les lames du collecteur auxquelles est connectée une section mesurée en nombre d'intervalle au collecteur. Pour l'enroulement imbriqué simple

$$y_c = \pm 1 \quad (\text{III.16})$$

Remarque: Dans les machines à courant continu, le nombre de section S est égal au produit du nombre de lames "K" et du nombre d'encoches élémentaires Z_{el}

$$S = K = Z_{el} \quad (\text{III.17})$$

Exemple: Construire un enroulement imbriqué simple non croisé
 $Z_{el} = 12$, $2p = 4$.

- Le 1^{er} pas partiel:

$$y_1 = (Z_{el}/2p) \pm \varepsilon$$

$$y_1 = 12/4 = 3; \quad y_1 = 3$$

$$y = y_c = +1$$

- Le 2^{ème} pas partiel $y_2 = y - y_1 = 1 - 3 = -2$; $y_2 = -2$

III.4. Calcul du circuit magnétique et de la f.m.m d'excitation à vide F_0

Le calcul du circuit magnétique est effectué en marche à vide, il a pour but de déterminer la f.m.m totale nécessaire à l'aimantation de la machine qui est égale à la somme de f.m.m des parties du circuit magnétique connectée en série.

Vu que le circuit magnétique est symétrique, le calcul se fait par pôle. Dans ce cas, pour chacune des parties, on détermine l'induction magnétique, l'intensité du champ magnétique, la f.m.m, ensuite, on calcule la somme des f.m.m du circuit magnétique qui est constitué de six (06) parties.

L'entrefer; les dents; le dos de l'induit; les pôles; la jonction entre le pôle et la culasse; et la carcasse.

III.4.1. Détermination du flux sous un pôle

$$\Phi = \frac{60 \cdot a \cdot E}{P_n \cdot N_n} \quad [\text{wb}] \quad (\text{III.18})$$

$$E = K_m \cdot U_n \quad [\text{V}] \quad (\text{III.19})$$

K_m : coefficient qui dépend de la puissance de la machine

III.4.2. Chute de tension magnétique (F.m.m) dans l'entrefer

Elle est proportionnelle à la valeur de l'induction B_δ . Mais vue la variation de l'entrefer à cause des encoches, on doit calculer d'abord l'entrefer équivalent.

B_δ : induction admissible dans l'entrefer donnée par un abaque

δ : Epaisseur de l'entrefer sans variation

$$\delta_{eq} = \delta \cdot K_\delta \quad [\text{mm}] \quad (\text{III.20})$$

K_δ : coefficient dépendant de la hauteur d'axe

La f.m.m dans l'entrefer est donnée par :

$$F_\delta = 0.8 \cdot B_\delta \cdot K_\delta \cdot 10^3 \quad [\text{A}] \quad (\text{III.21})$$

III.4.3. La chute de tension magnétique dans les dents

Un pas dentaire appartient à la portion du flux

$$\Phi_z = B_\delta \cdot l_i \cdot t_2 \quad [\text{Wb}] \quad (\text{III.22})$$

Puisque la perméance du fer est très supérieure à celle de l'air, presque tout le flux Φ_z passera sur la dent d'où :

$$B_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{K_{fer} \cdot b_{z2}} \quad (\text{III.23})$$

Pour la valeur de B_{z2} trouvé en tesla , on prend du tableau de magnétisation des dents du stator, la valeur H_z correspondante.

$$F_z = H_z * h_{z2} * 10^{-3} \text{ [A]} \quad (\text{III.24})$$

h_{z2} : hauteur de la dent en [mm]

III.4.4.. Chute de tension magnétique dans la culasse du rotor (dos d'induit)

1. Induction dans la culasse du rotor (induit)

$$B_{c2} = \frac{B_\delta * \alpha_i * \tau}{2 * K_{fer} * h_{c2}} \quad (\text{III.25})$$

h_{c2} : hauteur de la culasse (dos de la culasse)

B_{c2} : induction dans le dos de l'induit en [T]

connaissant B_{c2} , on lit la valeur de H_{c2} correspondante sur le tableau de magnétisation

2. F.m.m dans la culasse du rotor (induit)

$$F_{c2} = H_{c2} * L_{c2} * 10^{-3} \text{ [A]} \quad (\text{III.26})$$

L_{c2} : longueur moyenne des lignes de champ de l'induit en [mm]

On prend:

$$L_{c2} = \frac{\pi}{2 * p} \left(D_{2int} - \frac{h_{c2}}{2} \right) + h_{c2} \quad (\text{III.27})$$

P_u : puissance utile

N_n : vitesse de rotation en tr/mn

D_{2int} : Diamètre intérieur du rotor .

III.4.5. Chute de tension dans le pôle

$$F_p = H_p * L_p * 10^{-3} \text{ [A]} \quad (\text{III.28})$$

Pour déterminer la chute de tension magnétique dans le pôle, il faut connaître le flux dans le noyau polaire Φ_p .

$$\Phi_p = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \Phi_\sigma / \Phi) = \sigma * \Phi ; \sigma = (1 + \Phi_\sigma / \Phi)$$

$$\Phi_p = \sigma * \Phi ; \quad 1.1 < \sigma < 1.2$$

σ : coefficient de dispersion des pôles principaux

b_p : largeur du pôles

$L_p = h_p$: hauteur du pôle en [mm]

H_p : champ magnétique donné en fonction de B_p

Exemple : $B_p=1.56$ T, on a $H_p=880$ A/m , valeur lue sur une table de magnétisation

III.4.6. Chute de tension magnétique dans la culasse du stator F_{c1}

1. Section droite traversée par le flux

$$S = h_{c1} * l_i * K_{fer} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{III.29})$$

h_{c1} : hauteur de la culasse statorique

Connaissant B_{c1} , on lit H_c (table de magnétisation)

2. F.m.m dans la culasse du stator F_{c1}

$$F_{c1} = H_{c1} * L_{c1} * 10^{-3} \text{ [A]} \quad (\text{III.30})$$

L_{c1} : Longueur moyenne des lignes d'induction dans la culasse statorique en [mm]

$$L_{c1} = \frac{\pi}{2 * p} \left(D_{ext} - \frac{h_{c1}}{2} \right) + h_{c1} \quad (\text{III. 31})$$

III.4.7. Force d'excitation magnétique à vide par pôle

$$F_0 = 2 * F_{\delta} + 2 * F_{z2} + 2 * F_p + F_{c1} + F_{c2} \text{ [A]} \quad (\text{III.32})$$

ANNEXE

Cette annexe regroupe des schémas d'exécution des parties du transformateur ainsi que l'exécution des enroulements pour les machines électriques rotatives, notamment moteur à courant continu et asynchrone. ainsi que certains abaques et tableaux de valeurs de magnétisation

Elle est exploitée comme support et compléments de cours.

Le transformateur et schémas de ses parties actives

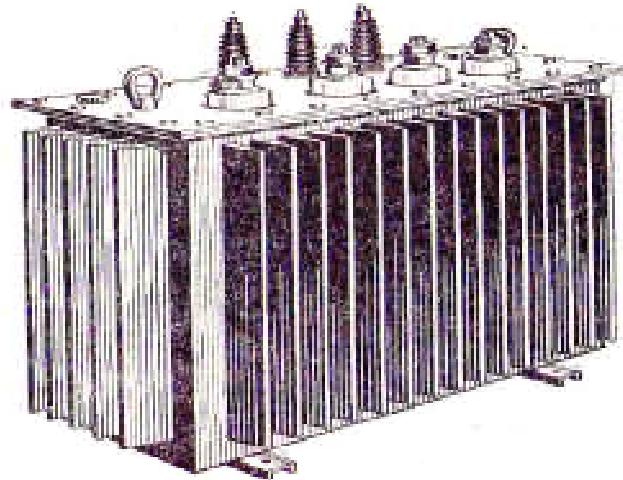


Fig.1 — Vue d'un transformateur triphasé à refroidissement dans l'huile. On remarque, sur le couvercle, trois petites bornes basse tension + le neutre. Au deuxième plan sont les trois bornes H.T. Autour de la cuve, sont disposées des ailettes qui augmentent la surface de refroidissement au contact de l'air. Document Deri.

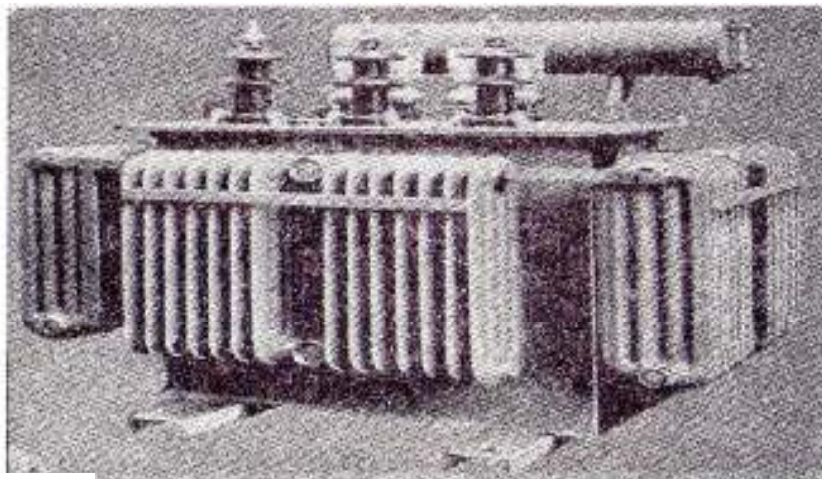


Fig.2 — Transformateur triphasé avec son conservateur d'huile (le cylindre en second plan). Les bornes B.T. sont cachées par les trois bornes H.T. au premier plan. On remarque les radiateurs de refroidissement à ailettes disposés sur le pourtour.
L'appareil est construit pour une puissance de 160 kVA et une tension primaire de 20 kV. Document Unelec.

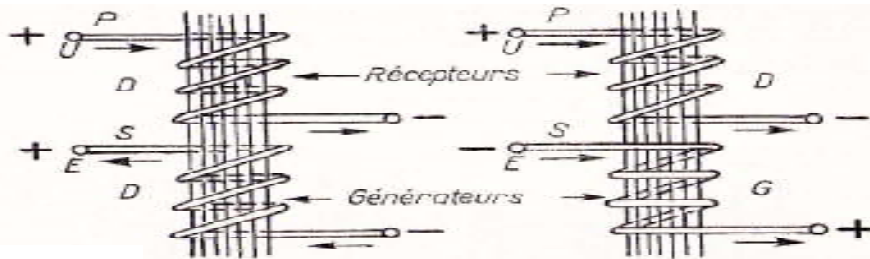


Fig.3

— Exemples de polarités instantanées dans un transformateur pour des bornes homologues. Dans les deux dessins, la tension instantanée U , dans les primaires P , est de même sens. Dans le dessin de gauche, les deux bobines sont enroulées à droite D . Les polarités sont les mêmes du fait que S est générateur et P récepteur; par contre, les tensions sont de sens inverse.

Dans le dessin de droite, on a le primaire P enroulé à droite D et le secondaire S enroulé à gauche G . De ce fait, les polarités sont opposées. Ceci démontre l'importance du sens de l'enroulement des bobines.

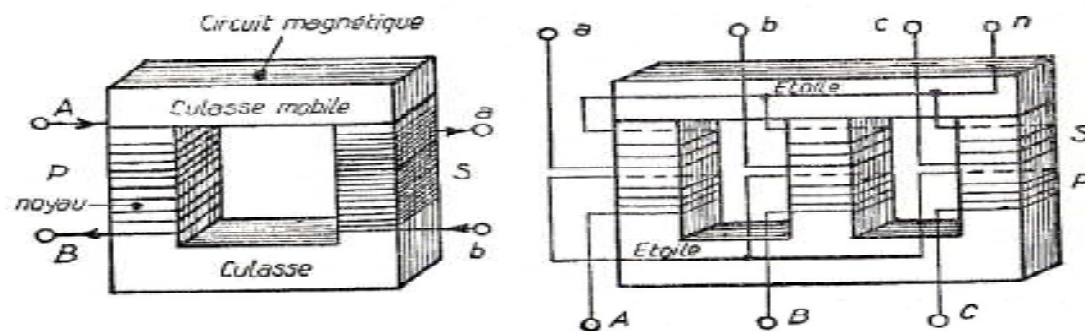


Fig.4

— Le dessin de gauche représente un circuit magnétique de transformateur monophasé et ses deux bobinages, primaire P et secondaire S .

Le dessin de droite montre un transformateur triphasé, avec ses enroulements, primaire et secondaire, couplés en étoile. P est relié au réseau par les bornes A, B, C . Le secondaire S dont le neutre est sorti de l'étoile, se branche sur l'utilisation.

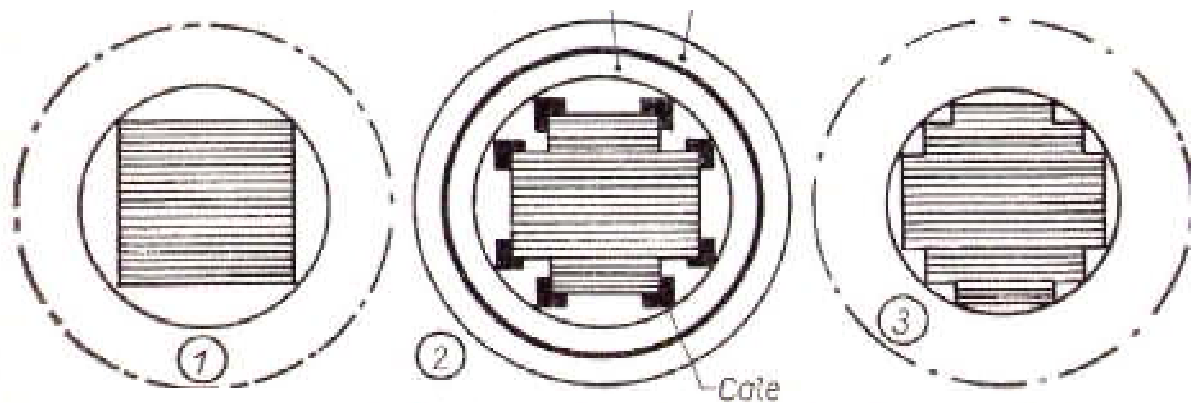


Fig.5 — Trois coupes de noyaux de circuits magnétiques. Celui du milieu est ceinturé par ses bobines, primaire et secondaire, que six cales isolantes, disposées sur la longueur du noyau, centrent et isolent du fer.

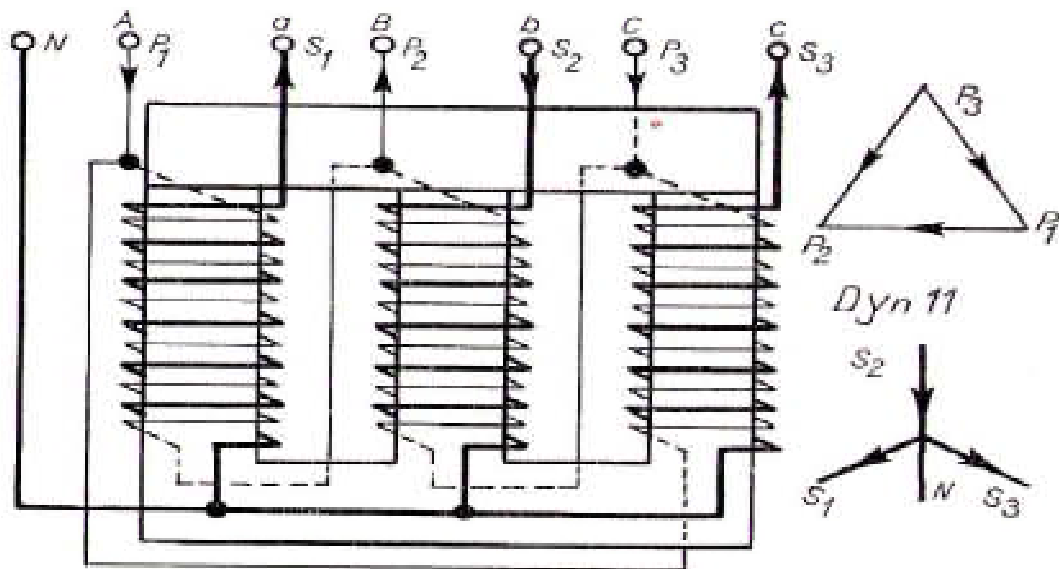


Fig.6 — Schéma de bobinage couplé en triangle-étoile, à neutre sorti sur l'étoile (couplage normalisé). Toutes les bobines sont enroulées à droite et les tensions en opposition dans les colonnes.

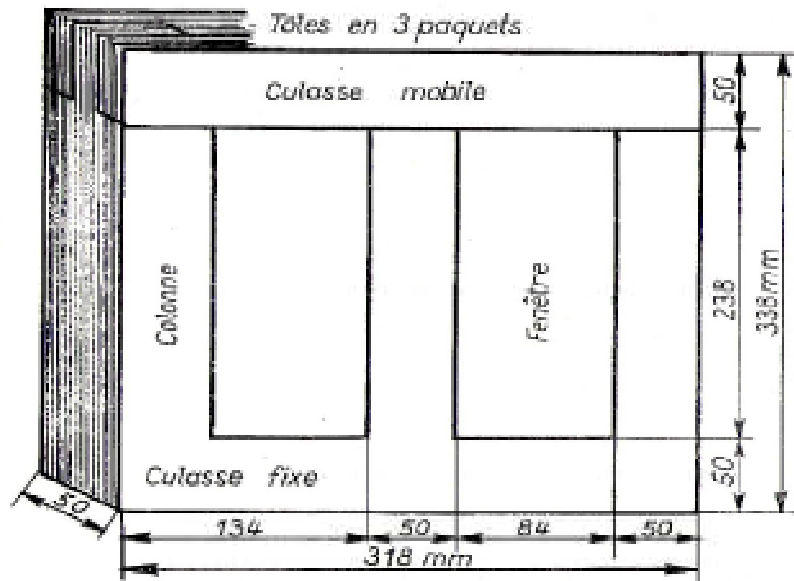


Fig.7 — Caractéristiques du circuit magnétique du transformateur

Constituants du moteur asynchrone

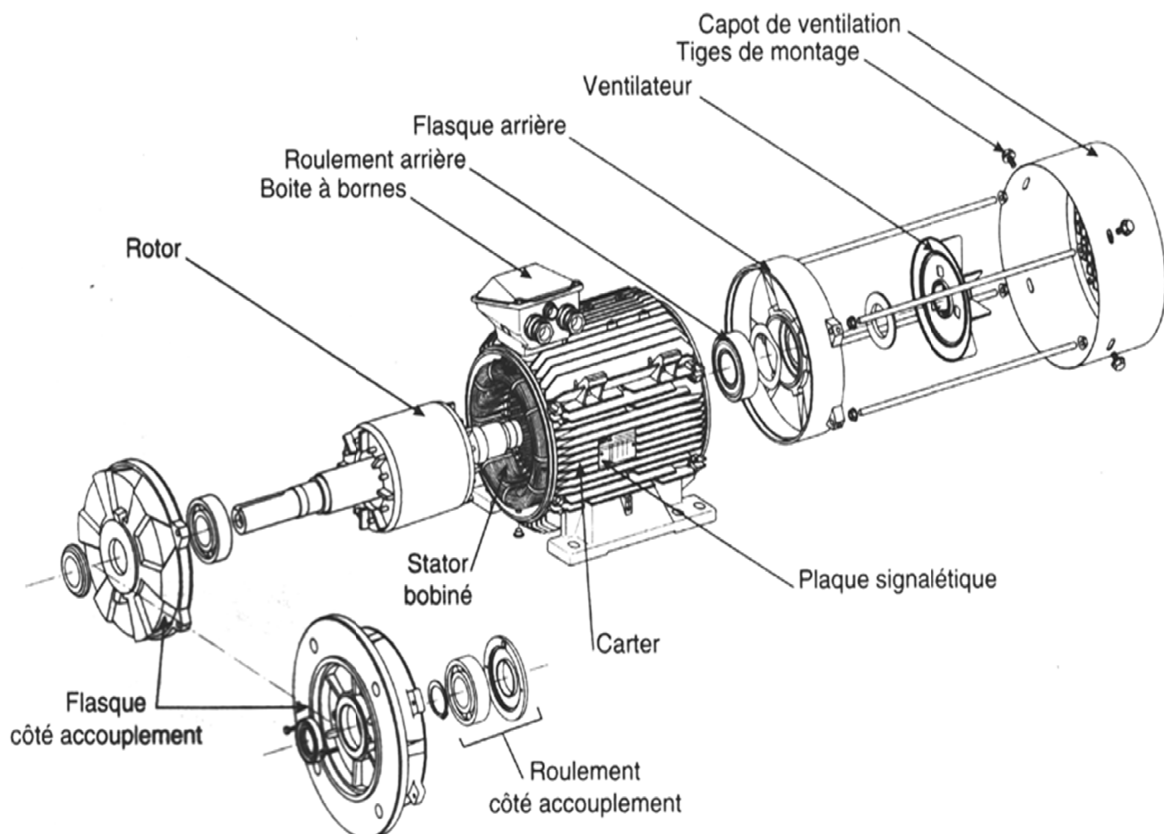


Fig.8. Constitution du moteur asynchrone triphasé

Types d'enroulements et leur exécution

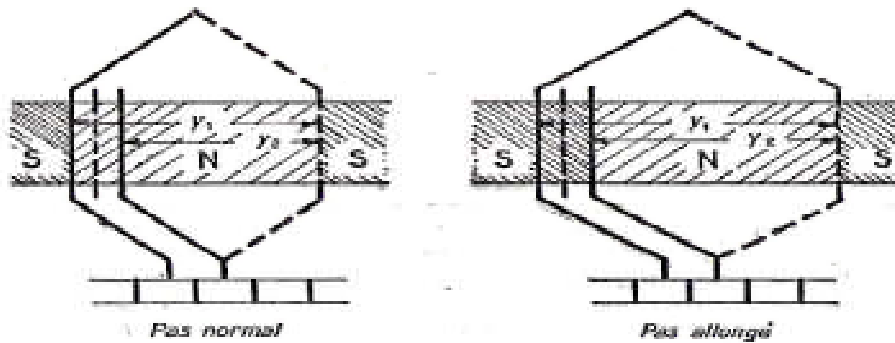


Fig. 9 — Dans un pas raccourci à sections ouvertes, le pas partiel Y_1 peut avoir un pas égal au pas polaire et le pas partiel Y_2 un pas inférieur (figure de gauche). Avec un pas allongé, Y_1 est toujours supérieur au pas polaire ; Y_2 peut être égal au pas polaire.

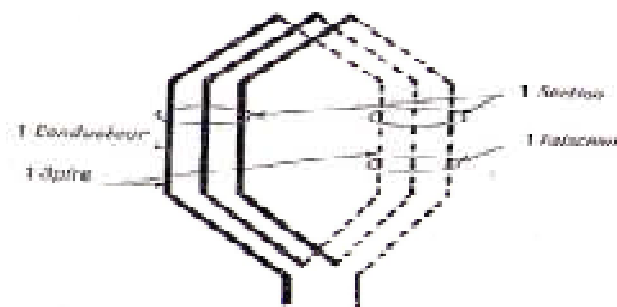


Fig. 10. Constitution d'une section de bobinage comportant trois spires

PROCÉDÉS D'ENROULEMENT

Pour relier entre elles les sections placées sur un induit, on utilise deux procédés

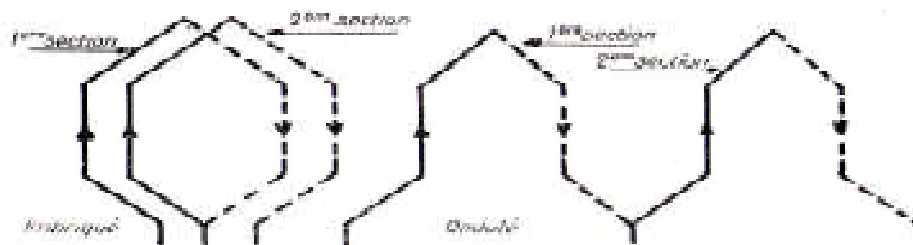


Fig. 11. — A gauche, forme et raccourcement entre deux sections de bobinage imbriqués. A droite, forme et enroulement de deux sections de bobinage soudés. Les flèches indiquent évidemment le courant dans les sections dont les extrémités sont soudées sur les lames du collecteur.

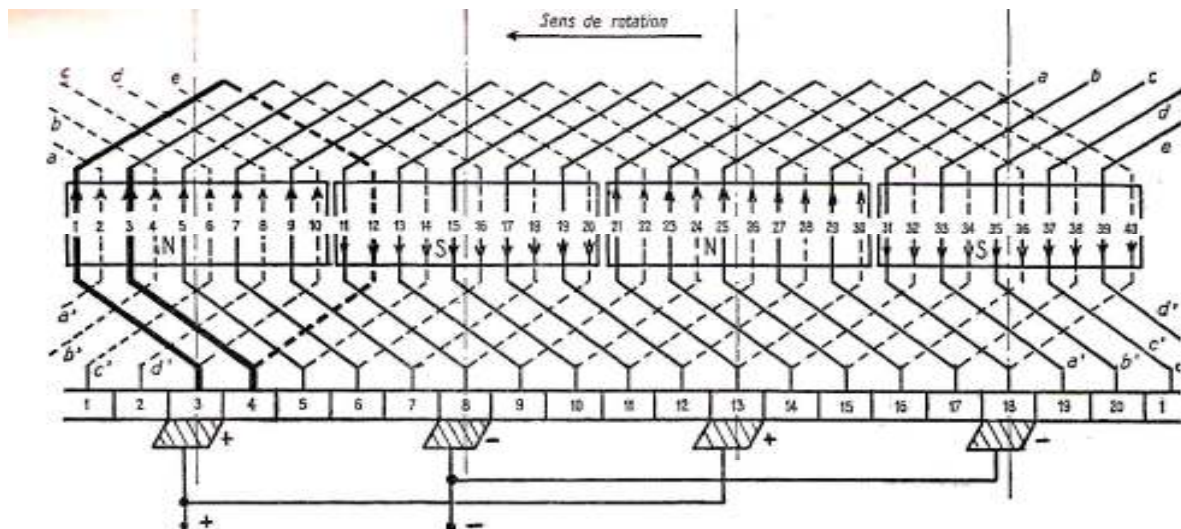


Fig. 11 — Schéma par développement panoramique d'un enroulement d'induit imbriqué à 4 pôles, 20 encoches, 20 lames au collecteur, 20 sections. $Y_1 = 11$; $Y_2 = 9$; $Y = 2$.

Dans ce schéma, on remarque :

- 1° Que le courant s'inverse alternativement sous chaque pôle nord et sud, comme l'indiquent les flèches des faisceaux;
- 2° Que les balais calés dans l'axe des pôles sont reliés à des faisceaux dont le sens de courant est le même, ce qui indique que l'emplacement choisi pour les balais est bon. Partout ailleurs, on aurait des faisceaux à sens de courant différent.
- 3° Le sens du courant dans les faisceaux est donné par la règle des trois doigts de la main droite s'il s'agit d'un moteur comme dans le cas de ce schéma.
- 4° Les repères a, b, c, \dots , permettent de suivre facilement le circuit du bobinage, les mêmes lettres réunissant les conducteurs a', b', c' etc... entre eux.
- 5° Les balais de même polarité sont reliés entre eux (voies d'enroulement en parallèle).

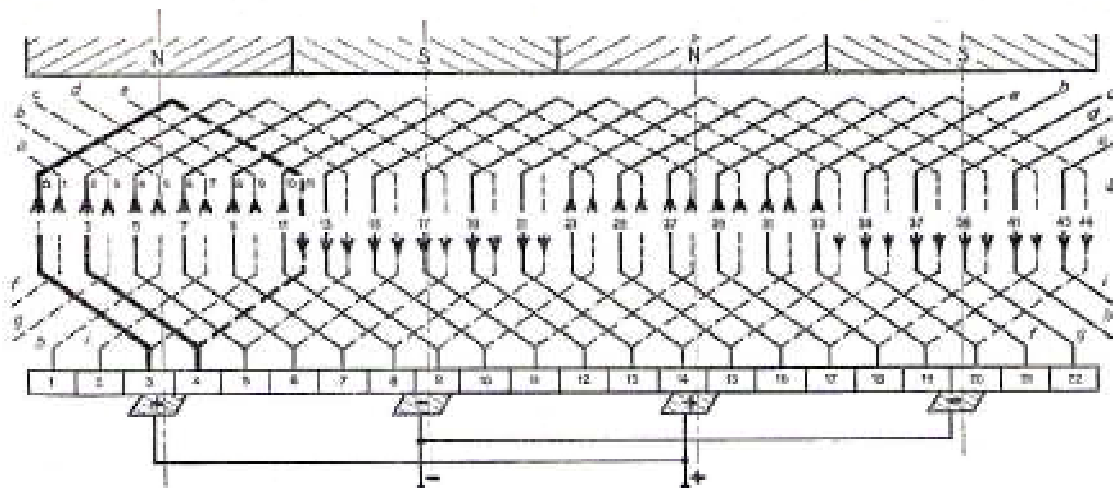


Fig. 12 — Schéma par développement panoramique d'un enroulement imbriqué d'induit à pas raccourci, comprenant : 4 pôles, 22 encoches, 22 sections, 22 lames au collecteur.

$Y_1 = 11$; $Y_2 = 9$; $Y = 2$ (Voir les calculs dans le texte).

Pour donner plus de clarté au schéma, il est recommandé de renforcer le trait de la première section. Les balais se placent dans l'axe des pôles et sont reliés en parallèle entre eux pour former un pôle + et un pôle —.



Fig.13.Stator d'une machine asynchrone

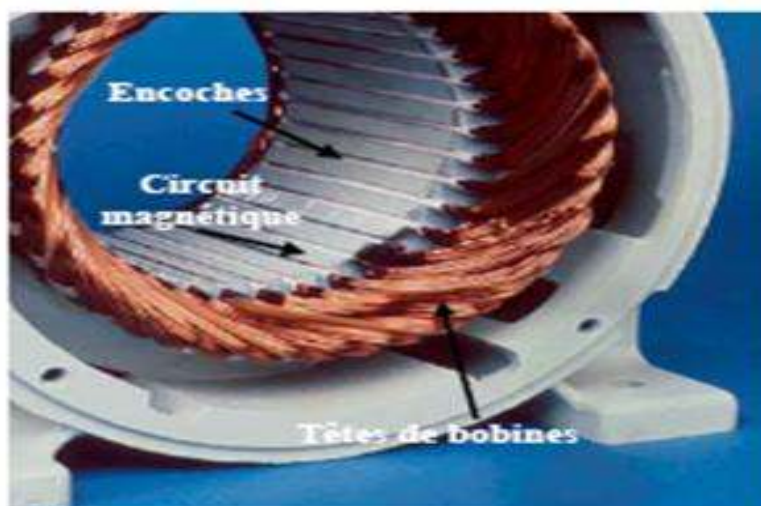


Fig.14.Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs , encoches, têtes de bobines)



Fig.15.Représentation d'un rotor d'un moteur asynchrone

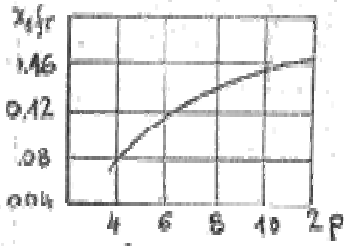


fig: 1



fig: 5

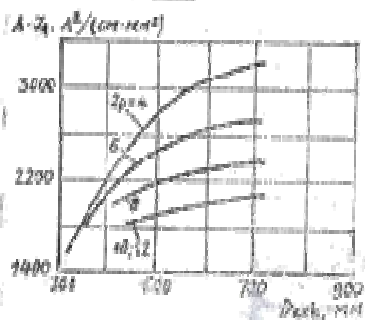


fig: 2

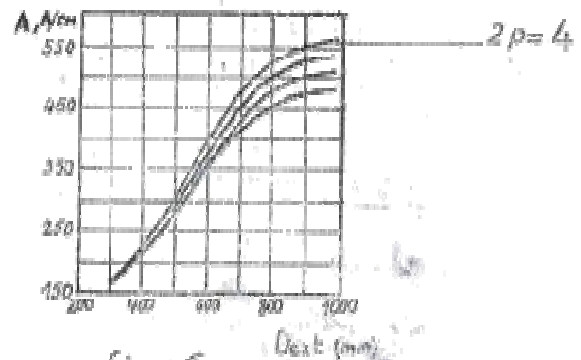


fig: 6

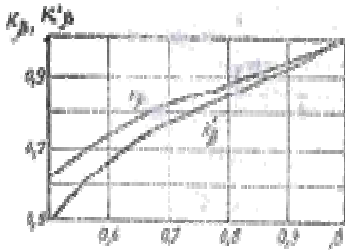


fig: 3

$K_p = f(\beta); K'_p = f(\beta)$

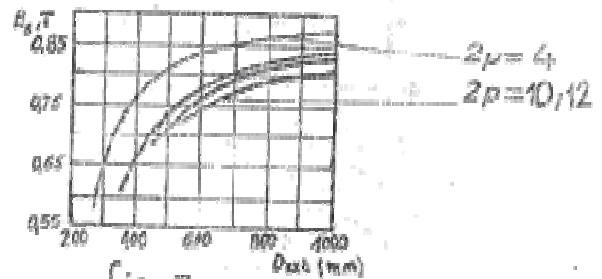


fig: 7

$E_0 = f(D_{ext})$

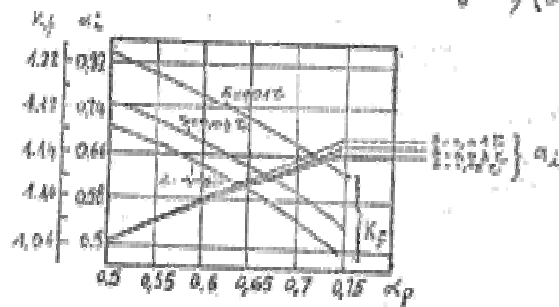


fig: 4

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

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	543	554	564	575
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.

Références bibliographiques

- [1] A.PICHAN, calcul et construction des machines électriques statiques, partie 2 .Edition Ecole supérieure d'électricité (1967).
- [2] M.KOSTENKO, Machines Electriques, Tome 1, Tome 2, Editions MIR, Moscou, (1979).
- [3] PH.LAURIER, les machines de construction de l'antiquité à nos jours, une histoire de l'innovation, Edition presses de l'ENPC, Paris (1996).
- [4] P.LETRILLIART, Conférences sur le bobinage des machines électriques. Figures. Editeur, Société française des électriciens (1938)
- [5] P.LETRILLIART, Les Bobinages des machines et des transformateurs électriques (1946)
- [6] R.MERLET, technologie d'électricité générale et professionnelle, bobinage des machines électriques et des transformateurs, Editeur DUNOD,(1968)
- [7] Electro-Industries, documentations internes, conception des transformateurs de distribution et moteurs asynchrones (1999-2009)