



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA
Tanindrazana - Fahafahana - Fandrosoana

**MINISTERE DE L'EDUCATION NATINALE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTSIRANANA

DEPARTEMENT ELECTRICITE

TRAVAUX DE MEMOIRES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIORAT

EN GENIE ELECTRIQUE

**AUDIT TECHNIQUE DE LA PROCEDURE DE
REBOBINAGE DE L'ATELIER ELECTRICITE DE LA
SOCIETE SECREN SA**

Par :

RABEKOTO Hobindriaka Tiaray

Encadreurs :

- **RABE Tsirobaka**
- **ANDRIANANTENAINA Max**
- **ANONDAHY Cyprien**

UNIVERSITE D'ANTSIRANANA
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTSIRANANA

Année Universitaire : 2005 – 2006

Année d'étude : 5^{ème} année

Mémoire de fin d'étude

Titre : AUDIT TECHNIQUE DE PROCEDURE DE REBOBINAGE DES ALTERNATEURS DE L'ATELIER ELECTRIQUE DE LA SECREN

BUT :

La procédure actuelle de remise en état des alternateurs de l'atelier de la SECREN présente ses limite ; cas de rembobinage de l'alternateur de la PFOI de 1.5MVA et de l'alternateur de la société HENRI FRAISE Fils et Cie de 2.25MVA. Alors, il fait nécessaire de faire l'audit technique de défaillance de la procédure, de la préparation, de la mise en œuvre de réparation des alternateurs de puissance supérieure à 1MVA.

DESCRIPTION

L'atelier Electricité de la SECREN offre une fourniture de prestation de rembobinage des moteurs et des alternateurs.

La procédure actuelle peut être formulée de la façon suivante :

- L'ALTERNATEUR EN ETAT DE MARCHÉ

Elle consiste à faire : des essais de l'alternateur ; des mesure et analyse des organes périphérique ; de relever des paramètres technique. . .

- ALTERNATEUR CRAME

Elle consiste : à relever des paramètres technique ; à l'étude de périphériques ; aux mesure de diamètre des fils émaillés, des câble, des cosses.

L'enlèvement des fils émaillés se fait par le feu.

DONNEES INITIALES

Sont données :

- La dépression de la marmite d'injection sous vide maxi est de -1[bar] ;
- L'entraxe maxi de l'équilibreur est de 2 [m] ;
- La température de fonctionnement de l'alternateur de la société HENRI FRAISE rembobinée est de 85[°C] à son régime à $\frac{3}{4}$ de la puissance, et celle de la PFOI présente un pique de 50[°C] au milieu de la génératrice des encoches alors que les bords sont à 30[°C].

TRAVAUX DEMANDES

1. Faire l'inventaire exhaustif des procédés de rembobinages des alternateurs.
2. Etablir un programme pour déterminer le nombre des spires, sections des fils émaillés et câbles de sortie à utiliser.
3. Faire l'étude propre de la défaillance de la dégradation des tôles magnétiques dues aux effets néfastes de la montée excessives de feu ou les effets néfastes de feu et celle de perte de puissance due à l'augmentation du courant de Foucault et fournir une solution de remplacement au procédé mentionné.

Encadreurs :

- RABE Tsirobaka
- ANDRIANANTENAINA
Max
- ANONDAHY Cyprien

REMERCIEMENT

En premier lieu, je te remercie toi Eternel mon Dieu“ car le jour où je t'ai invoqué, tu m'as exaucée .Tu m'as rassuré, tu as fortifié mon âme “. Psaume 138³

Je te remercie encore et toujours pour tous les grâces et amour, que tu me donne jusqu'à ce jour.

Je tien aussi à remercier, mes encadreurs tel que M.RABE Tsirobaka, ANDRIANANTENAINA Max et M.ANONDAHY Prudence Cyprien de Atelier Electricité de la Société SECREN Sa ; sans qui ce travail ne serais pas accompli tel qu'il est.

Je tiens également à remercier la société SECREN Sa qui à rédigé ce sujet et rendu possible sa réalisation grâce à monsieur Pamphile de l'atelier électricité de la SECREN SA.

Les expressions de mes sincères gratitude vont aussi à tous les enseignants de l'Ecole Supérieure Polytechnique Antsiranana qui ont fait preuve de bienveillance durant notre formation.

Mes sincère remerciement au président et aux membres du jury qui on accepté d'examiner ce travail et d'y porter leur jugement.

Mes vifs remerciements vont aussi à ma mère, mes proches parents, ma femme, mes enfants, mes frères et sœur, en particulier Talenta et à mes amis pour leurs aides pour l'accomplissement de ce travail et pour leur sacrifice dans tous les moments où j'avais besoin d'eux.

Je remercie aussi mes collègues et promotion qui ont su créer une ambiance fraternelle durant toutes nos formations et je n'oublie pas l'association TO.MI.MI pour toute ambiance durant mes séjours à l'université d'Antsiranana.

En fin je vous remercie, vous lecteur pour avoir pris en compte l'existence de ce travail.

Je n'ai ni or ni argent à vous donner, mais soyez sûr que je prierai notre Seigneur Eternel Dieu pour qu'Il vous rende aux centuples tous les efforts que vous avez dépensés pour moi durant la réalisation de ce travail car quiconque invoquera le Seigneur sera sauvé. Rom 10¹³.

Merci à tous.

Hobindriaka Tiaray RABEKOTO

INTRODUCTION

Les alternateurs, machines capables de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, comme toute être vivant, vieillissent avec le temps et alors nécessitent soins et maintenance.

La réparation de ces machines requiert certains nouveaux de connaissances et d'expérience. En effet, il existe des sociétés industrielles ou des bureaux d'étude spécialisées dans ce domaine société SECREN SA (ou Société d'Etude de Construction et de Réparation Navale) en est un exemple.

Comme son nom l'indique, la société est spécialisé dans les réparations et constructions naval, elle possède des ateliers qui ont chacun leur destination spécifique.

L'atelier électricité de la SECREN SA assure la mise en état des machines tournantes (à courant continu ou à courant alternatif) et des transformateurs. Pour cela, la société adopte un système de procédures qui lui sont propre.

Actuellement, ces procédures se trouvent défailtantes et dépassées. Alors, elle a proposé l'audit technique de leurs procédure de rebobinage des alternateurs pour des critiques constructive aboutissant à la présentions d'autres procédures qui seraient à jour.

Le but du présent travail, analyser charge étape de la procédure afin de trouver le « hic », de pouvoir étudie ses inconvénients et de trouver une ou des solutions de remplacement.

Pour arriver à cette fin, l'étude présente cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, exposer vues générales sur les machines électriques (tournants et statiques) afin d'avoir des connaissances globales sur ces dernières. Le deuxième chapitre fait sortir l'inventaire exhaustif des procédures de rebobinage. In s'agit, avant tout, de présenter les cas pratiques les plus fréquents des procédures de rebobinage existantes, puis de caractériser celle adoptées par la SECREN en vue d'une comparaison ultérieure. Le chapitre trois traiter l'étude propre de la défaillance de la procédure adopté par la SECREN et donne des propositions de solutions. Le quatrième chapitre est consacré sur le dimensionnement des machines synchrones. Et enfin, le dernier chapitre, est destiné au programme de calcul pour déterminer le nombre de spires, la section des fils émaillés.

Chap. 1 GENERALITES SUR LES MACHINES ELECTRIQUES

Une machine électrique est dispositif de transformation d'énergie d'une forme en une autre, l'une entre elles au moins étant de nature électrique.

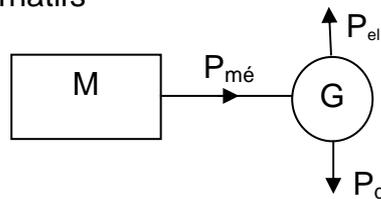
Le but de ce chapitre est d' décrire ce qu'est une machine électrique, depuis l'extérieur jusqu'à l'intérieur. Le dernier paragraphe est dédié plus particulièrement aux alternateurs car ce dernier type de machine électrique constitue le fond de notre étude dans ce travail.

1.1 Classification et constitution des machines électriques :

1.1.1 Classification

Suivant le genre de transformation opéré, les machines électriques peuvent être classées en trois catégories :

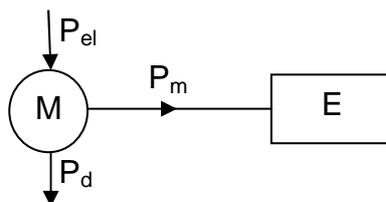
- Les génératrices : ce sont les machines qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. Les dynamos génèrent un courant continu, les alternateurs un courant alternatifs



M : Machine motrice ; **G** : Génératrice électrique ; **P_{el}** : Puissance électrique ; **P_{méc}** : Puissance mécanique ; **P_d** : Pertes .

Fig. 1.1 : Fonctionnement d'une génératrice.

- Les réceptrices : celles-ci réalisent l'opération inverse, c'est-à-dire transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. Ce sont alors des moteurs électriques à courant continu ou alternatif (fig1.2) tournants ou linéaires.



M : Moteur électrique ; **E** : Organe entraîné.

Fig. 1.2 : fonctionnement d'une réceptrice.

- Les transformatrices : qui, tout en conservant à l'énergie la forme électrique, la rendent plus convenable à son transport et son utilisation ; les convertisseurs, tels que les convertisseurs de fréquence et les commutatrices modifient la nature des courants et tensions appliqués en convertissant, par exemple, des courants alternatifs en continus, ou vice versa (fig. 1.3) ; les transformateurs statiques ne modifient pas la nature des grandeurs alternatives d'entrée, mais en modifiant les niveaux à puissances pratiquement constante (fig.1.4)

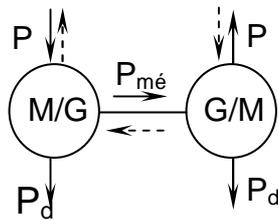


Fig. 1.3 : Fonctionnement d'un transformateur

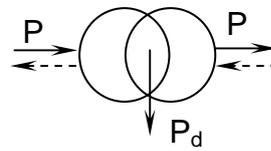


Fig. 1.4 : Transformateur statique

Cette conversion d'énergie s'accompagne des pertes apparaissant sous forme de chaleur dans la machine électrique.

1.1.2. Constitution d'une machine électrique.

- Du point de vue mécanique

En pratique, le terme « machine électrique » est réservé aux dispositifs opérant une conversion d'énergie électromécanique. Ils sont caractérisés par la présence d'un élément mobile, le rotor, tournant généralement à l'intérieur d'un élément fixe coaxiale, le stator, et séparé de ce dernier par un espace d'air, l'entrefer (fig. 1.3)

Par contre le terme « transformateur » désigne un appareil statique effectuant un transfert d'énergie électromagnétique sans travail mécanique. (Fig. 1.4)

- Du point de vue électromagnétique.

Une machine électrique comporte toujours un circuit magnétique et souvent deux circuits électriques. Entre le flux (dans le circuit magnétique) et les courants (dans les circuits électriques) s'exerce une action réciproque résultant des principes connus :

- Un courant électrique créateur de force magnétomotrice, engendre un flux (toutes machines),
- Un circuit parcouru par un courant électrique tend à embrasser le maximum de flux (principe des moteurs).
- Un flux variable embrassé par un circuit fermé y crée un courant électrique induit (principe des générateurs, et des transformateurs).

1.2 Lois physiques régissant le fonctionnement des machines électriques

1.2.1 Equations de Maxwell

Le comportement des machines dans un régime quelconque obéit aux lois de Maxwell. Compte tenu de la basse fréquence des phénomènes associés aux courants forts industriels (50 ou 60Hz) et l'absence de champ électrostatique important, il est licite toutefois de négliger le déplacement D (domaine quasi-statique) et de simplifier les relations sous la forme :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} , \quad (1.1)$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} , \quad (1.2)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 , \quad (1.3)$$

Ce système d'équations doit être complété par des relations spécifiques aux matériaux :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} , \quad (1.4)$$

$$\vec{E} = \rho \vec{j} , \quad (1.5)$$

1.2.2 Loi d'Ampère

Une bobine à N spires parcourues par un courant i provoque l'apparition d'un champ magnétique \vec{H} dont les lignes d'induction sont fermées sur elles mêmes et couplées avec la bobine inductrice. En appliquant à la relation (1.5) le théorème de Stocks, on obtient :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{S} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{A} = Ni = \theta \quad [A] \quad (1.6)$$

Par extension, si la ligne d'induction est couplée avec plusieurs bobines

$$\theta = \sum Ni, \quad (1.7)$$

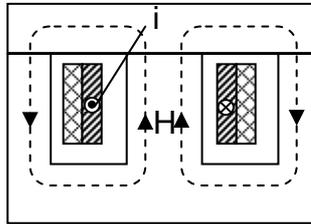


Fig. 1.5 Excitation d'un circuit magnétique de

θ présente la solénation ou force magnétomotrice (f.m.m) couplée avec le contour fermé C. la solénation exprime le potentiel magnétique nécessaire à la circulation du flux dans les circuits considérés.

En pratique, θ est calculée comme la somme des tensions magnétiques. En agissant entre les sections d'entrée et de sortie de tronçons du circuit magnétique assimilables à des tubes d'induction partiels. Pour un tronçon quelconque (fig. 1.6), on a :

$$U_m = \int_l H \cdot dS = \vec{H} \cdot \vec{l}, \quad (1.8)$$

avec
$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \phi / \vec{A} \quad (1.9)$$

ϕ désigne le flux circulant dans le tronçon de section normale \vec{A} et de longueur moyenne \vec{l} .

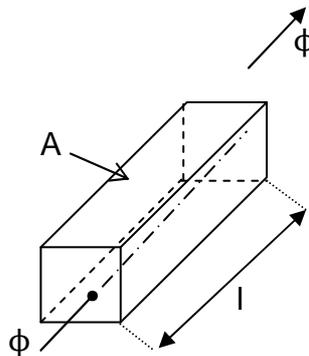


Fig. 1.6

La solénation nécessaire à l'aimantation du circuit se calcule comme suit :

$$\theta = \sum U_m. \quad (1.10)$$

La somme doit être effectuée le long d'une ligne d'induction fermée sur elle – même.

La loi d'Ampère sert au calcul de la caractéristique magnétique $\phi = f(\theta)$ d'un circuit.

1.2.3 Convention de signe des flux

La direction du champ \vec{H} créée par un courant i est définie par la règle du tire – bouchon. A un courant positif correspond à un flux positif circulant dans le sens déterminé par la règle précitée.

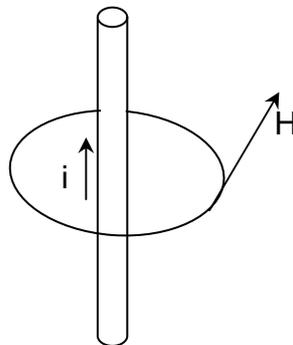


Fig. 1.7

1.2.4 Lois de Faraday et de Lenz

La variation du flux ϕ couplée avec une spire y induit une tension u_i :

$$u_i = +\frac{d\phi}{dt} : \text{tension induite ou interne} \quad (1.11)$$

Si le circuit est fermé, il apparait un courant induit dont le sens est tel qu'il tend à s'opposer à la variation de flux qui l'a faire naître (loi de Lenz).

Quelquefois, on met le signe «-» à la formule (1.15) pour rappeler cet effet d'opposition.

Si le flux varie à travers un circuit électrique à N spires, la tension induite aux bornes vaut :

$$u_i = + \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.12)$$

où φ désigne le flux totalisé couplé avec le circuit :

$$\varphi = \int_{S_e} B \cdot dA, \quad (1.13)$$

où S_e : surface développée s'appuyant sur le circuit électrique et délimitée par le conducteur.

Dans le cas d'un circuit constitué par une bobine à N spires on a comme flux totalisé

$$\varphi = N\phi, \quad (1.14)$$

Et la tension induite,

$$u_i = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.15)$$

1.2.5 Convention de signe de la tension induite

Si à l'instant considéré, la tension appliquée à une bobine est positive, la polarité instantanée des bornes est celle de la figure

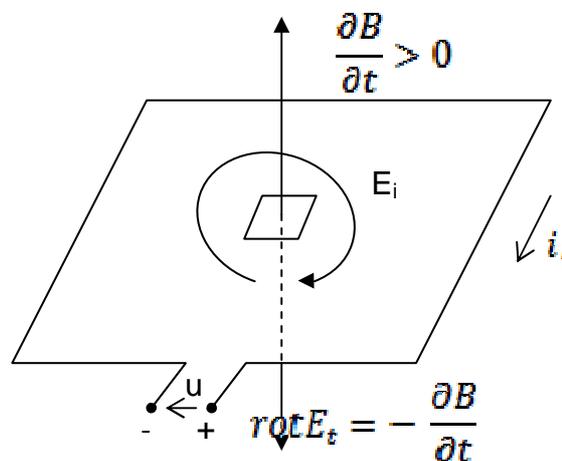


Fig. 1.8 :

A un accroissement positif au courant correspond un accroissement positif du flux. La tension induite u_i a un sens tel que le courant induit tend à s'opposer à la variation de flux qui lui donne naissance et sort par la borne +. La tension u et la tension induite u_i imposent donc respectivement aux bornes la même polarité instantanée.

1.2.6 Loi d'ohm généralisée

L'équation de tension d'un circuit de résistance R traversé par le flux totalisé φ s'écrit :

$$u = Ri + \frac{d\varphi}{dt} . \quad (1.16)$$

1.3 Pertes - Echauffement - Rendement

1.3.1 Pertes de puissance

Une machine électrique est essentiellement constitué par :

- des matériaux canalisant les flux (fer),
- des matériaux canalisant les courants (cuivre),
- des isolants interposés entre les précédant,
- parfois du semi s- conducteurs.
- Dans tous ces matériaux, une fraction de la puissance active reçue par la machine passe sous la forme calorifique :
 - dans le fer par Hystérésis et courants de Foucault ;
 - dans le cuivre par effet Joule ;
 - dans les isolants par surtout par hystérésis diélectrique ;
 - dans les semi – conducteurs par effet Joules et parfois par hystérésis diélectrique.
- D'autre part, l'entretien du flux dans les machines nécessite de la puissance magnétisante ou réactive. On l'appelle : consommation de puissance réactive.

1.3.1.1 Pertes de puissance active

- Pertes diélectriques : Un diélectrique de volume v , de permittivité ϵ , d'angle de perte ϕ , soumis à un champ électrique sinusoïdal de valeur maximale E_m et de fréquence f , consomme, surtout par hystérésis diélectrique, une puissance :

$$P = \pi v f E_m^2 \epsilon \theta \quad (1.17)$$

Mais ces pertes sont négligeables pour les isolants et les – semi – conducteurs quand ils sont utilisés dans les machines.

1.3.1.2 Pertes dans le fer

Elles se produisent dans tous les organes de machine où le flux est variable.

- Soit parce que le flux, de direction constante, est alternatif ;
- Soit parce que le flux constant tourne par rapport à l'organe considéré.

Elles sont proportionnelles au volume de fer dans lequel elles se produisent. Elles comportent

- Les pertes par courants de Foucault P_F

$$P_F = \frac{\pi^2}{6\rho} e^2 B_m^2 f^2 * V \quad [W] \quad (1.18)$$

où

e : épaisseur du tôle (m) ; V : volume (m^3) ; ρ : résistivité du tôle ; B_m : Valeur maximal de l'induction [T] ; f : Fréquence (Hz), soit par unité de volume :

$$P_F = \frac{\pi^2}{6\rho} e^2 B_m^2 f^2 \quad \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (1.19)$$

$\rho=22.10^{-8}$ [Ωm], si on exprime e en millimètres et en ramenant les pertes, non plus au mètre cube, mais en kilogramme de tôle, on donne à (1.23) la forme pratique :

$$P_F = K_f e^2 B_m^2 f^2 * 10^{-4} \quad (1.20)$$

K_f : coefficient variant de 3,7 à 17 quand la proportion de silicium dans le fer décroît de 4,5% à zéro.

- Les pertes par hystérésis : P_H qui comportent les pertes par hystérésis alternative et les pertes par hystérésis tournante

$$P_H = k_H B_m^2 * 10^{-2} \quad [W/kg] \quad (1.21)$$

k_H : désigne un coefficient qui dépend de la qualité de tôle et qui varie de 1,6 à 5 lorsque la proportion de silicium décroît de 4,5% à zéro.

1.3.1.3 pertes dans le cuivre

Ce sont les pertes par effet Joule dans les enroulements. Elles s'expriment

- En courant continu ou monophasé par la formule :

$$P_J = RI^2, \quad (1.22a)$$

R : résistance de l'enroulement considéré,

I : courant continu ou efficace dans cet enroulement ;

- En courant polyphasé par la formule :

$$P_J = nR_s I_s^2, \quad (1.22b)$$

R_s : Résistance d'un enroulement

I_s : Intensité (simple) dans cet enroulement

n : Nombre d'enroulement.

En courant triphasé ($n=3$), on écrit souvent cette formule sous la forme

$$P_J = \frac{3}{2} R_\alpha I^2, \quad (1.22c)$$

R_α : Résistance mesurée entre borne (bague),

I : Intensité composée (par fil extérieure).

On peut mettre aussi l'expression (1.22c) sous la forme

$$P_J = \rho \frac{l}{S} I^2 = \rho \frac{lS}{S^2} = \rho lS \left(\frac{l}{S}\right)^2 = \rho V J^2$$

$$P_J = \rho \frac{m}{d} J^2 \quad (1.22d)$$

Où ρ : résistivité du conducteur ; l : La longueur ; S : Sa section ; V : Volume du conducteur ; m : Sa masse ; d : Sa masse volumique ; I : Le courant qui le parcourt ; J : Densité du courant.

1.3.1.4 Pertes mécaniques :

Elles comportent les pertes par frottement des tourillons dans les paliers, les pertes par ventilation, les pertes par frottement des balais (sur les collecteurs ou les bagues).

- Les pertes par frottement des tourillons dans les paliers : elles dépendent de nombreux facteurs (perfection de l'usinage des coussinets et des tourillons, jeu entre ceux – ci, lubrification, etc....), c'est pourquoi le calcul exact est impossible.
- Pertes par frottement des balais qui ont pour expression

$$P = Fbv \quad (1.23)$$

Avec

P : force de pression des balais [N] ; v : vitesse tangentielle en [$m.s^{-1}$] ; b : coefficient de frottement.

- Pertes par ventilation : elles sont impossibles à calculer ; pour des machines rapides de 50[KW] et plus, elles varient de 1 à 30% et, pour des machines lentes de même puissance, de 0,5 à 2% de la puissance utile en pleine charge

1.4.1.5 Puissance réactive consommée

Le calcul est donné par la formule

$$Q = \frac{B_m^2 v \pi f}{\mu}, \quad (1.24)$$

où

B_m : valeur maximale de l'induction sinusoïdale ; f : Fréquence ; v : Volume ;
 μ : perméabilité absolue.

1.3.2 Echauffement

Les pertes de puissance active constituent une transformation d'énergie mécanique ou électrique en énergie calorifique, elles déterminent un échauffement des divers organes de la machines. Il faut alors prévoir que pour un régime déterminé de fonctionnement de la machine, chacun de ces organes atteindra une température limitée.

Température limite. Calcul. Détermination expérimentale.

- En désignant par θ la différence entre la température limite d'un organe de la machine et le milieu extérieur, S la surface de refroidissement, p les pertes de puissance dans cet organe on a :

$$p = KS\theta \quad [W] \quad (1.25)$$

K : coefficient de dissipation de la chaleur ;

S étant exprimé en m² et K désignant le nombre de watts dissipés par m² de surface de refroidissement et par degré d'élévation de température.

Cette équation permettrait de calculer la température limite si on connaissait K ; mais ce coefficient de dissipation de la chaleur échappe au calcul (1). On peut seulement l'évaluer.

C'est pourquoi, il est nécessaire de faire des essais d'échauffement

1.3.3 Rendement d'une machine

1.3.3.1 Rendement vrai et rendement approché

Désignons par P_a la puissance absorbée, P_u la puissance utile ou la charge, p l'ensemble des pertes $p = P_a - P_u$, on a :

- Rendement vrai :

$$\eta_{vrai} = \frac{P_u}{P_a} = 1 - \frac{p}{P_u + p} \quad (1.26)$$

Parfois, il est commode d'exprimer η en fonction des pertes en p pourcent de la puissance utile. Les pertes p étant faible par rapport à P_u , on peut écrire :

$$\eta_{vrai} = 1 - \frac{p}{P_u} \quad (1.26a)$$

$$\text{d'où } \eta_{vrai} = 100 - \frac{p}{P_u} * 100 \quad (1.26b)$$

- Rendement approché

Dans la plupart des machines électriques, une partie des pertes de puissance échappe à toute mesure commode. En désignant par p' l'ensemble des pertes mesurable, on a :

$$\eta_{approché} = \frac{P_a - p'}{P_a} = 1 - \frac{p'}{P_u + p'} \quad (1.27)$$

$$\text{où } \eta_{approché} = 100 - \frac{p'}{P_u} * 100 \quad (1.27b)$$

1.3.3.2 Mesure de rendement

Voici quelques méthodes de mesure de rendement :

- 1- Méthode indirecte des pertes séparées : On mesure séparément les pertes à vide et les pertes (mesurables) dues à la charge
- 2- Mesure par l'échauffement d'un fluide : on mesure le débit d'un fluide de refroidissement et l'échauffement de ce fluide.
- 3- Méthode directe : On mesure séparément la puissance absorbée et la puissance fournie
- 4- Méthode d'opposition : par deux machines identiques montées en opposition, l'une marchant en générateur, l'autre en moteur. Méthode excellente mais rarement possible.

1.3.3.3 Facteur de charge optimal : à l'instant t .

C'est le rapport $\eta = \frac{\text{puissance apparente à l'instant } t}{\text{puissance apparente nominale}}$

Ce facteur de charge est un paramètre technique. En désignant par P_v les pertes à vide (pertes constantes) et par P_c les pertes Joule dans le cuivre à la puissance nominale, le rendement s'écrit

$$\eta = 1 - \frac{P_v + n^2 P_c}{nP_n \cos \varphi + P_v + n^2 P_c} \quad (1.28)$$

Où P_n : est la puissance nominale et la condition de rendement maximal $P_v = n^2 P_c$

Conduit à l'expression du facteur de charge optimal :

$$n(\text{optimal}) = \sqrt{\frac{P_v}{P_c}}. \quad (1.29)$$

Chap. II : INVENTAIRE EXHAUSTIF DES PROCEDURES DE REBOBINAGE

La société SECREN Sa adopte une procédure que l'on peut qualifié de particulière en ce qui concerne la mise en état des alternateurs dans leur atelier électricité. Il s'agit donc, dans ce chapitre, de caractériser cette procédure afin d'étudier les failles et ses avantages dans le prochain chapitre et de proposer une solution plus adéquate.

2.1 Caractéristiques de la procédure générale de rebobinage des alternateurs.

2.1.1 Quelques définitions

- Rebobinage :

Mise en marche d'une machine électrique cramée, en remplaçant ou en dimensionnant les bobines usées sans modifier les paramètres mécaniques de la machines.

- Conducteurs actifs :

La partie de l'enroulement qui se trouve dans l'encoche ;

- Partie frontale (ou développante) :

La partie de l'enroulement qui se trouve dans l'air.

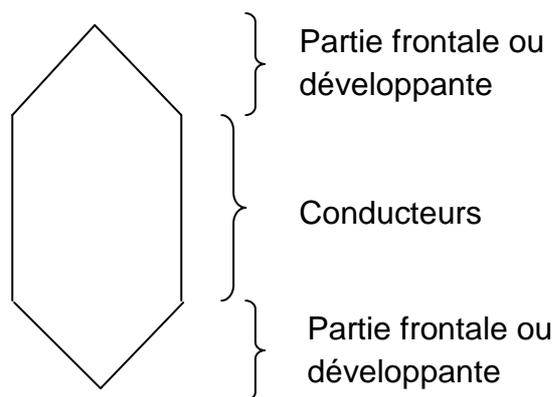


Fig. 2.1 : Schéma montrant les deux parties d'un enroulement

- Spire : deux conducteurs en série ;

- Bobines : une ou plusieurs spires en série ;
- Groupe de bobines : une ou plusieurs bobines en série ;
- Phase : connexion de groupes de bobines entre eux ;
- Coefficient de bobinage : coefficient traduisant une diminution de la f.é.m.

2.1.2. Notation :

Notons par :

k_w : le coefficient de bobinage ; k_j : le coefficient de distribution ; k_r : Le coefficient de répartition ; β : le pas relatifs ; γ : Le pas de l'enroulement ; τ : le pas polaire ;

μ : le numéro d'harmonique ;

N : le nombre d'encoches par pole et par phase ; noté $q = \frac{Z}{2pm}$;

Si q entier $N = q$;

Si q tractionnaire, on écrit $q = b + \frac{c}{d}$;

où b, c, d entiers et c et d premier entre eux $N = dq$;

2.1.3 Type de bobinages :

On peut citer :

- Les bobinages réguliers qui sont composés par les bobinages à pas diamétrale, les bobinages à pas raccourci, les bobinages à pas rallongés.
- Les bobinages non réguliers qui sont le bobinage à trous et le bobinage à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase.

2.1.4 Caractérisation

Lors d'un bobinage d'une machine synchrone (car c'est de cela qu'il est question dans ce chapitre), c'est le nombre de spires qu'il faut connaître car c'est ce dernier qui détermine le nombre de bobines. En machines à courant alternatif, les enroulements statoriques sont presque exclusivement imbriqués.

2.2 Procédure de rebobinage d'un alternateur

On peut rencontrer, lors de réfection des enroulements statoriques des machines à courant alternatif (asynchrones ou synchrones) les cas typiques suivants.

Cas 1 : l'enroulement du stator est partiellement ou totalement détruits, mais ses restes sont conservés et permettent de déterminer le schéma de l'enroulement, le nombre de spires, le pas et la dimension de la section du conducteur.

On demande de rétablir la machine avec conservation de toutes ses données : tension ; vitesse de rotation et puissance indiquées sur la plaque signalétique.

Dans ce cas, la résolution du problème la plus juste et la plus naturelle sera le rétablissement de l'enroulement avec conservation du nombre de spires, des dimensions des conductrices, et autres données : types, schémas de connexions, etc.

A première vue, il semble qu'on ne doit pas du tout parler de calcul dans ce cas. Mais, en réalité, il apparaît quelquefois impossible d'insérer dans l'encoche cette quantité de conducteurs avec ces dimensions avant le rebobinage.

Ceci peut avoir lieu, soit parce que, lors de la première fabrication, on avait un conducteur avec une isolation plus mince que celui dont on dispose, soit parce que l'isolation d'encoche était plus épaisse que celle qui doit être utilisée. De plus, dans l'usine de production de la machine furent des méthodes et matériels quelconques non disponibles dans les conditions de réparation, par exemple la mise en place des enroulements par machine (automatique). Cette raison peut encore se produire car on ne dispose pas de conducteurs à dimensions voulues. Alors, on est contraint de :

- soit de diminuer le nombre de conducteurs dans l'encoche,
- soit de diminuer les dimensions des conducteurs. Pour que chaque écart des données initiales soit techniquement admis, il doit s'accompagner de calcul pour pouvoir vérifier ses conséquences éventuelles.

Cas 2 : les conditions sont identiques que précédemment, mais on exige de robinet la machine à une autre tension tout en conservant toute autre donnée (vitesse de rotation, puissances, etc.).

Ici, la nécessité de calcul est évidente. Lors du rebobinage des machines plus ou moins puissantes à faible tension et ayant de faibles nombres de conducteurs dans l'encoche, ces nombres s'exposant mal au recalcul à une nouvelle tension, il peut devenir nécessaire de changer le schéma de l'enroulement, ou bien son type même.

Cas 3 : Nous sommes dans les mêmes conditions que pour les cas précédents, mais il faudra rebobiner la machine à une autre vitesse de rotation.

Ce cas exige déjà le recalcul total de la machine ; les anciennes données de l'enroulement n'ont plus de sens. La puissance de la machine ne se conserve pas, et la question sur la tension est du second plan car il est indifférent lors du recalcul, à quelle tension il faudra mener le nouveau calcul. La valeur approximative de la puissance dans la nouvelle vitesse de rotation peut être déterminée dans la base de la comparaison à la puissance lors de l'ancienne vitesse de rotation.

Cas 4 : L'ancien enroulement n'est pas conservé, et ses données sont inconnues ; mais la machine possède une plaque signalétique.

On demande de rétablir l'enroulement de façon que la machine vérifie les données de la plaque signalétique.

Si l'on compare au cas précédent, le problème du calcul se complique ici : on demande de trouver ces relations qui ont été posés dans la base du calcul de la machine lors de sa fabrication, ce qui n'est pas toujours possible. C'est pourquoi il faudra, à priori, stipuler la puissance peut se pas être atteinte. Il faudra juger satisfaisante la résolution du problème si la nouvelle puissance atteint 82 et 90% de l'initiale.

Cas 5 : Les conditions sont identiques à celles du cas précédent, mais la plaque signalétique fait défaut : c'est pourquoi les données de la machine sont inconnues.

Evidemment, ce cas est le plus compliqué. Le problème de calcul peut alors être posé de deux façons :

- a) On demande de calculer la machine à une puissance donnée pour une vitesse de rotation donnée, c'est-à-dire il faudra avant tout déterminer si elle peut être réalisée avec cette puissance ;
- b) On exige de déterminer la puissance maximale qui peut être obtenue de la machine pour une vitesse de rotation donnée.

La deuxième mise en situation du problème est sans doute plus compliquée que la première, et il est impossible d'en avoir une résolution précise sans une vérification expérimentale ; au seul moyen d'essai de la machine fabriquée selon le calcul qu'on peut finalement déterminer sa puissance, le calcul ne pouvant donner que sa valeur approximative.

Bien sûr, les divers cas qui peuvent se rencontrer dans la pratique ne se limitent pas à ces cinq suscités, mais il représente les cas les plus caractéristiques.

En ce qui concerne le détail des calculs, ils seront traités plus loin dans le chapitre 4.

2.3 Imprégnation et séchage des enroulements

2.3.1 Imprégnation

Au cours d'exploitation, l'isolation des machines électriques sortent d'usage à cause de la diminution de sa rigidité électrique sous l'effet de l'humidité, du vieillissement thermique ou de l'usure mécanique.

La fiabilité de fonctionnement des enroulements est déterminée en grande partie non uniquement par les propriétés des matériaux isolant utilisés, mais également par la qualité de leur imprégnation à l'aide des vernis électro isolants.

L'imprégnation retarde les processus de vieillissement thermique et l'humidité des matériaux isolants en remplissant les interstices et empêche la pénétration de l'humidité.

La présence de l'humidité dans les matériaux isolants non seulement fait diminuer la rigidité électrique de l'isolation et sa résistance, mais empêche aussi la pénétration profonde des vernis d'imprégnation dans les interstices des pièces d'enroulement. C'est pourquoi les processus d'imprégnation renferment en soi le séchage de l'enroulement juste avant l'imprégnation. Dans le cas où l'enroulement est fait de matériaux résistant à l'humidité, on ne peut pas mener le séchage de l'enroulement avant son imprégnation.

Le choix de température et le temps du séchage préliminaire de l'enroulement dépendent de l'utilisation, pour sa réalisation, des matériaux isolants, de leur rigidité thermique, et doit être tel qu'on peut éviter un vieillissement accéléré et la déformation de ces matériaux. Plus est élevée la classe d'isolation des matériaux de l'enroulement, plus est élevée la température du séchage préliminaire de l'enroulement.

Par exemple, pour une augmentation de la température du séchage préliminaire de 110 – 120°C à 130 – 140°C, la durée de séchage peut être réduite de 8 à 4 heures.

D'habitude, on réalise le séchage avant imprégnation dans des fours spéciaux pendant 3 – 6 heures dans une température 105 – 130°C pour des enroulements à matériaux des classe A, à la température 120 – 140°C pour la classe E, 120 – 150°C pour la classe B, 120 – 180°C et 180 – 220°C pour H .

On imprègne les enroulements séchés dans des vannes d'imprégnation spéciales.

On utilise souvent des vernis à huile pour l'imprégnation des enroulements.

Avant l'imprégnation de l'enroulement par voie d'immersion dans un vernis, il faut le chauffer jusqu'à une température 60 – 70°C.

Pour une première imprégnation de l'enroulement préalablement chauffé le, temps d'immersion se réduit à 10 – 15mn. En imprégnant les enroulements des machines électriques, les encoches doivent être verticales ou oblique pour que l'air puisse mieux presser le vernis.

Il est nécessaire, lors de l'imprégnation des enroulements, de vérifier souvent la viscosité du vernis.

2.3.2 Séchage

Après imprégnation, on fait sécher les enroulements dans des fours spéciaux par de l'air surchauffé.

Dans une première période de séchage (1 – 2 heures après le début), quand l'humidité contenue dans les enroulements s'évapore, on fait sortir du camera dans l'atmosphère l'air déjà utilisé. Dans les autres heures de séchage, on retourne dans le camera une partie de l'air surchauffé déjà utilisé contenant une faible quantité d'humidité.

La température maximale dans le camera (ou fours) est de 200°C, le volume utile est défini par les gabarits des pièces à réparer.

On fait un contrôle continu de la température dans le camera de séchage et de l'air qui en sort au cours du séchage. Le temps de séchage dépend de la construction et du gabarit des éléments des matériaux isolants utiliser dans les enroulements, des propriétés du vernis d'imprégnation, etc.

On divise en deux stades le processus des séchages : réchauffage des enroulements pour éloigner les dissolvants du vernis et le grattage de pellicule de vernis. Dans la première étape, on chauffe l'enroulement à la température 100 – 110°C. On élève la température jusqu'à 130 ou même à 140°C dans la 2^{ème} étape.

2.4 Contrôle et essais lors du rebobinage des machines électriques

Il apparait nécessaire, lors du rebobinage des machines électrique, d'effectuer toute une série d'essais différents :

- Essais avant réparation :

On effectue ces essai au cas où l'on n'arrive pas, par simple vue ou regard, à définir le caractère et la raison du défaut, ou bien le caractère et le volume de la réparation à réaliser ;

- Essais intermédiaires :

Ils s'effectuent tout au long du processus de réalisation du rebobinage pour s'assurer de la haute qualité de réparation ;

- Essais après réparation : destinés pour la vérification de la qualité de la machine électrique réparée.

Pour effectuer les essais suscitées, on utilise à part les appareils de mesure habituels (voltmètre, ampèremètre, wattmètre, etc....), des appareils et installations spéciaux parmi lesquels on peut citer : pont universel de résistances, méga ohmmètre, etc....)

2.5 Caractéristique de la procédure adoptée par la SECREN :

2.5.1 Les étapes de la procédure :

* cas 1 : Pour les machines en état de marche (entretien)

Il s'agit de faire la visite de la machine et de vérifier l'état de la machine.

* cas 2 : Pour les machines cramées (rebobinage).

Il faut noter que la société, quelque soit le cas, comme ceux qui sont cités dans 2.2, fait toujours l'objet d'étude sur les machines à rebobiner.

1. Repérage des fils de sortie et des flasques,
2. Démontage de l'ensemble,
3. Mesure des longueurs de la développante (coté connexion, coté opposée)
4. Brulure d stator au feu de bois : la durée de cette étape dépend du gabarit du stator mais en moyenne, elle est de 3 à 4H de temps.
5. Comptage des spires ;
6. Enlèvement des anciens fils de bobinage ;

7. Nettoyage des encoches avec produit (white spirit) ;
8. Confection de gabarit de bobines et isolants
9. Pose des bobines et connexion
10. Vernissage (vernis d'imprégnation)
11. Etuvage à 120°
12. Grattage des vernis au niveau des encoches
13. Fixations des cosses de fils de sortie
14. Remplacement des roulements
15. Contrôle 'isolement (entre phases/ masse)
16. Remontage.
 - Rotor :
 1. Relevé de schéma de bobinage
 2. Enlèvement des fils de bobinage
 3. Et les étapes qui suivent sont identiques aux précédentes sauf qu'on ne brule pas le rotor.

Les détails de ces procédures se trouvent dans l'annexe.

2.5.2 Avantage de cette procédure

L'avantage de la procédure est, d'après eux, le fait de brûler le stator est rapide, donc il y a gain de temps et le nombre de productions est rentable pour la société.

2.5.3 Inconvénients de la procédure

- la température du feu de bois est totalement inconnue,
- souvent la carcasse de la machine est en fonte alors que les tôles magnétiques sont en fer, d'où la fonte ne peut pas supporter la dilatation des tôles magnétiques vu la durée de chauffage de ces derniers.
- la société pense surtout à la livraison et au nombre de productions donc, quelquefois, il n'y a pas lieu d'essai pour les machines rebobinées.
- La méconnaissance de la conséquence du fait de brûler le stator constitue aussi la faille de la procédure.

2.6 Résumé

La SECREN emploie presque la même procédure adoptée par d'autres sociétés ou bureaux d'études, en ce qui concerne le rebobinage des machines électriques sauf que pour l'enlèvement des anciens fils, elle brûle le stator ;

La procédure est avantageuse du côté production car elle est rapide et permet de gagner du temps, mais celle-ci présente des failles au niveau des tôles magnétiques. Et c'est cela qui est l'objet du prochain chapitre.

CHAP 3 ETUDE PROPRE POUR LA DEFALLAINCE DE LAPROCEDURE ADOPTEE PAR LA SECREN

Le chapitre précédent a montré que des défauts se présentent sur les caractéristiques de la procédure adoptée par la société SECREN en ce qui concerne le rebobinage des alternateurs.

Dans ce chapitre, nous allons chercher les failles ou les défauts de cette procédure pour les machines rebobinées et allons avancer un propos de procédure a résultat plus satisfaisant.

3.1 Présentation du problème

La société SECREN SA, à part la construction et la réparation navale s'ouvre aussi sur les alternateurs ou moteurs dans les travaux divers. D'ailleurs, c'est de ce dernier cas que ce sujet a été proposé.

La société PFOI a fait rebobiner à la SECREN son alternateur de 1,5[MVA] mais après livraison celle-ci ce présentait un pic de température égale à 50°C au milieu de la génératrice des encoches alors que les pourtours étaient à [30°C].

La société Henri Fraise aussi a fait de même avec leur alternateur de 2,25[MVA] et après rebobinage, on constaté que l'alternateur, à son régime de $\frac{3}{4}$ de la puissance, présentait une température de fonctionnement à 80[°C]. Alors le problème se pose et la question est en suspens s'il y a une faille ou non dans la 1^{ère} procédure et la seconde procédure remise en état des alternateurs à l'atelier Electricité de la SECREN.

3.2 Rappel de la procédure

La procédure actuelle peut être résumée comme suit :

3.2.1 Pour les alternateurs en état de marche

La procédure consiste à faire des essais de comportement en charge de l'alternateur des mesures des relevés et analyse des organes périphériques (accessoires) ; de relever les paramètres techniques pour savoir des valeurs avant travaux.

3.2.2 Pour les alternateurs cramés

Elle consiste à relever les paramètres techniques, à l'étude des périphériques aux mesures de diamètres des fils émaillés, des câbles, des cosses... Et l'enlèvement des fils émaillés se fait par le feu.

3.3 Etude propre de la procédure

Dans ce paragraphe, il ne sera pas question d'étudier les étapes de la procédure une par une ; mais nous allons sauter directement sur l'étape où l'on utilise le feu, c'est-à-dire à l'enlèvement des fils émaillés car c'est le centre de notre problème.

3.3.1 Influence de la température sur la résistivité

La résistivité des métaux purs et de nombreux alliages augmente avec la température. Pour des températures voisines de la température ambiante et jusqu'à quelque centaines de degrés, la variation est sensiblement linéaire et on peut écrire :

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha' (\theta - \theta_0)] \quad (3.1)$$

α' : Coefficient de température de la résistivité,

ρ_0 : Résistivité à la température initiale θ_0 .

Ce coefficient dépend de l'origine considéré. Si $\theta = 0^\circ\text{C}$ la relation (3.1) devient

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_\theta^\theta) \quad (3.2)$$

Où α_θ : coefficient de température de la résistivité ;

θ : Température en [$^\circ\text{C}$].

Le coefficient α_θ est de l'ordre de grandeur de $4.10^{-3} /^\circ\text{C}$ dans les métaux purs, souvent un peu plus faibles dans les alliages.

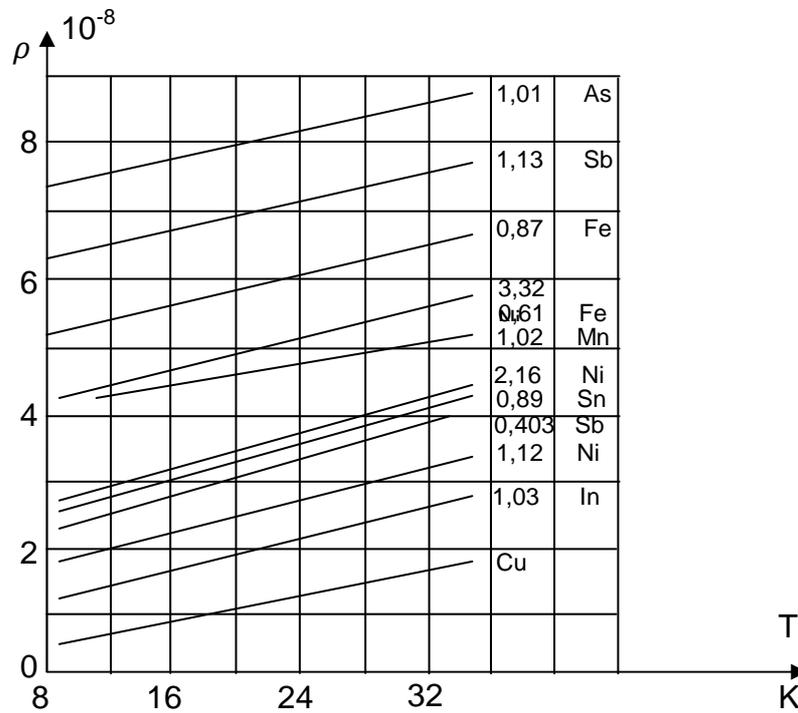


Fig. 3.1 Résistivité du cuivre et de quelques-uns de ses alliages, en fonction de la température. Les pourcentages des éléments dissous sont donnés devant leurs symboles chimiques.

On constate sur la figure 3.1 qu'il suffit de 1% d'arsenic dans le cuivre pour augmenter la résistivité de ce métal d'un facteur de 5 à 20°C et 17 à 173°C. D'une façon plus générale, il faut retenir que la présence de certains éléments en tant qu'impuretés, peut avoir une incidence énorme sur la résistivité.

3.3.2 Effet sur les machines

3.3.2.1 Pertes Joule

La formule donnant les pertes Joule est : pour une machine à courant triphasé

$$P_j = \frac{3}{2} R_\alpha \sigma^2 ,$$

R_α : résistance mesurée entre bornes.

$$\text{avec } R_\alpha = \rho \frac{l}{S} ; \tag{3.4}$$

ρ : résistivité du conducteur ; l : sa longueur ; S : section du conducteur.

Les pertes Joule peut s'écrire aussi :

$$P_J = \rho \frac{l}{S} I^2 = \rho \frac{l_S}{S^2} I^2 = \rho l_S \left(\frac{l}{S}\right)^2 = \rho V J^2 = \rho \frac{m}{\vartheta} j^2 \quad (3.5)$$

Où V : volume du conducteur ; m : sa masse ; ϑ : sa masse volumique ; I : Le courant qui le parcourt ; J : La densité du courant ;

Supposons que J, m, ϑ sont fixes et que ρ varie en fonction de la température (ce qui est d'ailleurs le cas).

En brûlant le stator à une température θ_1 quelconque, on augmente la résistivité de ses conducteurs à ρ_1 .

En effet,

- Pour une température θ (ambiante) ;

$$\rho(\theta) = \rho_0 [1 + \alpha\theta],$$

ρ_0 : Résistivité à la température $\theta = 0^\circ\text{C}$

- Après brûlure on a la température θ_1 , et résistivité ρ_1

$$\rho_1(\theta) = \rho_0(1 + \alpha\theta_1)$$

$$\frac{\rho_1(\theta_1)}{\rho(\theta)} = \frac{1 + \alpha\theta_1}{1 + \alpha\theta}$$

Pertes Joules correspondantes

$$P_J = \rho(\theta)k$$

$$P_{1J} = \rho_0(\theta)k$$

Avec $k = \frac{m}{\vartheta} J^2$

$$P_J(\theta) = \rho_0(1 + \alpha\theta)k; \quad (3.6)$$

$$P_{1J}(\theta_1) = \rho_0(1 + \alpha\theta)k; \quad (3.7)$$

En divisant membre à membre les égalités (3.6) et (3.7), on obtient :

$$\frac{P_{1J}(\theta_1)}{P_J(\theta)} = \frac{1 + \alpha\theta_1}{1 + \alpha\theta} P_J(\theta) \quad (3.8)$$

$$\rightarrow P_{1J}(\theta_1) = \frac{1 + \alpha\theta_1}{1 + \alpha\theta} P_J(\theta)$$

Il y a augmentation certaine des pertes Joules, caractérisée par le rapport $\frac{1 + \alpha\theta_1}{1 + \alpha\theta}$.

Rappelons que dans une machine électrique, ce sont les conducteurs qui sont le siège des pertes Joules et les pertes par effets Joules de la relation (3.8) doivent exister au moment où la température augmente.

Or après brulure par feu de bois du stator, la SECREN enlève les conducteurs endommagés et nettoie le stator avec du white spirit.

3.3.2.2 Pertes dans le fer

- Pertes par courants de Foucault

Si nous considérons (1.18) et (1.19), les pertes par courants de Foucault s'expriment en fonctions de la résistivité du tôle magnétique.

$$P_F = \frac{\pi^2}{6\rho} e^2 B_m^2 f^2 * V, \quad [W]$$

$$\text{Où } P_F = \frac{\pi^2}{6\rho} e^2 B_m^2 f, \quad [W/m^3].$$

Dans ces formules, il est important de remarquer que la résistivité ρ se trouve au dénominateur ; pour une quelconque augmentation de celle-ci, il y a diminution des pertes de puissances par courants de Foucault.

- Pertes de puissance par hystérésis

La formule est donnée par (1.25)

$$P_H = k_H B_m^2 * 10^{-2} [W/kg]$$

k_H : coefficient dépendant de la qualité de tôle ou plus précisément, de la teneur en silicium.

Et comme dans le cas des pertes de puissance par courants de Foucault, le fait de brûler le stator n'affecte pas ces pertes lors de son rebobinage, car ce dernier sera nettoyé.

3.3.2.3 Pertes diélectriques

Ces pertes sont souvent négligées car l'isolation des matériaux que ce soit magnétique ou conducteur est déjà bien assurée par le constructeur lors de la conception de la machine.

La formule déterminant ces pertes est :

$P = \pi V f E_m^2 \epsilon \theta$; θ : Angle de pertes ; ϵ : Permittivité ; E_m : Valeur maximale du champ électrique ; f : Fréquence ; V : Volume du diélectrique

En brûlant le stator, il se peut qu'on transforme les caractéristique des isolants se trouvant entre les tôles magnétiques qui sont, d'ailleurs, faites pour diminuer les pertes de puissance par hystérésis ou par courants de Foucault car l'action de la température sur les isolants donne lieu à deux sortes de phénomènes :

- 1- Des transformations, en général, purement physiques, immédiates et réversibles (ramollissement, fusion, diminution de la rigidité diélectrique, etc.).
- 2- Des transformations lentes et irréversibles dues à des réactions chimiques se traduisant par une dégradation progressive des propriétés physiques. Ces dernières transformations due é l'action prolongée de la température sont cumulatives et d'autant plus rapides que la température est plus haute.
- 3- En effet, la destruction des isolants provoquerait, on ose-t-on dire, la dé-isolation des tôles magnétiques empilées entre elles, ce qui se traduira comme si on a un bloc unique de tôles magnétiques, d'où l'augmentation de l'épaisseur des tôles magnétiques et donc l'augmentation des pertes de puissance par courants de Foucault.

4-

3.4 Proposition des solutions

Voici quelques propositions de solutions de remplacement :

- Il est nécessaire de connaître la température limite de la machine : la valeur de cette température est donnée par la formule (3.9) ou elle se détermine par essai avec le constructeur lors de l'achat de la machine ;
 - Pour un organe de la machine

$$p = k\theta S ; \quad (3.9)$$

Avec p : Les pertes de puissance dans cet organe, θ : Différence de température de l'organe et du milieu extérieur, S : Surface de refroidissement, k : Coefficient de Newton.

D'habitude, cette température est donnée par l'utilisateur (propriétaire) de la machine car celle-ci se détermine surtout par essais d'échauffement.

- Connaitre la classe d'isolement de la machine qui donne les renseignements sur la température limite des isolants.
- Les étapes à suivre pour le rebobinage :
 - 1- Repérage des flasques et des fils de sortie : nécessaire pour ne pas se perdre lors du remontage car certaines machines n'ont pas de flasques réversibles ;
 - 2- Démontage de l'ensemble (stator, rotor) ;
 - 3- Mesure de longueur des développantes ;
 - 4- Enlèvement des conducteurs soit par (après comptage des spires) :
 - ❖ Brulure mais par utilisation d'un chalumeau : il s'agit de bruler une par une les encoches du stator,
 - ❖ Utilisation des fours à température réglable, pour contrôler la température afin de ne pas dépasser la limite ;
 - ❖ La classification des isolants suivant la température limite

Tableau 3.1 : Classe des isolants avec leurs températures limites.

Classe	Température limite [°C]	Matériaux et exemple
Y	90	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Coton, soie, papier, fibres de cellulose, etc. ➤ Employés sans imprégnant
A	105	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Matériaux précédentes convenablement imprégnés d'un vernis ou immergés dans un diélectrique liquide, bois bakelisé, fils emailés aux vernis gras
E	120	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Produit précédente mis à l'abri de l'air, résines polyester, films de triphthalation fils émailés au format de plyèlmile.
B	130	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Isolant à base de produits organiques tels que mica, amiante, fibre de verre, aggloméré par des produits organiques tels que asphalte ou gomme laque.
F	155	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Produits tels que les précédents mais agglomérés avec du résines ayant une meilleure stabilité thermique (alkydes, silicone alkyde, époxys).
H	180	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Produits précédents pais aggloméré avec des résines silicones. Elastomères de silicones.
C	>180	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Matériaux liants entièrement inorganiques, En outre poltétraflurethylène.

- ❖ Utilisation des liquides spéciale pour enlever les vernis (imprégnation ou coup de pinceau) ;
- 5- Confection des gabarits des isolants et de bobines,
- 6- Pose des bobines et connexion,
- 7- Contrôle d'isolement avant imprégnation.
- 8- Vernissage et imprégnation,
 - ❖ Soit par spray séchant l'air n'est pas concilié car il s'agit d'une protection en surface.
 - ❖ Soit par imprégnation séchant à l'air :

Cette technique, généralement de classe B, a l'avantage de ne pas nécessiter un séchage au four. L'imprégnation peut être appliquée au pinceau ;

- ❖ Soit par imprégnation avec séchage au four :

Il faut immerger entièrement les bobines, cette immersion durera jusqu'à ce qu'il y ait plus de bulles d'air sortant de bain. Une fois sortie du bain, la machine sera séchée à 130°C durant plusieurs heures.

A la sortie du four et pendant qu'il est chaud, on gratte l'imprégnation inutile.

9- Test dynamique à basse tension :

Il s'agit d'appliquer une faible tension à la machine (30% à 50% de la tension nominale pour câblage en triangle).

10- Entretien (remplacement des enroulements, peinture de la machine, etc.

11- Remontage de l'ensemble.

- Faire une fiche technique de la machine afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec les anciennes données.

3.5 Technologie de réparation des enroulements des machines électriques.

Dans cette partie du travail, nous allons décrire les modes de réparation des stators et des rotors par voie de démontage total des enroulements endommagés et de leur remplacement par de nouveau. La longue pratique d'exploitation des machines électriques réparées à enroulements partiellement réparés, en particulier à enroulements à bobines souples, a montré que ces machines se retrouvent assez rapidement encore hors d'usage. Ceci est d'habitude, dû à la destruction au cours de la réparation de l'intégrité de l'isolation de la partie non préalablement endommagée de l'enroulement qui ne nécessite pas de réfection, ainsi qu'à la non – conformité de la qualité et de la durée de vie des ancienne et nouvelle isolations. C'est pourquoi il est plutôt recommandé, lors de la réparation des machines électriques à enroulement, on remplace uniquement les bobines endommagées dans certains cas où l'on répare des machines suffisamment puissantes avec des enroulements réalisés en fils à section rectangulaire.

Si l'on se imite aux ateliers de rebobinage de petite et de moyenne tailles, souvent il appartient au seul rebobineur de réaliser le complexe des travaux de réparation de l'enroulement de la machine électrique. Dans c'e cas, avant le début de réparation, il doit établir le schéma d' l'enroulement et les notes correspondantes où doivent être indiqués le type de la machine électrique, sa puissance , la tension nominale, la vitesse de rotation du rotor, le type et les particularités constructives de l'enroulement, le nombre de spires de la bobine et d le nombre de conducteurs dans chaque spire, la marque et le diamètre du fil de bobinage, le pas de l'enroulement, le nombre des voies parallèles, le nombres de bobines dans un groupe de bobines,

l'ordre de succession des bobines, la classe d'isolation ainsi que d'autres données relatives à la construction et au mode de fabrication de l'enroulement.

Pour établir le schéma de l'enroulement et les notes de bobinage, il faudra utiliser les aides mémoires, les catalogues, ainsi que les données obtenues lors du démontage de l'enroulement de la machine à réparer.

Pour la réparation des machines électrique de construction ancienne, il est nécessaire, avant tout démontage, de relever de nature toutes les données d'enroulement (diamètre et marque des fils, quantité de fils dans une encoche, pas de l'enroulement etc.) ; il faut également faire les esquisses des parties frontales (développantes) et marquer les encoches. Ces données initiales peuvent apparaitre uniquement lors du rétablissement de l'enroulement, car on ne trouve pas les données sur les constructions des machines très anciennes.

Tableau 3.2 : Fiche de rebobinage

- 1- Type de la machine ...
- 2- Numéro d'usine ...
- 3- Date de fabrication ...
- 4- Puissance, kW...
- 5- Tension, V ...
- 6- Courant, A ...
- 7- Nombre de phases ...
- 8- Vitesse de rotation, tr/min...
- 9- Fréquence, ...
- 10-Couplage de phases ...
- 11-Longueur du stator mm ...
- 12-Diamètre d'alésage du stator...
- 13-Nombre d'encoche du stator ...
- 14-Type d'enroulement (à 2 couches, à 1 couche concentrique, en chaine, etc.)
...
- 15-Schéma de l'enroulement ...
- 16-Forme des parties frontale (à 2 ou 3 plan) ...
- 17-Dépassement des parties frontales (distance entre le flanc du paquet de tôle et le point le plus éloigné des parties frontales de l'enroulement)
- 18-Nombre de fils dans l'encoche :
 - Dans la couche supérieure
 - Dans la couche inferieur...
 - Total
- 19-Nombre de conducteurs élémentaires dans un conducteur effectif...
- 20-Fil de bobinage :

- Marque ...
- Diamètre, mm ...
- 21-Nombre de voies parallèles ...
- 22-Esquisse de l'encoche avec dimensions, isolations et disposition des fois ...
- 23-Dimensions, forme et matériaux des clavettes d'encoche
- Rebobineur
- Signature
- Date

Dans les mémentos est une tache énormément complexe.

Ceci n'est qu'un exemple de présentation d'une fiche de rebobinage mais il y a aussi un autre type plus détaillé dans l'annexe, celui utilisé par la Société SECREN SA.

Sil les données de l'ancien enroulement font défaut, ou bien il faut changer l'enroulement de la machine, la nécessité de calcul des données fondamentales de l'enroulement dévient obligatoire. De plus dans ces cas il faut déterminer certaines dimensions constructives des éléments de l'enroulement.

Les enroulements à double couche à bobines souples les plus répandus la longueur (m) de la partie frontale de la bobine peut être approximativement déterminée par la formule :

$$L_{pf} = KT + 20, \tag{3.10}$$

Où T – largeur moyenne (m) de la bobine (section) en nombre d'encoches, K – coefficient du tableau 3.32

Tableau 3.3 : Valeur du coefficient

2p	Valeur de K pour	
	Partie frontale sans ruban isolant	Partie frontale Avec ruban isolant
2	1,2	1,45
4	1,3	1,55
6	1,4	1,75
>8	1,5	1,90

La largeur moyenne d'une bobine (section) en nombre d'encoches est déterminée par l'arc du cercle passant par les milieux de ces encoches et ayant pour diamètre égal, pour un stator, à la somme du diamètre intérieur D_i et de la hauteur d'encoche h_e et, pour un rotor, à la différence du diamètre extérieur D_e et la hauteur de l'encoche h_e , c'est à dire :

$$\tau = \frac{\pi(D_i \pm h_e)y}{Z}, \quad (3.11)$$

Où y – pas de l'enroulement en encoches,

Z – nombre total d'encoches du noyau.

Pour un enroulement à une couche, on peut calculer la longueur de la développante par la formule approchée

$$l_{pf} \approx 1,4\tau + \sigma, \quad (3.12)$$

Où τ pas polaire ; σ dimension qui dépend de la valeur de la machine et varie entre 20 à 50 mm.

La longueur totale moyenne d'une bobine (section) :

$$l_b = 2(l + l_{pf}), \quad (3.13)$$

Où l – longueur de l'encoche obtenue par mesure du noyau.

Il n'est pas rare que, lors d'une réparation d'enroulement, de remplacer les fils de marques et section exigées manquants par ceux dont on dispose. Pour les mêmes raisons on remplace une bobine à un seul conducteur par une bobine avec deux ou plus fils élémentaires parallèles dont la section totale est équivalente à celle qui est exigée. Quand on remplace les fils des enroulements, des machines à réparer, on vérifie préalablement avant de faire le bobinage le coefficient de remplissage de l'encoche K_r par la formule :

$$K_r = \frac{nd_i^2}{S_e - S_i}, \quad (3.14)$$

Où n – nombre total de conducteurs dans l'encoche ; d_i – diamètre du fil isolé, mm ; S_i – surface totale de la section des matériaux isolants dans l'encoche, mm² ; S_e – surface de la section de l'encoche, mm².

Le coefficient de remplissage $k_r = 0,7 - 0,75$. Pour $k_r > 0,75$ la mise en place des conducteurs dans l'encoche sera difficile et quand $k_r < 0,7$, l'emplacement des conducteurs dans l'encoche n'est pas suffisamment dense et la machine se trouve sous utilisée.

Un des moments vitaux dans la préparation à la réparation d'un enroulement est vérification de l'existence en quantité suffisante des fils de bobinage exigé, des matériaux isolants et autre, ainsi, que des instruments, matériels et appareils, etc.

Avant la mise du nouveau bobinage dans le noyau de la machine à réparer, il est avant tout nécessaire d'éloigner l'ancien qui est hors d'usage. Lors de la levée de l'ancien enroulement, pour faciliter son éloignement des encoches on place les stators ou rotors, induits) des machines dans un four électrique où la température est maintenue à environ 350°C après avoir effectué le lavage et le soufflage à air comprimé. On maintient les noyaux avec l'ancien enroulement dans le four pendant 4-6 heures, après quoi les clavettes, les isolations d'encoche et de spires perdent leur solidité mécanique et il devient facile de tirer ; par tronçons l'enroulement des encoches. Quand on ne dispose pas de four électrique, on peut bruler les isolations en chauffant l'enroulement à l'aide du courant d'un transformateur à basse tension. Dans ce cas, il faut contrôler la température de la partie active du fer, la température 350°C étant à ne pas dépasser.

On peut également détruire l'isolation de l'ancien enroulement par voie chimique en imbibant les noyaux avec enroulement dans une vanne contenant des solutions spéciales (trichloréthylène ou produit équivalent). On maintient les noyaux avec enroulement dans la vanne jusqu'à ce que l'isolation de l'enroulement soit détruite et par conséquent on peut facilement enlever le bobinage des encoches par tronçons. Après cette opération il faut laver soigneusement les noyaux avec enroulement avec de l'eau continue (sous une certaine pression) et commencer ensuite à tirer les enroulements.

Au cas où l'on n'envisage pas la réutilisation du fil de bobinage de l'enroulement ancien, on coupe ses parties frontales à l'aide des couteaux, sur une machine outil ou bien on les coupe à l'aide des ciseaux.

Une fois l'ancien enroulement éloigné, on nettoie les stators (rotors et induits) des grandes machines des saletés et de l'huile deux – trois fois et on les essuie à l'aide des chiffons. On sommet les stators (ou rotors) des machines de faible et moyenne puissance à un mouillage de 2 – 3 % de carbonate de sodium anhydre pendant 10 à 15 minutes, et on les lave ensuite dans un jet d'eau chaude.

L'opération « 'démontage des enroulements à barres des induits se fait après la défection des bandages et d'autres opérations au niveau des parties frontales. On effectue la défection des bandages de façon à pouvoir encore réutiliser le fil correspondant. Pour tirer les barres des encoches on utilise des instruments spéciaux. On nettoie les barres enlevés de leur ancienne isolation et, ensuite, on les brûle à une température jusqu'à 400 – 950C. Le refroidissement se fera dans l'eau. Après avoir enlevé l'ancien enroulement des encoches du noyau, on nettoie le noyau, on le lave et lui fait souffler de l'air sous pression. Toutes ces opérations seront effectuées avec des soins spéciaux.

On vérifie ensuite le serrage du noyau et les autres défauts éventuels.

Les stators séparés selon les méthodes sus indiqués sont maintenant prêts à la mise en place d'un nouvel enroulement.

Chap.4 DIMENSIONNEMENT D'UNE MACHINE SYNCHRONE

Le dimensionnement d'une machine synchrone tient compte et des propriétés électromagnétiques, et des propriétés mécanique des la machine. Mais dans ce chapitre, il est question surtout de la détermination des dimensions principales, des données de bobinage, des pertes, des échauffements, des contraintes électriques, magnétiques, thermiques et mécaniques, des paramètres caractéristiques pour un alternateur.

4.1 Choix des matériaux à utiliser

Cette étape est capitale quand il s'agit du dimensionnement d'une machine électrique, car c'est par ce choix que l'utilisateur de la machine en question jugera la capacité de cette dernière.

Le choix des matériaux électrotechniques réside dans leurs propriétés physiques :

4.1.1 Matériaux magnétiques

Les circuits magnétiques sont réalisés en matériaux ferromagnétiques susceptibles de non-linéarité due à la saturation et à l'hystérésis qui en limitent les possibilités d'emploi et compliquent les calculs.

Les matériaux entrant dans la constitution des circuits magnétiques peuvent être classés en deux grandes familles :

- Les matériaux magnétiques doux,
- Les matériaux magnétiques durs.

4.1.1.1 Matériaux magnétiques usuels

Parmi les matériaux magnétiques doux, on peut citer :

- Les tôles dynamo en fer silicaté,
- La fonte grise,
- L'acier coulé,
- L'acier forgé.

Les matériaux magnétiques durs servent à la réalisation d'aimants permanents.

4.1.2 Matériaux conducteurs

4.1.2.1 Résistivité électrique

La résistivité électrique d'un matériau conducteur s'exprime en Ωm et conditionne les pertes ohmiques c'est-à-dire la puissance désignée par effet Joule dans l'enroulement parcouru par

Avec
$$P = RI^2 \quad [W] \quad (4.1)$$

$$R = \rho l/A \quad [\Omega] \quad (4.2)$$

où

l = longueur totale de l'enroulement, (m),

A = section du conducteur, (m^2).

4.1.2.2 Les matériaux conducteurs usuels

Le cuivre est de loin le plus utilisé. La conductivité n'est dépassée que par l'argent. L'aluminium est utilisé uniquement lorsqu'il n'y a plus de cuivre.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des matériaux conducteurs usuels

Désignation		δ 10 ³ kg/m ³	ρ_0 10 ⁻⁹ Ωm	α_0 10 ⁻³ /°C	c Ws/kg °C	λ W/m °C	$\Delta l/l$ 10 ⁻⁶ /°C	σ_E dN/mm ²	σ_B dN/mm ²	Composition %
Cuivre électrolytique recuit	E Cu-w	8,89	17,5	4	393	378	16,5	—	22,6	Cu 99,88
Cuivre électrolytique dur	E Cu-h	8,89	17,8	4	393	378	16,5	21,6	28,5	Cu 99,88
Cuivre à l'argent	Cu Ag	8,89	17,8	4	393	378	16,5	24,5	29,4	Cu 99,88 – Ag 0,1
Cuivre au chrome	CRM 16	—	21,8	—	—	290	—	48,1	51,7	Cr 0,6 à 1. Reste = Cu
Cuivre au beryllium	B 196	8,26	75	0,09	419	120	16,7	69 à 86	114 à 132	Be 1,8 à 2 – Co 0,2. Reste = Cu
Bronze d'aluminium	Al-Bz 10	7,6	130	—	419	56	17	12 à 29	52 à 64	Cu 90 – Al 10
Laiton	Ms 58	8,5	72	1,5	376	105	19	14 à 40	33 à 49	Cu 58 – Zn 40 – Mn 2
Bronze à l'étain	G Bz-6	8,8	180	4	376	—	17,5	—	19,6	Cu 94-86 – Sn 6-14
Aluminium	E Al	2,7	29	4	920	201	24	2 à 13	7 à 15	Al 99,5
Peraluman	50	2,6	67	2,1	1045	123	24	10 à 28	25 à 33	Al 96-93 – Mg 4-6 – Mn 0-1
Anticorrosif	Al-Mg-Si	2,7	42	3,8	836	140	23	11 à 31	21 à 33	Mg 0,6-0,9 – Mn 0,1-0,5 Si 0,8-1,2 – Reste : Al
Argent		10,5	16	3,6	230	403	20	—	18 à 27	Ag 99,9

δ : masse volumique
 ρ_0 : résistivité électrique à 15 °C
 α_0 : coefficient de variation de la résistivité
 c : chaleur massique
 λ : conductivité thermique
 $\Delta l/l$: coefficient de dilatation thermique
 σ_E : limite élastique
 σ_B : limite de rupture

4.1.3 Matériaux isolants

4.1.3.1 Critères de choix d'un solide isolant

Le choix de ces matériaux se repose en priorité sur :

- La rigidité d'électrique,
- La conductivité thermique,
- Les propriétés mécaniques,
- L'endurance thermique.

4.1.3.2 Matériaux isolants solides usuels

On peut citer :

- Le mica,
- La fibre de verre,
- L'amiante, mais, qui n'est plus utilisé car il a été reconnu comme un matériau très nocif (cancérogène),
- La cellulose, extraite du bois et du coton,
- Il y a aussi d'autres matériaux outre que les matériaux naturels précités.

Tableau 4.2 : Produits isolants utilisés dans la construction des machines électriques

Base	Liant ou imprégnant	Produit	Classe*	Usage
Papier	—	Papier, carton	Y	Pas utilisé sec car hygroscopique
Papier	Isolant liquide	Presspan, board	A	Isolation des conducteurs et des enroulements de transformateurs de toutes puissances et tensions
Papier	Résine thermodurcissable	Stratifiés en plaques ou tubes	A ou E	Pièces isolantes de transformateurs et de machines électriques tournantes
Tissus de coton	Résine d'imprégnation souple ou huile	Feuilles et rubans	A	Isolants souples pour BT
Tissus de coton	Résine thermodurcissable	Stratifiés en plaques ou tubes	A ou E	Isolants rigides pour BT
Fibre de verre	Résine d'imprégnation souple	Guipages, tresses	B, F, H	Isolation de conducteurs élémentaires de machines
Tissus de verre	Résine d'imprégnation souple	Tissus, rubans	B, F, H	Isolants souples pour BT
Tissus de verre	Résine thermodurcissable	Stratifiés en plaques ou tubes	B, F, H	Isolants rigides pour BT et MT
Mica	Liant thermoplastique (support papier)	Micafolium en feuilles ou rubans	B	Gaines d'encoches, isolation des conducteurs et des développantes
Mica	Liant thermoplastique (support papier)	Stratifiés en plaques	B	Isolants rigides formés à chaud
Mica	Liant thermodurcissable (support tissus de verre)	Micafolium en feuilles ou rubans	F, H	Gaines d'encoches, isolation des conducteurs et des développantes
Mica	Liant thermodurcissable (support tissus de verre)	Stratifiés en plaques	F, H	Isolants rigides pour MT
Samica	Liant thermodurcissable (support tissus de verre)	Samicafolium en feuilles ou rubans	F, H	Gaines d'encoches, isolation des conducteurs et des développantes
Samica	Liant thermodurcissable (support tissus de verre)	Stratifiés en plaques ou tubes	F, H	Isolants rigides pour MT
Polyvinylchloride (PVC)	—	Feuilles, rubans	Y	Peu utilisé dans la construction des machines
Terephthalate de polyéthylène	—	Films (Mylar) Fibres (Térylène) Feutres	E	Isolant d'encoches et de conducteurs
Polyuréthane	—	Résine d'enduction	E	Isolation de fils "émaillés"
Polyester	—	Résine d'enduction ou d'imprégnation	B, F	Isolation de fils "émaillés", imprégnation globale
Epoxyde	—	Résine d'enduction ou d'imprégnation	B, F	Isolation de fils "émaillés", imprégnation globale
Polyimide	—	Résine d'enduction, films, rubans	H	Isolation de fils "émaillés", isolation de conducteurs
Silicone	—	Résines, élastomères	H	Imprégnation globale, rubans isolants thermosoudables
Polytétrafluoréthylène	—	Films (Téflon)	C	Isolant d'encoches et de conducteurs
Silice	—	Verre	C	Pièces moulées (isolateurs)
Kaolin + Silice	—	Porcelaine	C	Pièces moulées (isolateurs)

*classification thermique des produits isolants:

Y : température maximale = 90°C

A : température maximale = 105°C

E : température maximale = 120°C

B : température maximale = 130°C

F : température maximale = 155°C

H : température maximale = 180°C

C : température maximale >180°C

4.1.3.3 matériaux isolants liquides usuels

L'usage de ces isolants s'impose lorsqu'il faut remplir des interstices et évacuer des quantités de chaleur importantes à travers des canaux de dimensions réduites. Ils jouent le rôle d'imprégnant d'isolants solides et permettent d'augmenter très sensiblement la sollicitation diélectrique.

Tableau 4.3 : Caractéristiques d'isolants liquides

Désignation	δ 10 ³ kg/m ³	c 10 ³ Ws/kg °C	λ W/m °C	ρ M Ω m	ϵ_r p.u.	\hat{E}_d pour 2,5 mm selon VDE kV/cm
Hydrocarbures purs (Huiles de transformateurs)	0,9	1,7 ÷ 2	0,16	10 ⁵	2,2	200
Hydrocarbures aromatiques chlorés (Diphényles chlorés)	1,57	1,06	0,1	10 ⁵	4,5	220 ÷ 250
Hydrocarbures aromatiques fluorés	1,82	—	0,15	10 ⁹	1,85	290
Huiles silicones (Méthyl-silicone)	0,96	1,3 ÷ 1,7	0,15	10 ⁶	2,56	200 ÷ 300

ϵ_r : permittivité relative \hat{E}_d : champ disruptif

4.1.3.4 Matériau isolants gazeux usuels

Les gaz sont utilisés normalement comme fluides caloporteurs pour ventilation des machines électriques.

Autre que l'air libre, on peut citer :

- Le refroidissement par circulation d'hydrogène,
- L'azote qui est surtout utilisé pour le refroidissement de certaines machines

Tableau 4.4 : Caractéristiques des gaz utilisés dans la construction des machines et appareils électriques

Désignation	δ kg/m ³ à 0 °C, 1 bar	c_p 10 ³ Ws/kg °C	λ 10 ⁻² W/m °C	\hat{E}_d pour 1 cm, à 1 bar kV/cm
Air	1,293	1,009	2,4	32
Hydrogène H ₂	0,09	14,35	17,5	19
Azote N ₂	1,25	1,055	2,59	32
Bioxyde de carbone CO ₂	1,98	0,856	1,53	29
Hexafluorure de soufre SF ₆	6,59	0,737	1,15	85

c_p : chaleur massique à pression constante

4.1.4 Les matériaux de construction

Outre les matériaux cités précédemment, il y a les matériaux de construction dimensionnés pour les efforts mécaniques.

4.2 Dimensions principales

On appelle dimensions principales d'une machine électrique, le diamètre intérieur D_a du stator pour les machines à courant alternatif, le diamètre extérieur de l'induit pour les machines courant continu, la longueur idéale l_i de la machine et la longueur l'entrefer.

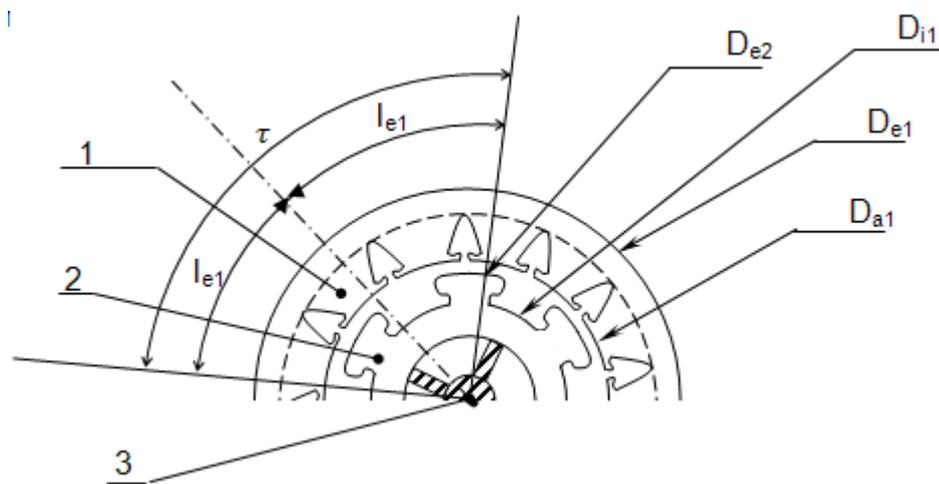


Fig.4.1 Coupe transversale d'une machine synchrone

1. Stator ;
2. Rotor ;
3. Arbre ;

D_{e1} : Diamètre extérieure du stator

D_{a2} : Diamètre d'alésage ;

D_{e2} : Diamètre extérieure du rotor

D_{i2} : Diamètre intérieure du rotor ;

D_{ar} : Diamètre de l'arbre ;

δ : Epaisseur de l'entrefer

h_{c_1} : Hauteur de la dent statoriques

h_{z_1} : Hauteur du volume rotorique

h_{c_2} : Hauteur de la culasse rotorique

h_{z_2} : Hauteur de la dent rotorique

$2l_{c_1}$: Longueur de la ligne magnétique dans la culasse statoriques

$2l_{c_2}$: Longueur de la ligne magnétique dans la culasse rotorique.

τ : Pas polaire

Coefficient d'utilisation

Le coefficient $Cu [J/m^3]$ qui s'exprime en fonction des contraintes électriques et magnétiques définit l'utilisation des matières actives (circuits magnétiques et bobinage).

Ce coefficient est donné par la relation :

$$Cu = \frac{P_{st}}{D_{a1}^2 l_1 n} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \hat{B}_\delta \bar{A} k_w, \quad (4.3)$$

Où \bar{A} : densité moyenne

$$\text{Avec} \quad \bar{A} \frac{m2NI}{\pi D_{a1}} = \frac{mNI}{p\tau}, \quad (4.5)$$

$$\text{Et} \quad \tau = \frac{\pi D_{a1}}{2p} : \text{pas polaire}, \quad (4.6)$$

p : Nombre de paires de pôles,

N : Nombre des spires

F : Courant nominal,

m : Nombre de phases ;

\hat{B}_δ : Induction maximale dans l'entrefer,

k_w : Facteur de bobinage,

n : vitesse de rotation,

P_{st} : Puissance apparente interne,

l_i : Longueur idéale.

Pour une puissance entre 1Kw à 100Kw, il varie entre 50 et 500kJ/m³ avec refroidissement conventionnel à l'air ; mais pour les turbo alternateurs, il peut atteindre jusqu'à environ 800[KJ/m³] ; le refroidissement se fait à l'aide de l'hydrogène ou par liquide.

4.3 Dimensionnement de la roue polaire et du stator

4.3.1 Diamètre du dos de stator

Cette valeur, notée dos est donnée par des dimensions normalisées qui varient suivant la hauteur d'axe h (ou suivant la puissance utile)

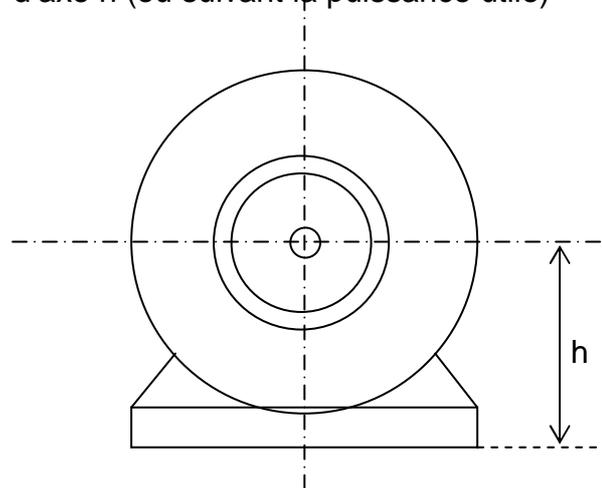


Fig. 4.2 Schéma montrant la hauteur d'axe

Tableau 1 : Diamètre du dos de stator

h[mm]	De1 max [mm]	h [mm]	De1 max [mm]
50	86	180	322
56	96	200	359
63	108	225	406
71	122	250	452
80	139	280	520
90	157	315	590
100	175	355	660
112	197	400	740
132	233	450	850
160	285		

4.3.2 Diamètre d'alésage Da1

La détermination de cette grandeur se fait à partir d'une fonction linéaire de diamètre extérieur De1. Le résumé de ceci est dans le tableau suivant

Tableau 4.2 Détermination du diamètre De1

2p	De1 [mm]	Da1 = f(De1) [mm]
2	80 – 360	Da1 = 0,61 D4 - 4
	<360 – 750	Da1 = 0,68 De1 + 28
4	80 – 520	Da1 = 0,68 De1 – 5
	< 520 – 990	Da1 = 0,56 De1 + 60
6	80 – 590	Da1 = 0,72 De1 -3
	< 590 – 990	Da1 = 0,6 De1 + 82
8	80 – 590	Da1 = 0,72 De1
	< 590 – 990	Da1 = 0,6 De1 +100
10 et 12	500 - 990	Da1 = 0,6 De1 + 110

4.3.3 Le coefficient de bobinage :

Le coefficient de bobinage est le coefficient qui traduit la diminution de la fem.

Cette diminution peut avoir plusieurs sources :

- La valeur du pas de l'enroulement,
- La répartition des conducteurs dans le noyau du stator,
- Position mutuelle du conducteur des enroulements du stator et rotor.

Ce coefficient peut s'évaluer quantitativement suivant

- Le coefficient de raccourcissement du pas k_y ;
- Le coefficient de répartition des conducteurs k_r ;
- Et le coefficient d'obliquité k_o .
- Ces coefficients constituent les composantes du coefficient de bobinage.

$$k_{w_1} = k_{y_1} \cdot k_{r_1} \cdot k_{o_1}$$

Voici un tableau montrant quelques valeurs de ce coefficient suivant le nombre de bobines dans un groupe de bobines.

Tableau 4.3 : Coefficient de bobinage :

Nombre de bobines dans un groupe de bobines	Coefficient De Répartition k_r	Coefficient de raccourcissement									
		0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924	0,891	0,853	0,809	0,760	0,707
2	0,966	0,963	0,954	0,939	0,919	0,893	0,861	0,824	0,781	0,734	0,676
3	,960	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887	0,855	0,818	0,775	0,728	0,672
4	0,958	0,955	0,946	0,931	0,911	0,885	0,853	0,816	0,773	0,726	0,670
5-7	0,977	0,955	0,946	0,931	0,911	0,885	0,853	0,816	0,773	0,726	0,670
8	0,956	0,953	0,944	0,929	0,909	0,883	0,851	0,814	0,771	0,724	0,668
9	0,955	0,952	0,943	0,928	0,908	0,882	0,850	0,813	0,770	0,723	0,667

4.3.4 Longueur de la machine et du fer

4.3.4.1 Définition de la longueur idéale l_i

Pour pouvoir simplifier les calculs sans déformer les phénomènes de transformation de l'énergie dans la machine, le champ non uniforme suivant la longueur de la machine est remplacé par un champ uniforme dont l'induction est égale à l'induction B_{m2} dans la région des paquets de longueur l_p et on suppose que ce champ s'exerce sur la longueur de calcul l_c , obtenue à partir de la conservation du flux magnétique.

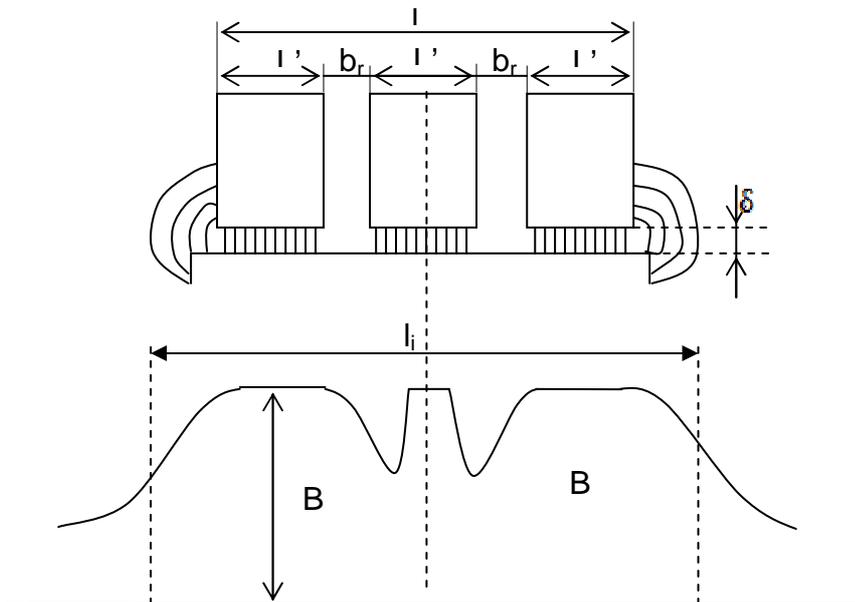


Fig. 4.3 Figure montrant la longueur idéale de la machine.

4.3.4.2 Fentes

La largeur des canaux b_v de ventilation est fixée à 0,01 [m]. Elles sont disposées de façon radiale tous les 0,1[m] au stator dans le cas où la longueur idéale dépasse 0,2[m]

Le nombre de fentes de ventilation est calculée par

$$n_{v_1} = ABS[INT(n_v + 1) - 1] - 1 \quad (4.8)$$

Avec $n_v = \frac{l_i}{0.1}$

4.3.4.3 Longueur du fer et de la machine

* longueur de la machine l

La longueur l de la machine est donnée par

$$l_i = l - n_v b'_v + 2\delta \rightarrow l = l_i + n_v b'_v \quad (4.9)$$

Où $b'_v = C_0 C_v \delta$,

$$\text{Avec } C_v = \frac{b_v / c_0 \delta}{5 + b_v / c_0 \delta} \quad ; \quad (4.10)$$

$c_0 = 1$ si les canaux sont aménagés seulement sur le stator (ou enroulement sur le rotor) ;

$c_0 = 0,5$ si les canaux sont prévus pour le stator et le rotor

- Longueur du fer l_f

C'est la longueur du circuit magnétique sans canaux de ventilation et l'espace entre les tôles.

$$l_f = l_1 k_f \quad (4.11)$$

Avec $l_1 = l - n_v b_v$: longueur du circuit magnétique sans canaux de ventilation,

- n_v = nombre de canaux de ventilation,
- b_v = la largeur de canaux de ventilation,
- k_f = coefficients de frissonnement des tôles,
- δ = longueur de l'entrefer.

4.3.5 Le rapport λ

Il permet de caractériser la longueur du moteur si elle est courte, moyenne ou longue. Dans la conception d'une machine, λ ne doit pas dépasser une valeur maximale λ_{max} , car ceci entraînera le recommencement de tous les calculs au début. Ce rapport est défini par

$$\lambda = \frac{h}{D_{a1}} \quad (4.12)$$

Tableau 4.4 Valeurs maximales de λ suivant D_{a1} pour $2p = 4$

Protection	D_{a1} [mm]	λ_{max}
IP 44	80 – 700	1,46071. 10 ⁻⁵ De1
IP 23	250 – 700	1,33 – 87/10 ⁻⁵ De1
IP 44 – IP 23	< 700 -930	1,56 – 88.10 ⁻⁵ De1

- Pour les autres valeurs de nombres de paires de pôles, on les déduit en les multipliant par un coefficient k_1 du tableau suivant

 Tableau 4.5 : valeur k_1

D_{s_1} [mm]	Coefficient k_1 suivant 2p		
	2p =2	2p =6	2p = 8, 10, 12
80 -700	0,95	1,05	1,1
< 700 - 990			1,15

4.3.6 L'entrefer δ

La longueur de l'entrefer δ est donnée par

$$\delta = 0,0001 + 0.002 D_{a_1}, \quad (4.13)$$

Avec D_{a_1} en [m].

On peut aussi choisir la longueur de l'entrefer δ de façon qu'elle soit la plus grande que possible, mais il faut que les pertes soient les plus petites possible. Alors, le tableau suivant montre le choix optimal pour la valeur de δ .

Tableau 4.6 Longueur d'entrefer suivant le nombre de paires de pôles et h

δ [mm] suivant la valeur de 2p

h[m]	2	4	6 - 8	10 - 12
50	0,25	0,25	0,25	0,25
56	0,3	0,25	0,25	0,25
63	0,35	0,25	0,25	0,25
71,8	0,35	0,25	0,25	0,25
90	0,4	0,25	0,25	0,25
100	0,45	0,3	0,25	0,3
112	0,5	0,3	0,3	0,35
132	0,6	0,35	0,35	0,35
160	0,8	0,5	0,35	0,5
180	1,0	0,6	0,5	0,5
225	1,0	0,85	0,5	0,6
250	1,2	1,0	0,6	0,7
280	1,3	1,0	0,7	0,7
315	1,5	1,0	0,8	0,8
355	1,8	1,2	0,9	0,9
400	2,0	1,4	1,0	1,0
450	2,0	1,4	1,2	1,0

4.3.7 Le rotor diamètre d'alésage D_{a_1} , diamètre de l'arbre D_2 , longueur

Diamètre d'alésage D_{a_2}

Il est donné par :

$$D_{a_2} = D_{a_1} - 2\delta. \quad (4.14)$$

- Diamètre de l'arbre D_2

Les formules donnant cette valeur sont les suivantes (en approximation)

$$D_2 \approx 0,23 * D_{a_1} \text{ pour } h \geq 71[\text{mm}], \quad (4.15)$$

$$D_2 \approx 0,19 * D_{a_1} \text{ pour } 30[\text{mm}] < h \leq 63[\text{mm}] \quad (4.16)$$

- Longueur du rotor l_2

$$l_2 = l \text{ pour } h \leq 250[\text{mm}] \quad (4.17)$$

$$l_2 = l + 5 \text{ pour } h > 250[\text{mm}] \quad (4.16)$$

4.3.8 Nombre d'encoches

Le calcul du nombre d'encoches est donné par la formule

$$Z_1 = 2pmq$$

Avec Z_1 : nombre d'encoches statoriques,

$2p$: Nombre de paires par poles,

m : Nombre de phases,

q : Nombre d'encoches par pole et par phase.

4.4 L'enroulement des machines à courant alternatif

4.4.1 Généralités

L'enroulement d'une machine électrique est constitué par un ensemble de conducteurs logés dans des encoches et reliés entre eux dans un ordre défini. Un enroulement se compose de conducteurs, de spires, bobines et groupes de bobines.

Les paramètres nécessaires pour la construction de l'enroulement des machines électriques à courant alternatif sont les suivants :

- Nombre d'encoches Z ;
- Nombre des phases m ;
- Nombre de pôles p ;
- Nombre de voix parallèles α ;
- Pas polaire τ ;
- Pas d'enroulement y ;
- Pas relatif $\beta = y/\tau$;

- Nombre d'encoches par pôle et par phase.

4.4.2 L'enroulement statorique :

On peut distinguer :

- L'enroulement à une couche qui est réservé pour les petites machines à puissance inférieures à 4 [KW] :
 - 0,75 [KW] pour $2p = 2$;
 - 0,55 [KW] pour $2p = 4$;
 - 0,37 [KW] pour $2p = 6$;
 - 0,25 [KW] pour $2p = 8$;

L'enroulement à 2 couches, destiné surtout pour les grosses machines.

4.4.2.1 Détermination des nombre de spires en série de phase et sa longueur

* Induction dans l'entrefer

Elle est fonction du diamètre d'alésage et du nombre de paires de pôles, les courbes donnant cette induction peuvent être définies par la formule suivante :

$$\widehat{B}_\delta = B_0 + B \ln \frac{\pi D_{a1}}{2p} \quad (4.19)$$

Avec B_0 et B en [Tesla]

Quelques références sont à signaler :

$$p = 1 : B_0 = 0,70 \text{ et } B = 0,048;$$

$$p = 2 : B_0 = 0,72 \text{ et } B = 0,04;$$

$$p = 3 : B_0 = 0,74 \text{ et } B = 0,032;$$

$$p \geq 4 : B_0 = 0,76 \text{ et } B = 0,024;$$

- Nombre de spires N_1

Le nombre de spires est donné par la formule

$$N'_1 = \frac{U_i}{4,44 f k_{w1} \widehat{\phi}} \quad (4.20)$$

Où $\widehat{\phi} = \frac{2}{\pi} \widehat{B}_\delta \tau l_p$: flux d'entrefer ;

$k_{w1} \approx 0,0092$ Coefficient de bobinage ;

$U_i = C_{tv} U_{phase}$: Tension induites ;

Pour $P_2 \leq 10^3 [kW]$; $C_{tv} = 0,8 + 10^{-4} P_2$;

$10^3 < P_2 \leq 10^4 [kW]$; $C_{tv} = 0,9 + 4 \cdot 10^{-6} P_2$;

$10^4 < P_2 \leq 10^6 [kW]$; $C_{tv} = 0,94 + 4 \cdot 10^{-6} P_2$;

$P_2 > 10^6 [W]$; $C_{tv} = 0,98$

Comme le nombre de conducteurs effectifs par encoches doit être entier et pair, on corrige la valeur N'_1 par

- Nombre de conducteurs effectifs par encoches

$$N_{c_{1eff}} = 2a_1 \text{round}\left(\frac{N'_1}{2pq_1}\right) \quad (4.21)$$

Où a_1 est le nombre de voies parallèles

- Nombre de spires en série dans une phase :

$$N_1 = \frac{Z_1 N_{c_{1eff}}}{2m} \quad (4.22)$$

Le flux corrigé est donc

$$\hat{\phi} = \frac{U_1}{4,44 f k_{w1} N_1} \quad (4.23)$$

- Longueur d'une spire

$$l_z = 2(l + 1,5\tau) \quad (4.24)$$

4.5-Dimensionnement des encoches

On dimensionne les encoches à partir de la densité du courant (section du conducteur) et de différentes inductions magnétiques :

\widehat{B}_δ : Induction maximale dans l'entrefer ;

B_{z_1} Induction dans les dents.

1.5.1 Choix de la forme d'encoche.

Ce choix dépend de la puissance et de la tension de la machine et les encoches peuvent – être :

- Ouvertes ;
- Semi-ouvertes ;
- Semi-fermés.

Les encoches ouvertes ou/et semi-ouvert sont généralement réservés aux machines de grandes et moyenne puissances et leurs formes sont presque rectangulaire ; et les encoches trapézoïdales sont réservées pour les machines de faibles puissances ;

Tableau 4.7 ; Formes d'encoches suivant $2p$ et h

Hauteur d'axe H[mm]	2p	Forme d'encoche
50 – 180	2 ; 4 ; 6 ; 8	Trapézoïdale semi - fermée
150 – 355	2 ; 4 ; 6 ; 8	Rectangulaire semi - ouverte
180 - 355	10 ; 12	Rectangulaire semi - fermée

Ce tableau montre alors qu'en générale, on rencontre trois (03) types d'encoches :

- Encoches rectangulaires semi-fermée ;
- Encoches rectangulaires semi-ouvertes ;
- Encoches trapézoïdales semi-fermées.

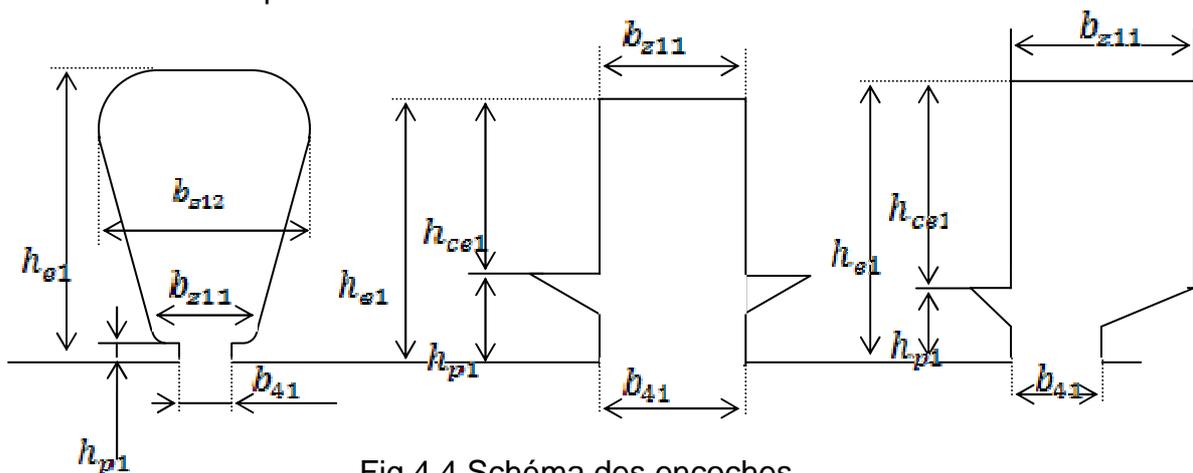


Fig.4.4 Schéma des encoches.

- a. Encoche trapézoïdale semi-fermée ;
- b. Encoche rectangulaire ouvert ;
- c. Encoche rectangulaire semi-ouverte.

1.5.2 Détermination des dimensions d'encoches fig. 4.4

1. Induction au tiers de la hauteur de dent $B_{Z_{1/2}}$

Elle est obtenue par la formule

$$B_{Z_{1/2}} = 1,5 - 0,0857 \ln \frac{\pi D_{a1}}{2p}, \tag{4.25}$$

2. Calcul de la hauteur de la pré-encoche h_{p1} et la largeur de la pré-encoche b_{41}

h_{p1} est donnée par

$$h_{p1} = 0,01D_{a1} + 5 \cdot 10^{-4} \text{ [m]} \quad (4.26)$$

3. La largeur de la pré-encoche

➤ Encoche trapézoïdale

$$b_{41} = \frac{\tau_{z1}}{5} \quad (4.27)$$

τ_{z1} : Pas dentaire

$$\tau_{z1} = \frac{\pi D_{a1}}{z_1} \quad (4.28)$$

➤ Encoche rectangulaire semi-ouverte :

$$b_{41} = 0,6b_{z1} \quad (4.29)$$

➤ Encoche rectangulaire ouverte :

$$b_{41} = b_{z1} \quad (4.30)$$

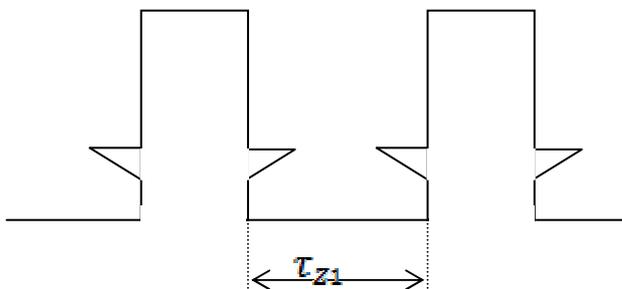


Fig. 4.5 : pas dentaire

4. Section totale des conducteurs

La section totale de conducteurs est donnée par

$$S_{c\ tot} = S_{cond1} a_1 N_{c1sl} = \frac{I_n}{J_1} \quad (4.31)$$

où

I_n : courant nominale ; J_1 : densité de courant ; N_{c1el} : nombre de conducteurs élémentaires ; S_{cond1} : section d'un conducteurs élémentaire ; a_1 : le nombre de voies parallèles

5. Section d'encoche :

Pour une encoche trapézoïdale, la section est obtenue par

$$S_e = \frac{N_{c1eff} N_{c1el} \frac{\pi D_{c1}^2}{4}}{K_{rcu}} \quad (4.32)$$

Pour une encoche rectangulaire

$$S_e = \frac{N_{c1eff} N_{c1el} h_{c1} b_{c1}}{K_{rcu}} \quad (4.33)$$

Avec

N_{c1el} : Nombre de conducteurs élémentaires ;

N_{c1eff} : Nombre de conducteurs effectifs dans l'encoche ;

D_{c1} : Diamètre du conducteur élémentaire ;

h_{c1} : Hauteur d'un conducteur élémentaire ;

b_{c1} : Largeur du conducteur élémentaire ;

K_{rcu} : Le coefficient de remplissage.

6. Encoche trapézoïdale

En tenant compte des formes arrondies, on pose :

$$S_{trap} = \frac{S_e}{0.95} \quad (4.34)$$

La largeur de dent $l_{z1/3}$ est :

$$l_{z1/3} = \frac{B_g \tau_{z1} l_i}{B_{z1/3} l_{f1}} \quad (4.35)$$

La hauteur h_{e1} est :

$$h_{e1} = \frac{\sqrt{(\alpha - h_{p1})^2 + 4\left(\frac{Z_1 S_{trap}}{\pi} + \alpha \cdot h_{p1}\right)} - (\alpha - h_{p1})}{2} \quad (4.36)$$

$$\text{Avec } \alpha = D_{a1} + h_{p1} - \frac{Z_1}{\pi} l_{z1/3} \quad (4.36)$$

La largeur b_{z11} en négligeant h_{p1} devant D_{a1} est :

$$b_{z11} = \tau_{z1} - l_{z1/3} \quad (4.37)$$

La largeur de base du trapèze b_{z12} est

$$b_{z12} = \frac{2S_{trap}}{h_{e1}} - b_{z11} \quad (4.38)$$

7. Encoche rectangulaire

Par conservation du flux, la largeur de la dent au tiers de sa hauteur est de :

$$l_{1/3} = \frac{\hat{\phi}}{B_{1/3} l_{fz}^2} \quad (4.39)$$

Où $\hat{\phi}$ est donnée par la relation (4.24)

La section S_e est :

$$S_e = (h_{e1} - h_{p1}) b_{z1} \quad (4.40)$$

Avec $h_{e1} = h_{p1} + h_{ec1}$

La relation (4.40) peut s'écrire alors

$$S_e = h_{ec1} \cdot b_{z1} \quad (4.40bis)$$

Détermination de h_{ec1} :

8. Pas dentaires au tiers de la hauteur de la dent est :

$$\tau_{z1/3} = \frac{\pi(D_{a1} + \frac{2}{3}h_{e1})}{Z_1} \quad (4.41)$$

9. La largeur b_{z1} est :

$$b_{z1} = r_{z1/3} - l_{z1/3} \quad (4.42)$$

En faisant quelque opération avec les relations (4.40), (4.41), (4.42) on obtient :

$$h_{ec1} = \frac{\sqrt{a^2 + \left(\frac{sb}{3z_1}\right)^2} - a}{\frac{2}{3}z_1} \quad (4.43)$$

$$\text{Avec } a = \frac{\pi D_{a1}}{z_1} - l_{z1/3} + \frac{2h_{p1}}{3z_1} \quad (4.44)$$

$$\text{Et } b = \frac{\pi D_{a1}}{z_{a1}} - l_{z1/3} h_{p1} - S_e \quad (4.45)$$

Puis d'après (4.40bis) peut s'exprimer aussi par

$$b_{z1} = \frac{S_e}{h_{ec1}} \quad (4.46)$$

Chap. 5 PROGRAMME DE CALCUL DE BOBINAGE D'UNE MACHINE A COURANT ALTERNATIF

Dans ce chapitre seront consacré le calcul des nombres de spires par phase et le nombre de conducteurs par encoche. Par ailleurs, le programme de dimensionnement d'une machine tout entier nécessite des études minutieuses et devait faire l'objet d'un autre sujet.

Il sera aussi question, dans ce chapitre, la présentation du logiciel mais son manuel d'utilisation sera présenté dans l'annexe de ce livre.

5.1 Choix de l'outil de programmation

L'outil de programmation choisi est le Delphi car, cet outil est plus facile à manipuler ceci peut être du au fait qu'on est habitué à l'utilisation de celui-ci ; de plus, le langage adopté par le Delphi est à peu près le même que celle du Turbo Pascal qui est le langage que nous avons étudié en 3^e année. Et enfin, le Delphi présente une interface plus conviviale.

5.2 Les données de calcul

Voici les données utiles pour le calcul du nombre de spires

The screenshot shows a software window titled "SECREN_REBOB.LOG" with a blue border and standard Windows window controls. The window is divided into two main sections: "Données mécaniques" (Mechanical data) on the left and "Données électriques" (Electrical data) on the right. Each section contains several input fields with numerical values and labels. At the bottom, there are three buttons: "Valider", "Suivant", and "Quitter".

Données mécaniques		Données électriques	
<input type="text"/>	De1: Diamètre du dos de stator [m]	<input type="text" value="2200"/>	P2: Pissance active [W]
<input type="text" value="0.094"/>	Da1: Diamètre d'alesage [m]	<input type="text" value="50"/>	f: Fréquence [Hz]
<input type="text" value="36"/>	Z: Nombre d'encoche	<input type="text" value="415"/>	U: Tension [V]
<input type="text" value="0.14"/>	l: longueur de la machine [m]	<input type="text" value="140"/>	I: courant en [A]
<input type="text"/>	n: nombre de tour [tr/mn]	<input type="text" value="3"/>	m: nombre de phase

Fig.5.1 : Données de calcul

Mais à part ceux qui sont sur la figure, il y a aussi d'autres données nécessaires mais qui sont à calculer tels que sont représentés sur la figure suivante :

Nombre de spires calcul

Calcul de B entrefer

2p 4 Calculer Be

Bentrefer 0,616

Choix de P2 pour calcul de Ctv

P2 <= 1e3 [kW]

1e3 < P2 <= 1e4 [kW]

1e4 < P2 <= 1e6 [kW]

P2 > 1e6 [kW]

Calcul de Ctv et de Ui

Ctv 0,909 Calculer

Ui 377

Pas polaire, longueur idéale, flux

Tau: pas polaire 4,5

Li: longueur idéale 0,0177 Calculer

Longueur entrefer: 0,000288

PHI: Flux 0,0311

Co: 1

Choix du pas polaire

Pas diamétral

Pas raccourci (recommandé)

Pas rallongé

Nombre d'encoche par pôle et par phase

q entier

q fractionnaire

Calculer Suivant Fermer

Fig.5.2 Données à calculer.

Il est vrai que le nombre de pôle $2p$ n'est pas à calculer, mais il se trouve dans cette interface car, il est nécessaire au calcul de l'induction de l'entrefer B_e (voir détail de calcul §4.4.2.1).

Il est ici recommandé d'utiliser du pas raccourci car ce dernier est profitable économiquement, et de plus le pas raccourci élimine les harmoniques qui sont assez souvent le siège des pertes, donc diminuera la puissance de la machine durant son utilisation.

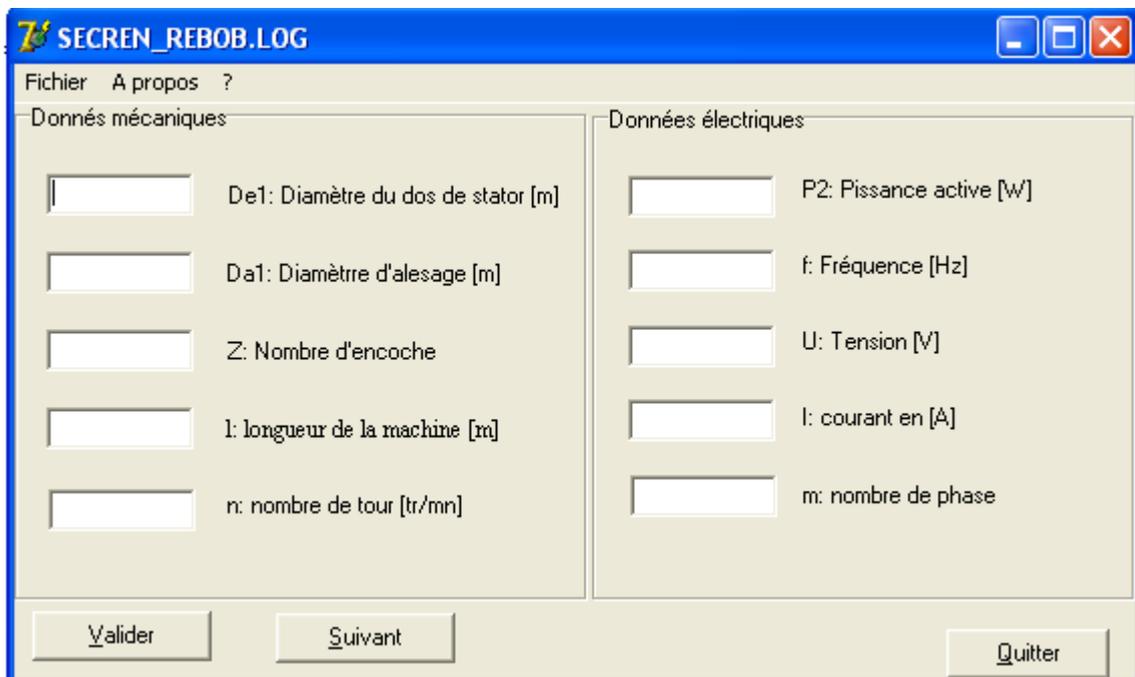
L'utilisation du pas diamétral permet d'obtenir une puissance maximale mais il profite surtout aux harmoniques de rang supérieures (5, 7, 11, etc.)

Par contre, le bobinage à pas rallongé présente la même caractéristique que celui du pas raccourci mais du point de vue économique celui-ci n'est pas avantageux.

5.3 Présentation du logiciel :

Le logiciel comprend trois (03) interfaces :

- la première pour la saisie des données se trouvant sur la plaque signalétique de la machine et certaines données à mesurer (Fig. 5.3) :



The screenshot shows a software window titled "SECREN_REBOB.LOG" with a menu bar containing "Fichier", "A propos", and "?". The main area is divided into two columns: "Données mécaniques" on the left and "Données électriques" on the right. Each column contains five input fields with corresponding labels. At the bottom, there are three buttons: "Valider", "Suivant", and "Quitter".

Données mécaniques		Données électriques	
<input type="text"/>	De1: Diamètre du dos de stator [m]	<input type="text"/>	P2: Pissance active [W]
<input type="text"/>	Da1: Diamètre d'alesage [m]	<input type="text"/>	f: Fréquence [Hz]
<input type="text"/>	Z: Nombre d'encoche	<input type="text"/>	U: Tension [V]
<input type="text"/>	l: longueur de la machine [m]	<input type="text"/>	I: courant en [A]
<input type="text"/>	n: nombre de tour [tr/mn]	<input type="text"/>	m: nombre de phase

Fig. 5.3 Interface de saisie des données.

- La deuxième est réservée pour les données nécessaires à calculer ou à choisir (Fig. 5.4)

Fig. 5.4 : Interface des données à calculer ou à choisir.

- La dernière est pour les résultats finals (Fig. 5.5) :

Fig. 5.5 : Interface des résultats finals

5.4 Organigramme de calcul :

Dans ce paragraphe, nous ne présenterons que les organigrammes généraux, les détails ne seront donc présentés.

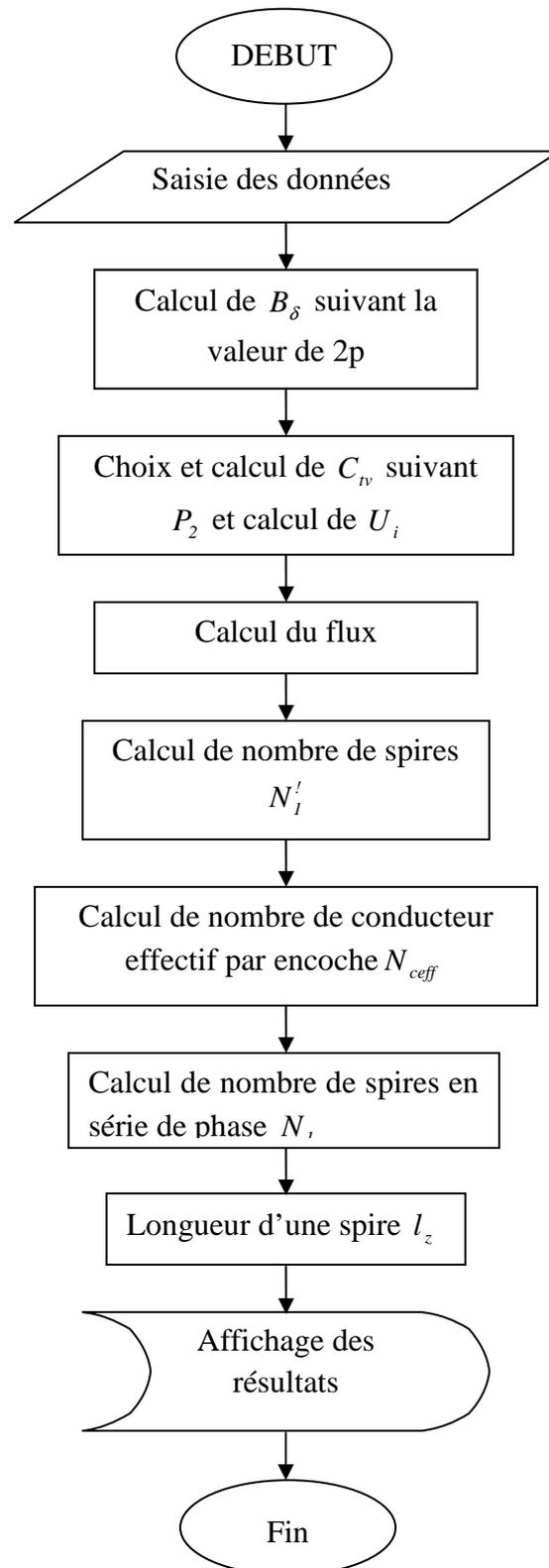
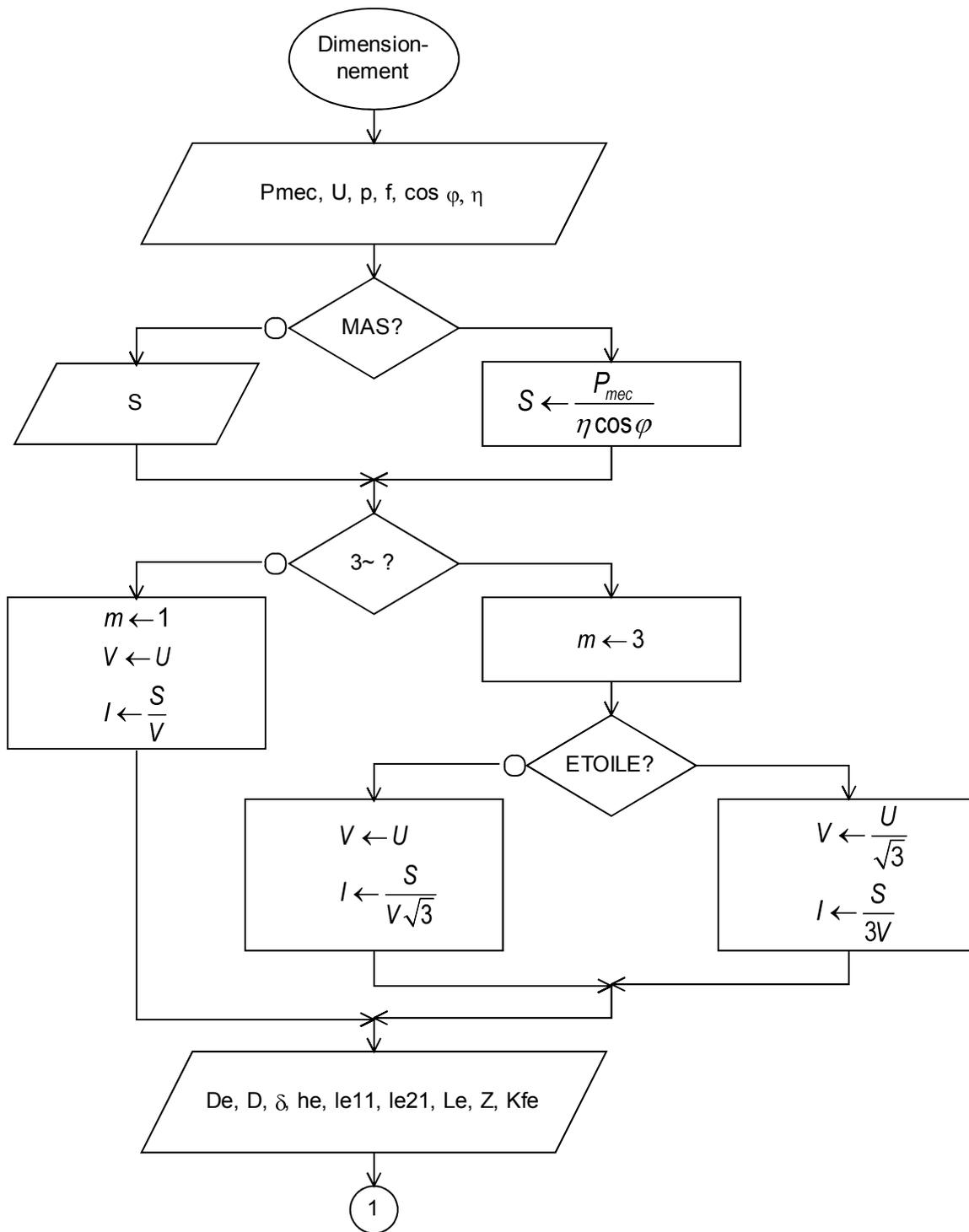
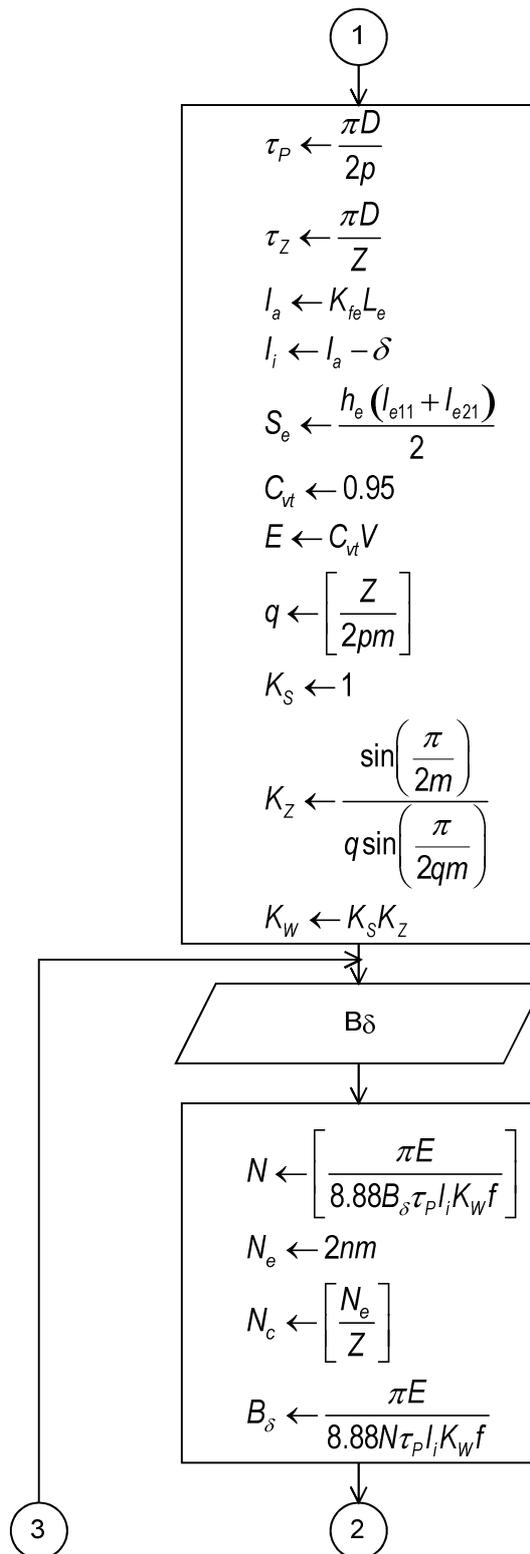
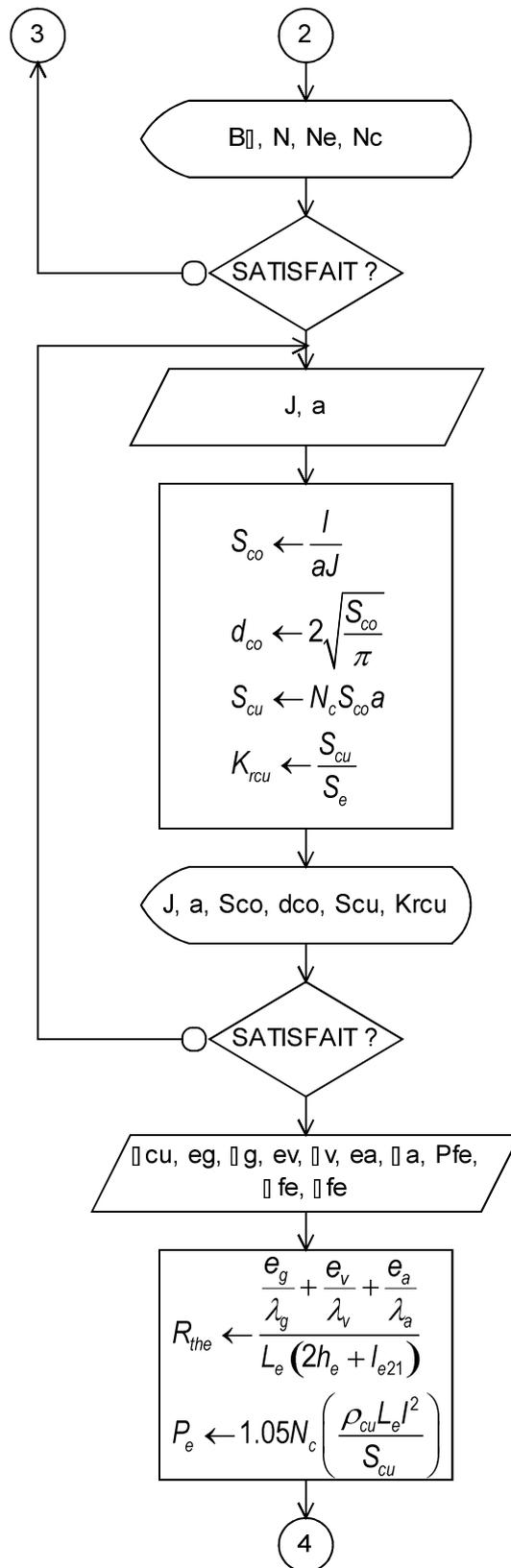
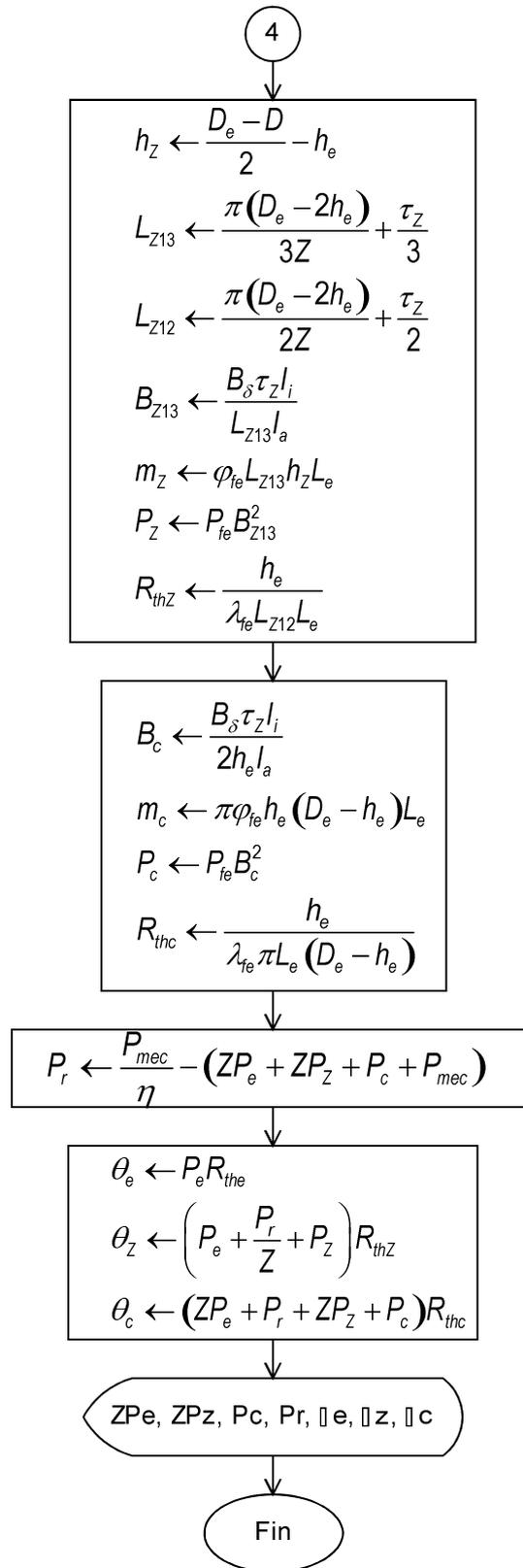


Fig. 5.6 : Organigramme de calcul de nombre de spires









5.5 Schéma étalé d'un enroulement réalisé à q fractionnaire

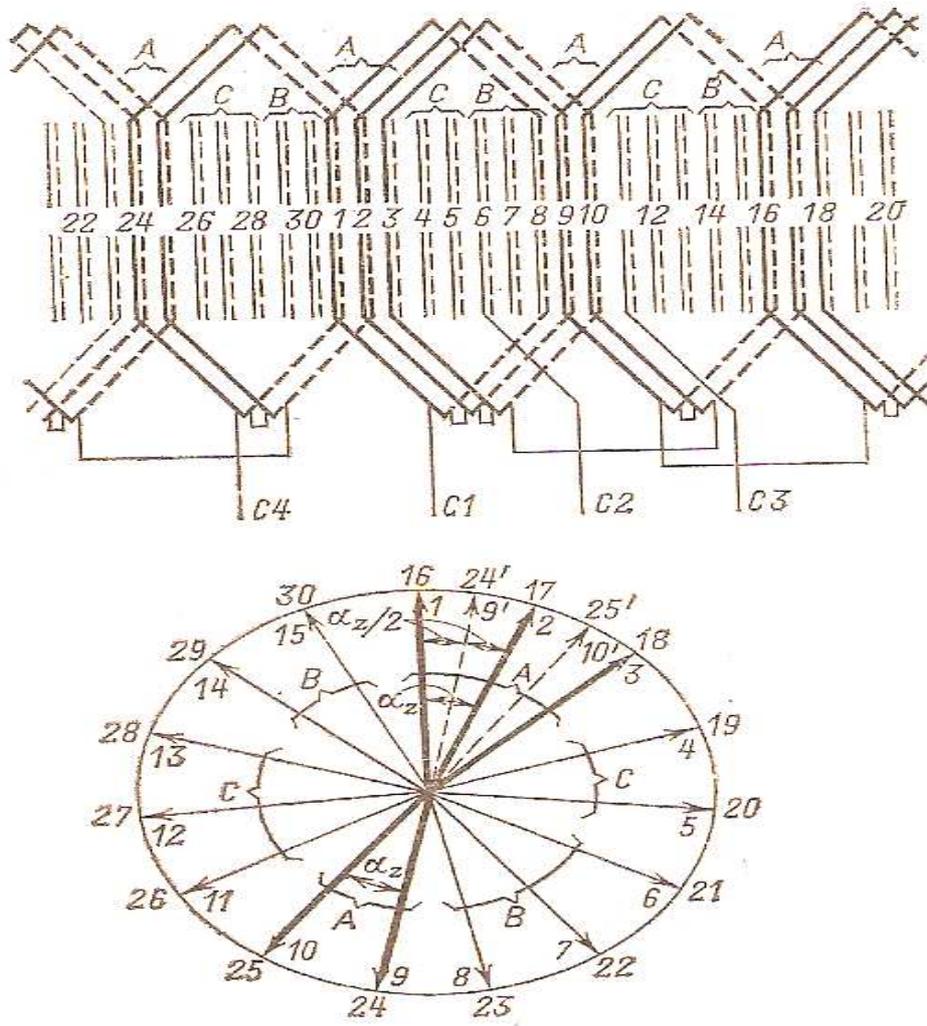


Fig. 5.7 Enroulement à q fractionnaire ($q=21/2$)

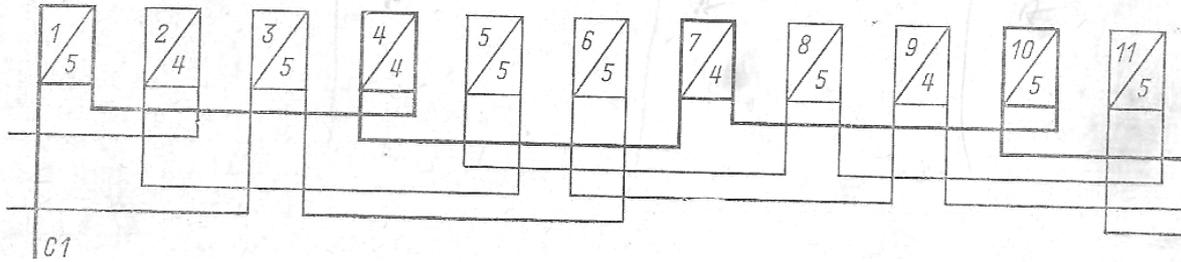
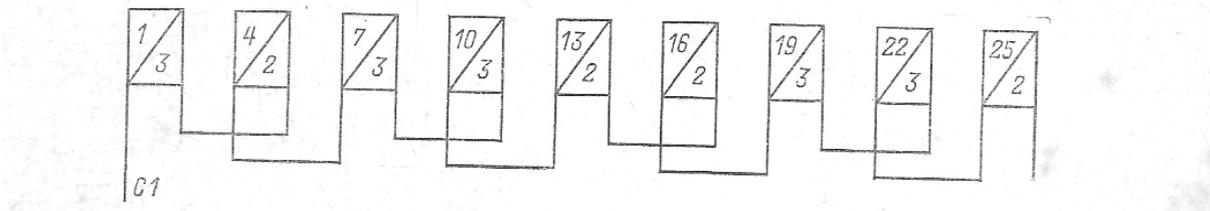


Fig. 5.8 : Schéma conventionnel pour $q = 43/5$



5.6. Essai et validation du Logiciel

5.6.1. Les données

Données mécaniques		Données électriques	
<input type="text"/>	De1: Diamètre du dos de stator [m]	<input type="text" value="39065500"/>	P2: Pissance active [W]
<input type="text" value="0.98"/>	Da1: Diamètre d'alesage [m]	<input type="text" value="50"/>	f: Fréquence [Hz]
<input type="text" value="48"/>	Z: Nombre d'encoche	<input type="text" value="10500"/>	U: Tension [V]
<input type="text" value="2.22"/>	l: longueur de la machine [m]	<input type="text" value="1720"/>	I: courant en [A]
<input type="text" value="3000"/>	n: nombre de tour [tr/mn]	<input type="text" value="3"/>	m: nombre de phase

Fig. 5.11 : Données mécaniques et électriques

5.6.2. Premiers résultats

The screenshot shows a software window titled "Nombre de spires calcul" with the following fields and values:

- Calcul de B entrefer:** $2p$ is 2, B_{entrefer} is 0,721. Button: Calculer B_e .
- Calcul de C_{tv} et de U_i :** C_{tv} is 0,98, U_i is 1,03E4. Button: Calculer.
- Choix de P_2 pour calcul de C_{tv} :** Radio buttons for $P_2 \leq 1e3$ [W], $1e3 < P_2 \leq 1e4$ [W], $1e4 < P_2 \leq 1e6$ [W], and $P_2 > 1e6$ [W]. The last option is selected.
- Pas polaire, longueur idéale, flux:** τ : pas polaire is 0,77, L_i : longueur idéale is 2,2, Longueur entrefer is 0,00206, Flux is 0,778. Button: Calculer.
- Co:** 1 (dropdown menu).

Navigation buttons at the bottom: Calculer, Suivant, Précédent, Fermer.

Fig. 5.12 : Premier résultats de calcul

Avec :

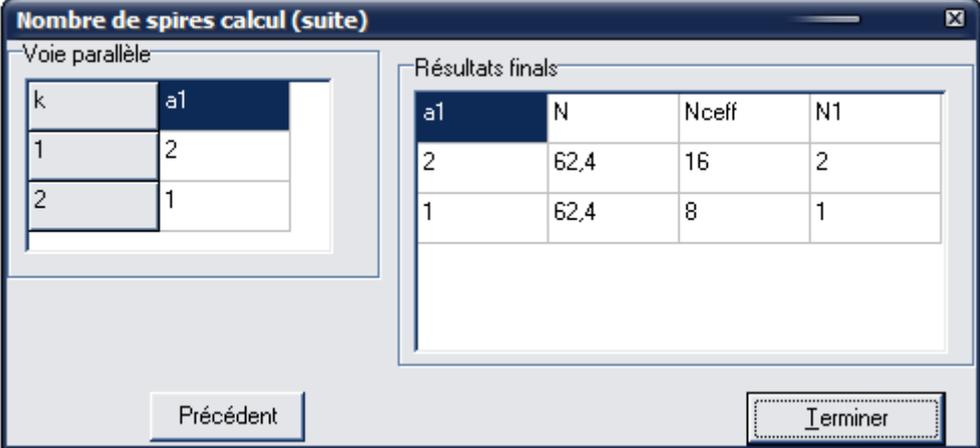
$2p$: nombre de paire de pole ;

B_{entrefer} : induction dans l'entrefer en Tesla [T];

C_{tv} : coefficient de chute de tension ;

U_i : tension induite en Volt [V] ;

5.6.3. Résultats finals



k	a1
1	2
2	1

a1	N	Nceff	N1
2	62,4	16	2
1	62,4	8	1

Fig. 5.13 : Résultats finals

Avec :

a_1 : nombre de voie parallèle ;

N : nombre de spire ;

N_{ceff} : nombre de conducteurs effectifs par encoche ;

N1 : nombre de conducteur.

CONCLUSION GENERALE

La faille de la procédure de rebobinage des machines électriques de l'atelier électricité de la Société SECREN SA est que les employés utilisent le feu de bois pour enlever les conducteurs usés à l'intérieur des encoches. Cette procédure a des effets (tardifs ou immédiats) sur le fonctionnement des machines réparées.

La méconnaissance de la température du feu utilisé s'ajoute à la faille de la procédure.

Effet, l'effet indésirable pour la machine serait la détérioration des isolants se trouvant entre les empilements des tôles ferromagnétiques et ainsi, ces derniers ne seraient pas considérés comme un empilage mais comme un bloc massif qui augmenterait les pertes par courant de Foucault et par Hystérésis.

Ainsi, à part de connaître la température du feu de bois afin de respecter la température limite des classes des isolants, quelques solutions de remplacement ont été proposées afin d'être étudiées par les responsables. Il y a aussi mention sur l'imprégnation, séchage et essai des machines.

Pour aider les employés à leurs tâches, on a conçu un logiciel servant à calculer les nombres de spire, le nombre de conducteurs effectifs dans une encoche. Ce logiciel peut servir aussi à la vérification des calculs effectués par les employés à la main. Mais il présente des failles : on peut citer l'absence de la base de données servant à stocker les résultats.

Si la Société SECREN veut adopter les solutions proposées dans ce livre, elle doit reconsidérer leurs installations et proposer l'approfondissement de ce sujet ; car ce qui sont proposés dans ce livre n'est que généralité du travail qui attend la personne qui va faire l'étude. Mais sur ce côté, il n'y a pas de souci, il y a l'École Supérieure Polytechnique d'Antsiranana qui peut offrir son aide.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT	3
INTRODUCTION	1
Chap. 1 GENERALITES SUR LES MACHINES ELECTRIQUES.....	2
1.1 Classification et constitution des machines électriques :.....	2
1.1.1 Classification	2
1.1.2. Constitution d'une machine électrique.....	3
1.2 Lois physiques régissant le fonctionnement des machines électriques	4
1.2.1 Equations de Maxwell.....	4
1.2.2 Loi d'Ampère	4
1.2.3 Convention de signe des flux.....	6
1.2.4 Lois de Faraday et de Lenz	6
1.2.5 Convention de signe de la tension induite	7
1.2.6 Loi d'ohm généralisée	8
1.3 Pertes – Echauffement - Rendement	8
1.3.1 Pertes de puissance	8
1.3.2 Echauffement	11
1.3.3 Rendement d'une machine.....	12
Chap. II : INVENTAIRE EXHAUSTIF DES PROCEDURES DE REBOBINAGE ...	14
2.1 Caractéristiques de la procédure générale de rebobinage des alternateurs... 14	14
2.1.1 Quelques définitions	14
2.1.2. Notation	15
2.1.3 Type de bobinages :.....	15
2.1.4 Caractérisation	15
2.2 Procédure de rebobinage d'un alternateur.....	16
2.3 Imprégnation et séchage des enroulements	18
2.3.1 Imprégnation.....	18
2.3.2 Séchage	19
2.4 Contrôle et essais lors du rebobinage des machines électriques	20
2.5 Caractéristique de la procédure adoptée par la SECREN :	20

2.5.1 Les étapes de la procédure :	20
2.5.2 Avantage de cette procédure	21
2.5.3 Inconvénients de la procédure.....	21
2.6 Résumé.....	22
CHAP 3 ETUDE PROPRE POUR LA DEFALLAINCE DE LAPROCEDURE ADOPTEE PAR LA SECREN.....	23
3.1 Présentation du problème	23
3.2 Rappel de la procédure.....	23
3.2.1 Pour les alternateurs en état de marche.....	23
3.2.2 Pour les alternateurs cramés.....	23
3.3 Etude propre de la procédure	24
3.3.1 Influence de la température sur la résistivité	24
3.3.2 Effet sur les machines	25
3.4 Proposition des solutions	29
3.5 Technologie de réparation des enroulements ces machine électrique.....	31
Chap.4 DIMENSIONNEMENT D'UNE MACHINE SYNCHRONE	37
4.1 Choix des matériaux à utiliser	37
4.1.1 Matériaux magnétiques	37
4.1.2 Matériaux conducteurs	38
4.1.3 Matériaux isolants.....	39
4.1.4 Les matériaux de construction.....	42
4.2 Dimensions principales	42
4.3 Dimensionnement de la roue polaire et du stator.....	44
4.3.1 Diamètre du dos de stator	44
4.3.2 Diamètre d'alésage D_{a1}	45
4.3.3 Le coefficient de bobinage :.....	45
4.3.4 Longueur de la machine et du fer	46
4.3.5 Le rapport λ	48
4.3.6 L'entrefer δ	49
4.3.7 Le rotor diamètre d'alésage D_{a1} , diamètre de l'arbre D_2 , longueur	50
4.3.8 Nombre d'encoches.....	50

4.4 L'enroulement des machines à courant alternatif.....	51
4.4.1 Généralités	51
4.4.2 L'enroulement statorique :	51
4.5-Dimensionnement des encoches	53
Chap. 5 PROGRAMME DE CALCUL DE BOBINAGE D'UNE MACHINE A COURANT ALTERNATIF	59
5.1 Choix de l'outil de programmation.....	59
5.2 Les données de calcul	59
5.3 Présentation du logiciel :	61
5.4 Organigramme de calcul :	63
5.5 Schéma étalé d'un enroulement réalisé à q fractionnaire	69
5.6. Essai et validation du Logiciel	70
5.6.1. Les données	70
5.6.2. Premiers résultats.....	71
5.6.3. Résultats finals	72
CONCLUSION GENERALE	73
TABLE DES MATIERES	74
BIBLIOGRAPHIE	1
ANNEXES.....	2

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Perron, Elément d'électrotechnique de puissance.
- [2] Jean Châtelain, Traité d'électricité Vol X, machine électrique, Edition Géorgie 1983.
- [3] RAMAROSATA Ferdinand A., réparation des moteurs asynchrone à cage et du module de charge R-L-C du laboratoire du Réseau Electrique E.S.P.A, AU 2006.
- [4] RANDRIAMAITSO Téléshore, A la recherche des méthodes de calcule des machine électrique, promotion TODAY, Décembre 2003.
- [5] Philippe Robert, traité d'électricité Vol. II, matériaux de l'électrotechnique, Presse Polytechniques Romandes, troisième Edition 1987.
- [6] A. Fouillé, Dunod 8^{ème} édition 1969, Bordas 9^{ème} édition 1973 Electrotechnique à l'usage des ingénieurs Tome II, machines électrique à courant alternatif.
- [7] Guy SEGUIER, Francis NOTELET, Technique et documentation 1977, Electrotechnique industriel.
- [8] RABE Tsirobaka A.U 2005, Cours de dimensionnement.
- [9] André FAUSSURIER, Robert SERVANT, les matériaux électrotechnique, I.U.T génie électrique, Dunol1971.
- [10] Philippe BARRET, les cours de l'école supérieure d'électricité, Régime transitoire des machines tournantes électriques, Edition Eyrolles 1987.
- [11] La Bible
- [12] L. PASTOURIAUX et A. VAROQUAUX, Electricité Industrielle courant alternatif, Paris Librairie Delagrave, 1954.
- [13]R. GHEMKE, Dépannage de machine électrique Edition Mir Moscou, 1978.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Manuel d'utilisation du logiciel

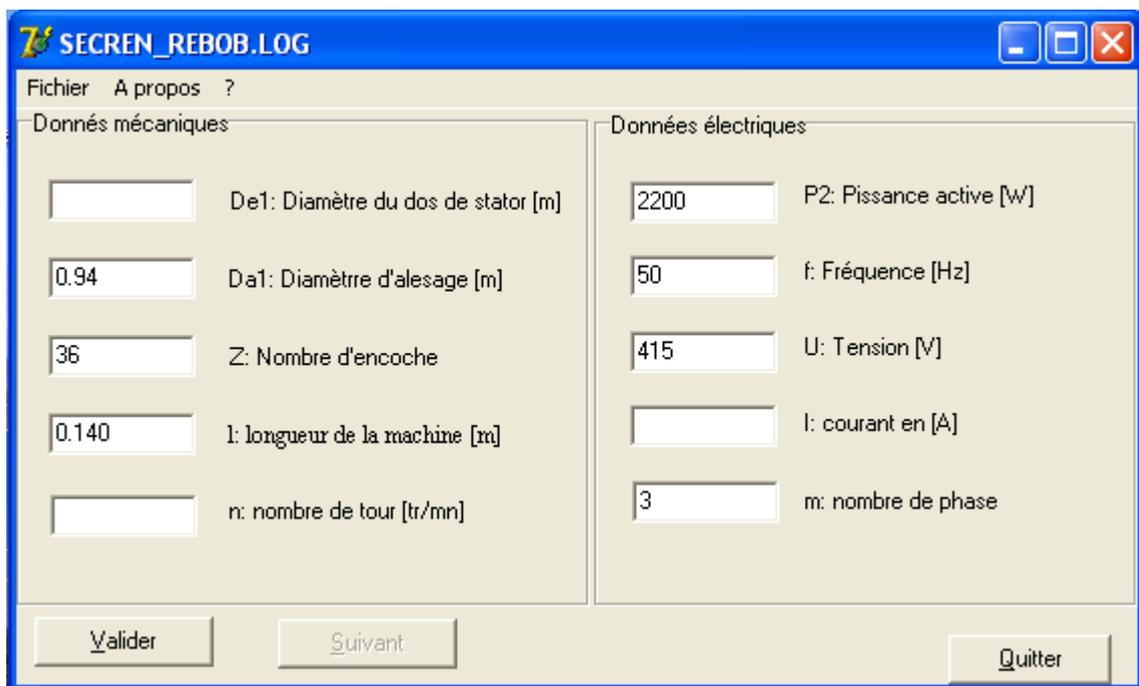
A.1.1 Présentation :

Sur le bureau de votre ordinateur doit se trouver l'icône sur la figure suivant :



Fig. A1 : L'icône de raccourci du logiciel.

En double cliquant sur cet icône on obtient l'interface suivant :

The screenshot shows a software window titled "SECREN_REBOB.LOG". It has a menu bar with "Fichier", "A propos", and "?". The window is divided into two main sections: "Données mécaniques" on the left and "Données électriques" on the right. Each section contains several input fields with labels and units. At the bottom, there are three buttons: "Valider", "Suivant", and "Quitter".

Données mécaniques		Données électriques	
<input type="text"/>	De1: Diamètre du dos de stator [m]	<input type="text" value="2200"/>	P2: Pissance active [W]
<input type="text" value="0.94"/>	Da1: Diamètre d'alesage [m]	<input type="text" value="50"/>	f: Fréquence [Hz]
<input type="text" value="36"/>	Z: Nombre d'encoche	<input type="text" value="415"/>	U: Tension [V]
<input type="text" value="0.140"/>	l: longueur de la machine [m]	<input type="text"/>	I: courant en [A]
<input type="text"/>	n: nombre de tour [tr/mn]	<input type="text" value="3"/>	m: nombre de phase

Fig. A2 : interface de saisie des données.

Cette interface permet la saisie des données nécessaires pour les autres étapes de calcul. Après avoir saisie les données nécessaires, il faut appuyer sur le bouton « valider » afin de valider les données ; il est ici à noter que, les cases qui sont déjà remplis sur la figure doivent être remplies par les valeurs correspondantes.

Sur cette figure le bouton « suivant » n'est pas activé, mais après avoir appuyer sur le bouton « valider », celui-ci deviendra automatiquement actif. On obtient alors la figure suivante :

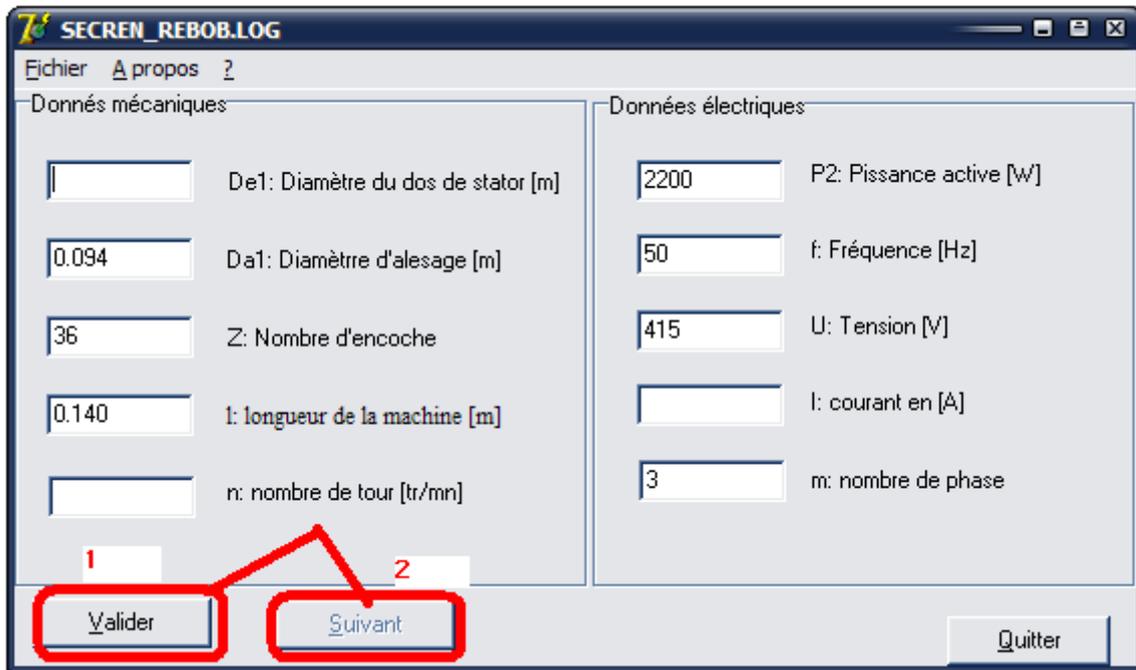


Fig. A.3 : Interface des données après avoir cliqué sur « valider ».

Après cela, il faut cliquer sur le bouton « Suivant » pour la suite des calculs

A1.2 Interface des données à calculer

Voici la figure montrant l'étape de ce calcul :

Nombre de spires calcul

Calcul de B entrefer

2p 4 Calculer Be

Bentrefer

Choix de P2 pour calcul de Ctv

P2 <= 1e3 [kW]

1e3 < P2 <= 1e4 [kW]

1e4 < P2 <= 1e6 [kW]

P2 > 1e6 [kW]

Choix du pas polaire

Pas diamétral

Pas raccourci (recommandé)

Pas rallongé

Calcul de Ctv et de de Ui

Ctv

Ui

Calculer

Nombre d'encoche par pôle et par phase

q entier

q fractionnaire

Calculer Suivant Fermer

Fig. A.4 : Interface des données à calculer.

Ici, seul le bouton « Calculer Be » est activé, donc il faut cliquer sur ce bouton et la case « Choix de P2 pour le calcul de Ctv », puis il faut cliquer sur l'intervalle où se trouve P2 et le bouton dans le panel « calcul de Ctv et de Ui » devint activé. En cliquant sur ce bouton, on obtient la valeur de Ctv et de Ui, et en même temps, on fait apparaître un autre panel en haut à droite de l'interface.

The screenshot shows a software window titled "Nombre de spires calcul" with a blue border and a close button in the top right. The interface is divided into several panels:

- Calcul de B entrefer:** Contains a text box for "2p" with the value "4", a text box for "Bentrefer" with the value "0,708", and a button labeled "Calculer Be". A black box highlights this button, with a black arrow pointing down to the number "1".
- Choix de P2 pour calcul de Ctv:** Contains four radio button options:
 - P2 <= 1e3 [kW]
 - 1e3 < P2 <= 1e4 [kW]
 - 1e4 < P2 <= 1e6 [kW]
 - P2 > 1e6 [kW]A black box highlights these options, with a black arrow pointing down to the number "2".
- Calcul de Ctv et de Ui:** Contains text boxes for "Ctv" (value "0,909") and "Ui" (value "377"), and a button labeled "Calculer". A black box highlights this button, with a black arrow pointing down to the number "3".
- Pas polaire, longueur idéale, flux:** Contains text boxes for "Tau: pas polaire", "Li: longueur idéale", "Longueur entrefer:", and "PHI: Flux". A dropdown menu for "Co:" is set to "0.5". A button labeled "Calculer" is to the right of the "Li" field.
- Choix du pas polaire:** Contains three radio button options:
 - Pas diamétral
 - Pas raccourci (recommandé)
 - Pas rallongé
- Nombre d'encoche par pôle et par phase:** Contains two radio button options:
 - q entier
 - q fractionnaire

At the bottom of the window are three buttons: "Calculer", "Suivant", and "Fermer".

Fig. A.5 : Les étapes à suivre.

Maintenant, le bouton « calculer » du panel « pas polaire, longueur idéale, flux est inactif » car il faut d'abord choisir la valeur de C_0 nécessaire pour le calcul de la longueur idéale et qui activera aussitôt le bouton pour obtenir les valeurs à calculer.

Puis, le click sur le bouton présumé activera les autres panels, il n'est pas nécessaire de cliquer sur le choix de pas polaire car le pas recommandé est déjà choisi, il faut sauter directement au choix du nombre d'encoche par pôle et par phase ; que celui-ci soit entier ou fractionnaire.

Fig. A.6

Après cela, il faut appuyer sur le bouton « calculer » se trouvant en bas à gauche de l'interface, si q est entier afin d'effectuer le calcul de l'étape suivante, et le bouton « suivant » sert à afficher les résultats.

Par contre, si q est fractionnaire, en cliquant sur le radio bouton « q fractionnaire », on fait sortir une boîte de dialogue demandant d'insérer certaines valeurs utiles pour la prochaine étape.

Fig. A.7 Etape à suivre si q entier.

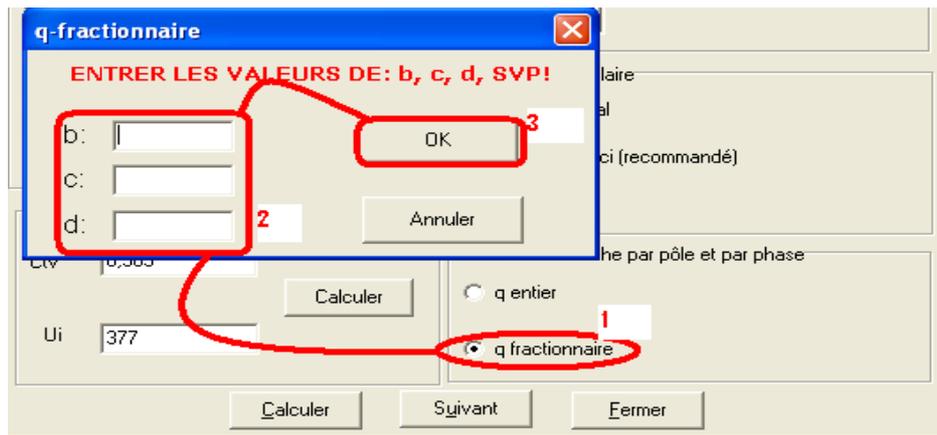


Fig. A.8 : Etape à suivre si q-fractionnaire.

Le bouton « fermer » sert à sortir de cette interface et revenir à l'interface précédente.

A.1.3 Interface des résultats

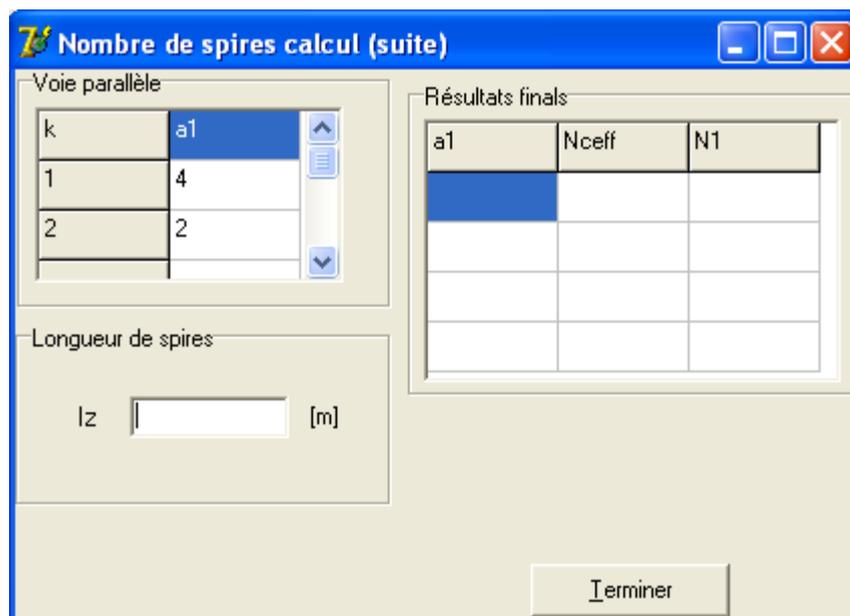


Fig. A.8 : l'interface des résultats.

Les résultats s'affichent suivants les panels correspondants. Le bouton « terminer » sert à fermer le logiciel complètement comme le bouton « quitter » de l'interface de saisie des données.

ANNEXE 2 : FICHE TECHNIQUE DE REPARATION DES MACHINES
ELECTRIQUES DE LA SOCIETE SECREN SA

PROCÉDURE	BORD	At.Concours	At.Pilote	OBSERVATION																									
<input type="checkbox"/> Relevé des caractéristiques sur plaque signalétique <table data-bbox="241 319 974 606" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>BÂTIMENT</td> <td>TYPE</td> <td>INTENSITÉ</td> </tr> <tr> <td>C.O.</td> <td>N° de série</td> <td>FRÉQUENC E</td> </tr> <tr> <td>NATURE</td> <td>PUISSANCE</td> <td>VITESSE</td> </tr> <tr> <td>MARQUE</td> <td>TENSION</td> <td>INTENSITÉ Excité</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>TENSION Excité</td> </tr> </table> <input type="checkbox"/> Essai avant démontage effectué en présence de l'armateur ou de son représentant à bord et assisté par CE, CM, CS, STP (CD si possible) <input type="checkbox"/> Relevé des paramètres suivants : <table data-bbox="241 925 1052 1117" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>U (V)</th> <th>I (A)</th> <th>P (KW)</th> <th>n (T/mn)</th> <th>f (Hz)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="height: 40px;"></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> NB : L'essai sera effectué jusqu'à 50% de charge au moins <input type="checkbox"/> Vérification des appareils de mesure sur le T.P (Voltmètre, Ampèremètre, Wattmètre, Tachymètre, Synchronoscope) <input type="checkbox"/> En cas d'essai impossible, établir une lettre de réserve	BÂTIMENT	TYPE	INTENSITÉ	C.O.	N° de série	FRÉQUENC E	NATURE	PUISSANCE	VITESSE	MARQUE	TENSION	INTENSITÉ Excité			TENSION Excité	U (V)	I (A)	P (KW)	n (T/mn)	f (Hz)									
BÂTIMENT	TYPE	INTENSITÉ																											
C.O.	N° de série	FRÉQUENC E																											
NATURE	PUISSANCE	VITESSE																											
MARQUE	TENSION	INTENSITÉ Excité																											
		TENSION Excité																											
U (V)	I (A)	P (KW)	n (T/mn)	f (Hz)																									

- Détermination et préparation des matériels ou outillages nécessaires à l'exécution du travail (clés, tournevis, ...etc)
- Repérage de tous les câbles des sorties
- Débranchement (suivi des observations constatées lors de débranchement, tenir compte de l'état de la plaque à bornes, des cosses, des fils de sortie , ...etc)
- Débranchement du régulateur
- Mesure des résistances d'isolement électrique

	Stator	Rotor	Stator excité	Rotor excité
Ph1-Ph2				
Ph1-Ph3				
Ph2-Ph3				
M - Ph1				
M - Ph2				
M - Ph3				
M - Enr				

Annexe 2

PROCÉDURE	BORD	At.Concours	At.Pilote	OBSERVATION
<input type="checkbox"/> Dépose du régulateur En cas de régulateur électronique - A conserver à l'atelier après résultat d'essai satisfaisant - A conserver à bord si l'essai est impossible				
<input type="checkbox"/> Désaccouplement de l'alternateur (suivi des observations s'il y a des anomalies): assuré par les motoristes.				
<input type="checkbox"/> Préparation et soudure des pitons (assuré par la tolérie bord et l'ins- truction des manutentionnaires)				
<input type="checkbox"/> Déplacement de l'alternateur dans un endroit convenu (assuré par manutentionnaire)				
<input type="checkbox"/> Débarquement et transport à l'atelier (assuré par manutentionnaire)				
<input type="checkbox"/> Démontage de tourteau (assuré par Motoriste)				
<input type="checkbox"/> Démontage de tourteau (assuré par Motoriste)				

Annexe 2

<input type="checkbox"/>	Repérage flasques, fasquettes, porte-visites, arbre				
<input type="checkbox"/>	Démontage de l'ensemble (des observations à faire sur ce qu'on a trouvé lors de démontage)				
<input type="checkbox"/>	Extraction du rotor (suivre à la lettre les instructions des électriciens)				
<input type="checkbox"/>	Contrôle de l'amarrage du rotor				
<input type="checkbox"/>	Dépose du rotor sur chevalier				
<input type="checkbox"/>	Vérification de l'état des bobines (frettage, chignons de bobine)				
<input type="checkbox"/>	Vérification de l'état des flasques et cage de roulement côté accouplement				
<input type="checkbox"/>	Vérification de l'état des flasques et cage de roulement côté opposé				
<input type="checkbox"/>	Vérification de l'état des flasquettes				
<input type="checkbox"/>	Vérification de ventilateur				
<input type="checkbox"/>	Vérification de ventilateur				
<input type="checkbox"/>	Vérification de l'état de l'arbre				

Annexe 2

<input type="checkbox"/>	Vérification de l'état de roulement côté accouplement				
<input type="checkbox"/>	Vérification de l'état de roulement côté opposé				
<input type="checkbox"/>	Vérification des états des bagues				
<input type="checkbox"/>	Contrôle des diodes tournantes				

PROCÉDURE	BORD	At.Concours	At.Pilote	OBSERVATION																									
<p><input type="checkbox"/> Mesure des valeurs ohmiques des enroulements</p> <table border="1" data-bbox="237 384 1146 708"> <thead> <tr> <th></th> <th>Stator</th> <th>Rotor</th> <th>Stator excit</th> <th>Rotor excit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ph1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ph2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ph3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Enr</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p><input type="checkbox"/> Établissement obligatoire d'une lettre de réserve en cas de désaccord entre Bord et Atelier</p> <p><input type="checkbox"/> Extraction des roulements (suivant l'avis de l'armateur)</p> <p><input type="checkbox"/> Rectification des bagues (voir atelier Machines Outils)</p> <p><input type="checkbox"/> Cas de remplacement des bagues</p> <p><input type="checkbox"/> Repérage et débranchement des fils</p>		Stator	Rotor	Stator excit	Rotor excit	Ph1					Ph2					Ph3					Enr								
	Stator	Rotor	Stator excit	Rotor excit																									
Ph1																													
Ph2																													
Ph3																													
Enr																													

<input type="checkbox"/>	Extraction des anciennes bagues					
<input type="checkbox"/>	Frettage des flasques (voir atelier Machines Outils)					
<input type="checkbox"/>	Rectification de l'arbre					
<input type="checkbox"/>	Rectification de tourteau					
<input type="checkbox"/>	Confection de clavette					
<input type="checkbox"/>	Usinage de rainure de clavette					
	Cas de rebobinage					
<input type="checkbox"/>	Rebobinage du stator					
<input type="checkbox"/>	Rebobinage du rotor					
<input type="checkbox"/>	Rebobinage de l'inducteur de l'excitatrice	<input type="checkbox"/>	Transformateur de couponnage			

<input type="checkbox"/>	Rebobinage de l'excitatrice	<input type="checkbox"/>	Des selfs				
<input type="checkbox"/>	Repérage des fils de sortie						
<input type="checkbox"/>	Mesure de la longueur développante du côté connexion						
<input type="checkbox"/>	Mesure de la longueur développante du côté opposé à la connexion						
<input type="checkbox"/>	Mesure de la longueur des fils de sortie						
<input type="checkbox"/>	Extraction des roulements						

PROCÉDURE	BORD	At.Concours	At.Pilote	OBSERVATION
<input type="checkbox"/> Immersion du stator et du rotor dans du trichloréthylène ou produit équivalent				
<input type="checkbox"/> Cuisson des fils de bobinage en prenant des précaution sur la chaleur de chauffage(pour				
<input type="checkbox"/> des alternateurs supérieurs ou égaux à 120KVA)				
<input type="checkbox"/> Relevé de schémas				
<input type="checkbox"/> Décorticage des anciens fils émaillés				
<input type="checkbox"/> Relevé des nombres de spires				
<input type="checkbox"/> Nettoyage des encoches avec des écouvillons ou chalumeau				

Annexe 2

<input type="checkbox"/>	Préparation des gabarits des isolants					
<input type="checkbox"/>	Préparation des gabarits des bobines					
<input type="checkbox"/>	Nettoyage avec produit du stator et du rotor					
<input type="checkbox"/>	Nettoyage des pièces mécaniques					
<input type="checkbox"/>	Étuvage du stator et du rotor					
<input type="checkbox"/>	Refection des bobines					
<input type="checkbox"/>	Découpage des cartons isolants					
<input type="checkbox"/>	Refroidissement du stator et du rotor					
<input type="checkbox"/>	Pose des isolants					

Annexe 2

<input type="checkbox"/>	Pose des bobines					
<input type="checkbox"/>	Pose des séparateurs isolants					
<input type="checkbox"/>	Frettage de la développante côté opposé de la connexion					
<input type="checkbox"/>	Pose des cales des encoches					
<input type="checkbox"/>	Mesure des résistances d'isolement électrique					
<input type="checkbox"/>	Protection par graissage de toutes les parties taraudées					
<input type="checkbox"/>	Chauffage à 50°C avant imprégnation (cas de gros alternateur)					
<input type="checkbox"/>	Imprégnation de vernis isolant					
<input type="checkbox"/>	Étuvage au moins 12 h					

Annexe 2

<input type="checkbox"/>	Contrôle des résistances d'isolement électrique				
<input type="checkbox"/>	Grattage et soufflage				
<input type="checkbox"/>	Branchement des fils de sortie				
	Cas de visite de l'alternateur				
<input type="checkbox"/>	Nettoyage de l'ensemble				
<input type="checkbox"/>	Contrôle des résistances d'isolement électrique				

PROCÉDURE					BORD	At.Concours	At.Pilote
<input type="checkbox"/>	Étuvage						
<input type="checkbox"/>	Contrôle des résistances d'isolement électrique à chaud						
<input type="checkbox"/>	Contrôle des résistances d'isolement électrique à froid						
<input type="checkbox"/>	Contrôle par un expert de Bureau Veritas (pour bateau classé)						
<input type="checkbox"/>	Chauffage et application des vernis anti-flash (à protéger avec précaution l'arbre, les cosses, les bagues, les roulements, la plaque signalétique, les trous taraudés)						
<input type="checkbox"/>	Refroidissement						
<input type="checkbox"/>	Contrôle des résistances d'isolement électrique (assister par CE,CM)						
		Stator	Rotor	Stator excité			
				Rotor excité			

Annexe 2

Ph1-Ph2				
Ph1-Ph3				
Ph2-Ph3				
M - Ph1				
M - Ph2				
M - Ph3				
M - Enr				

En cas de résultat douteux avertir l'armateur et proposer une solution adéquate

En cas de désaccord, établir une lettre de réserve

Emmanchement des nouvelles bagues

Emmanchement des roulements neufs

Emmanchement du rotor

Remontage de l'ensemble

Annexe 2

<input type="checkbox"/>	Vérification de l'exactitude de remontage (assisté par CE, CM,CS,CD) STP)			
<input type="checkbox"/>	Essai au banc (cas de l'alternateur < 120 KVA)			
<input type="checkbox"/>	Emmanchement du tourteau assuré par les motoristes			
<input type="checkbox"/>	Transport et embarquement à bord assuré par les Manutentionnaires			
<input type="checkbox"/>	Mise en place assuré par le Manutentionnaires			
<input type="checkbox"/>	Lignage assuré par les motoristes			

PROCÉDURE					BORD	At.Concours	At.Pilote	OBSERVATION
<input type="checkbox"/>	Pose du régulateur							
<input type="checkbox"/>	Contrôle des résistances d'isolement électrique (assisté par CE,CM)							
<input type="checkbox"/>	Branchement							
<input type="checkbox"/>	Essai à vide pendant 15 mn (assisté par CE, CM, CS, , STP, CD)							
<input type="checkbox"/>	A respecter la fréquence indiquée sur la plaque signalétique							
<input type="checkbox"/>	Vérification de l'ordre de phase							
<input type="checkbox"/>	Vérification de tous les paramètres U, I, P							
Heures	P (KW)	I (A)	F (Hz)	Vitesse T/mn				

<input type="checkbox"/>	Charger l'alternateur jusqu'à 50% de charge								
<input type="checkbox"/>	Remettre le P.V. de recette de travaux								
<input type="checkbox"/>	Établissement des rapports techniques de travaux électriques								
<u>N.B:</u>									
- Faire viser par le représentant de Bord le résultat ou constatation pendant l'essai avant démontage et toutes les anomalies intermédiaires éventuelles remarquées.									
- Faire viser par les ateliers de concours leurs remarques.									
-Faire la recette des travaux à chaque fin essai debon fonctionnement									

PROCÉDURE					BORD	At.Concours	At.Pilote	OBSERVATION
<input type="checkbox"/>	Pose du régulateur							
<input type="checkbox"/>	Contrôle des résistances d'isolement électrique (assisté par CE,CM)							
<input type="checkbox"/>	Branchement							
<input type="checkbox"/>	Essai à vide pendant 15 mn (assisté par CE, CM, CS, , STP, CD)							
<input type="checkbox"/>	A respecter la fréquence indiquée sur la plaque signalétique							
<input type="checkbox"/>	Vérification de l'ordre de phase							
<input type="checkbox"/>	Vérification de tous les paramètres U, I, P							
	Heures	P (KW)	I (A)	F (Hz)	Vitesse T/mn			

Charger l'alternateur jusqu'à 50% de charge

Remettre le P.V. de recette de travaux

Établissement des rapports techniques de travaux électriques

N.B:

- Faire viser par le représentant de Bord le résultat ou constatation

pendant l'essai avant démontage et toutes les anomalies intermédiaires éventuelles remarquées.

- Faire viser par les ateliers de concours leurs remarques.

-Faire la recette des travaux à chaque fin essai debon fonctionnement

ANNEXE 3

Tableau 1 : Rendement % en fonction de P_2 pour $\cos \varphi = 0,9$ et $U = 6000 [V]$

$P_2 [KV]$	$n [tr/mn]$							
	1500	1000	750	600	500	375	300	250
315	-	94,2	93,9	93,4	-	91,25	91,27	90,8
400	-	94,6	94	93,9	92,9	91,6	91,94	92
500	-	94,7	94,4	94,3	93,7	92,65	93	93
630	95	95,1	94,9	94,6	94,28	93,4	93,34	93,5
800	95,5	95,6	94,95	95,17	94,42	94,2	93,9	93,9
1000	95,5	95,63	95,5	95,4	95	95	94,4	94,45
1250	-	95,9	95,8	95,54	95,45	95,3	94,66	94,66
1600	-	96,3	96	96	95,85	95,77	95,2	95,0
2000	-	96,8	96,3	96,3	96,2	95,78	95,7	95,4
2500	-	96,8	96,7	96,6	96,5	96,23	95,72	95,65
3200	-	97	96,8	96,88	96,6	96,69	96,1	96
4000	-	97,2	97	96,83	96,76	96,54	96,3	96,28
5000	-	97,3	97,2	97,09	97,07	-	-	-

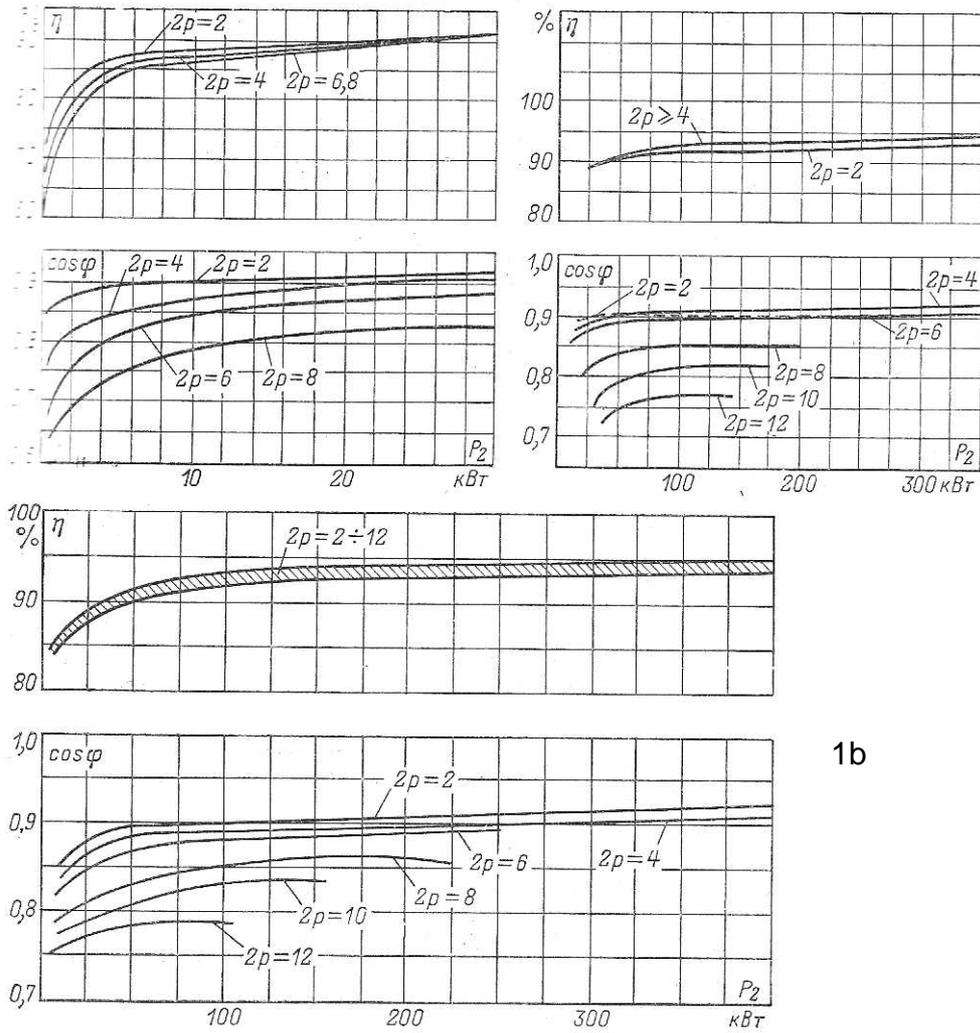
Tableau 2 : Rendement % en fonction de puissance pour $\cos \varphi = 0,8$ et $U = 400 [V]$

$P_2 [KV]$	$n [tr/mn]$			
	1000	600	500	375
125	-	-	90,5	-
160	-	91,3	-	-
200	-	-	91,9	-

250	93	92,6	-	-
315	-	-	92,7	-
400	-	-	-	92,6
500	-	-	-	93,4
630	-	-	-	93,8
800	-	-	-	94,1

Tableau 3 : Rendement d'une machine synchrone en fonction de sa puissance.

$P_c [KV]$	4	8	12	16	20	30	50	60	75	100
$\eta \%$	80	82,2	86	87	87,5	88	90	90,5	91	92,5



1a

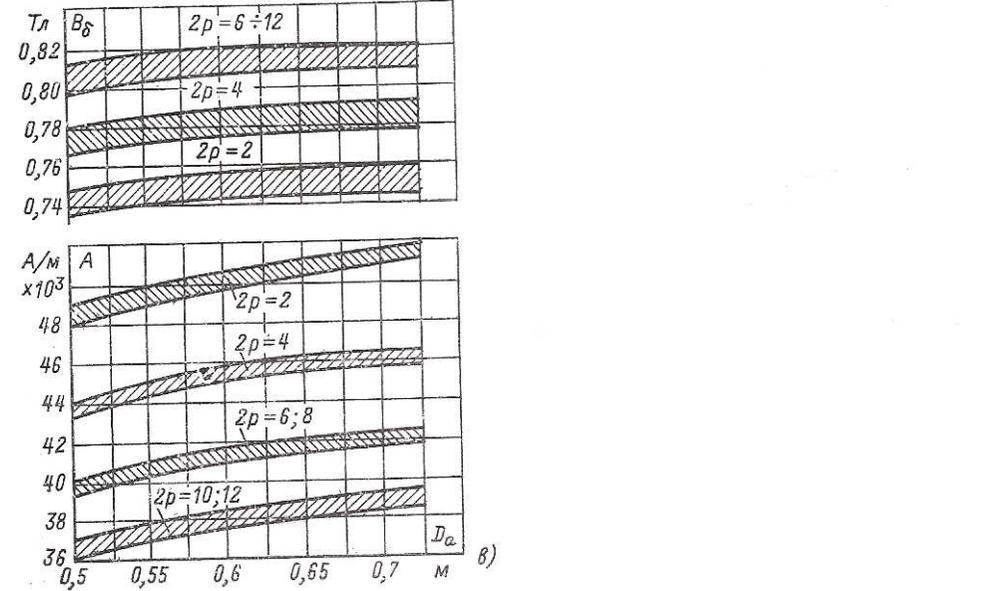
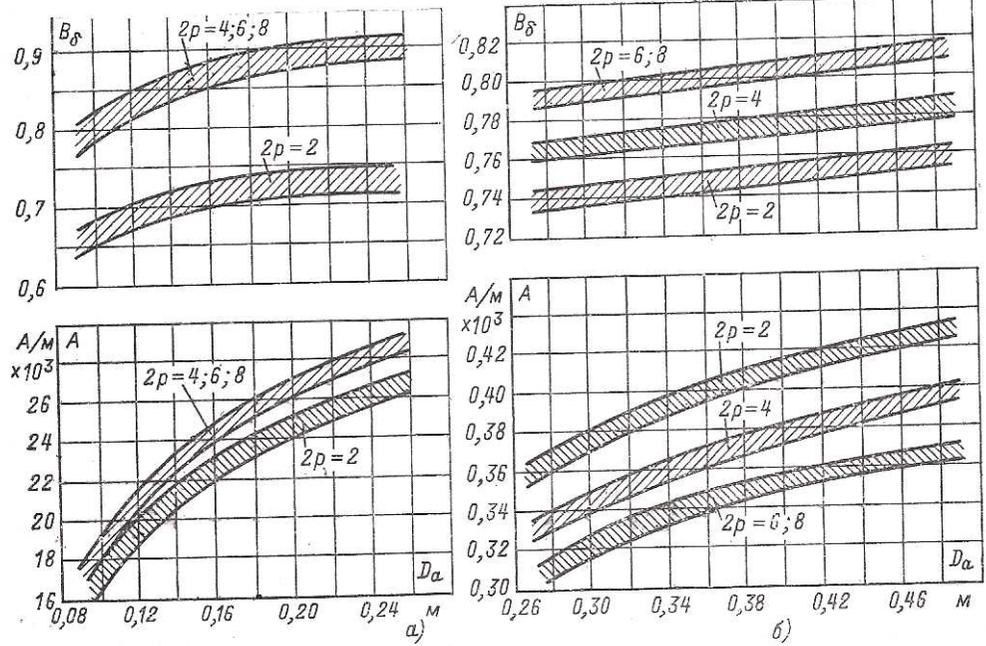
1b

Fig. A.3.1 :

1a : Courbe de rendement et de facteur de puissance en fonction de la puissance utile P_2 [kW] pour IP44

1b : Courbe de rendement et de facteur de puissance en fonction de la puissance utile P_2 [kW] pour IP23

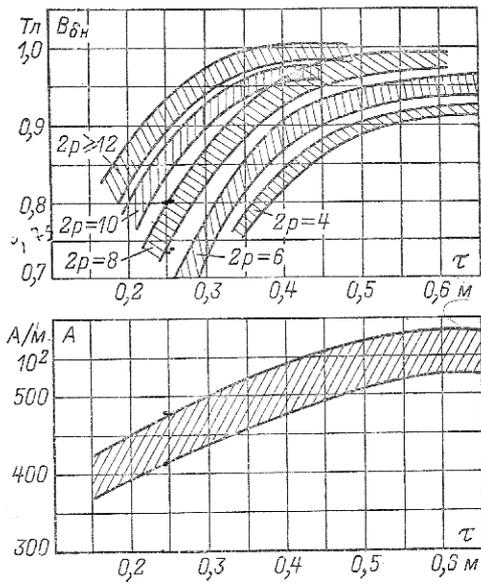
Annexe 3



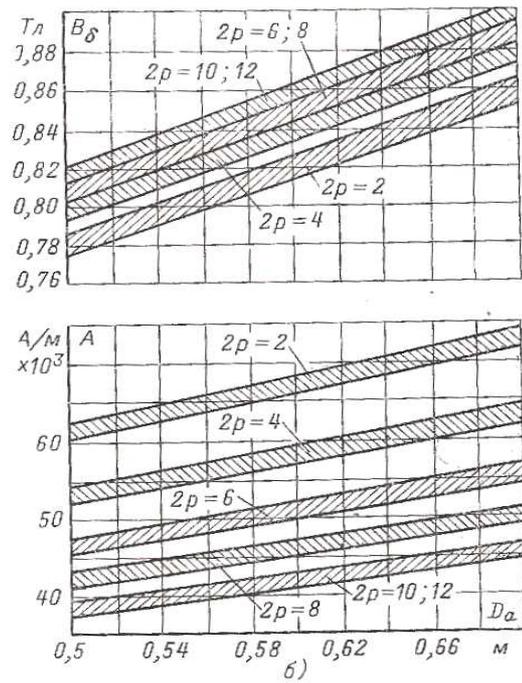
a) Induction d'entrefer et densité de courant en fonction du diamètre extérieure IP44
 $h \leq 132\text{mm}$;

b) Induction d'entrefer et densité de courant en fonction du diamètre extérieure IP44
 $160 \leq h \leq 250\text{mm}$;

c) Induction d'entrefer et densité de courant en fonction du diamètre extérieure IP44
 $h \leq 132\text{mm}$



Induction d'entrefer et densité de courant en fonction de pas polaire



Induction d'entrefer et densité de courant en fonction du diamètre extérieure IP23

Annexe 3

Nature	P [Kw]	I (A)	V (V)	L (mn)	D (mm)	S [mm ²]	N _z	Z	D fil [mm]	Connexion	flux k _{rcu}	B _d	p
*423** Moteur pompe	$q = 1$ 0,37/0,45		220/380	50	58	72	120	24	50/100	Y série	0,00206	0,71 D=7+4	2 pôles 4,7
415* Pompe de cale	$q = 1$ S.p		220/380	125	102	63	50	36	85/100	Y série	0,00303	0,77 D=13	6 pôles
422** Compresseur d'air conditionné	2 faisceaux		380	270	170	168	14	36	85/100 *4 80/100	▲ Série //	0,0203	0,88	4 pôles
415* Pompe de cale	S.p			126	92	85	30	36	65/100 60/100*2	Y série	0,00550	0,24	4 pôles
421* moteur réfrigération	$q = 1$ 0,5			50	57	43	100	24	45/100	Y série	0,00247	0,89	6 pôles
Moteur pont roulant	$q = 1$ 11	19,7 /22	380	100	204	182	12	54	145/100 *3	Y série	0,00917	0,74 D=5,5	6 pôles
Pompe sonore	7,5 2 faisceaux		380	133	119	98	21	36	80/100 *2	▲ Série	0,00679	D=10 0,85	6 pôles
	$q = 2$			155	148	135	14	36	85/100 *4				4 pôles

Annexe 3

	11												
	2,2		220/380	57	80	53	47	36	45/100 *2	Y série	0,00351	0,77	2 pôles
Pompe incendie	7,5			84	190	146	25	48	112/100 *2	⚡ 380 // ⚡ 220	0,0122 0,00707	0,76	2 pôles
Moteur pompe JIRAMA			380/660	116	122	68	25	48	85/100*4	⚡ 380		0,44	2 pôles
Pompe à huile	$\alpha = 1$ 3,6	64	440/60Hz	101	76	78	38	24	80/100*3	Y série			2 pôles
Extracteur			380	57	80	53	47	36		Y série		5,6	
Moteur agitateur	$\alpha = 1$ 0,37	1,2/2,7	380/220	61	71		202 142	24 24	33 ,6/100 23 ,6/100	Y série Y série		44/7	4 pôles 4 pôles
Moteur treuil	A=1 11		220/380	135	141	115	29	48	85/100*2 80/100			D=5	4 pôles
électropompe	A=1 1,5 2cv	7,0/4,0	230-240 400-4,5	102	65	60	50	24	1*80/100				2 pôles
Excitatrice JIRAMA				60	230	83	11	48	118/100*2				
Rotor alternateur							52	4	236/100*2				

Annexe 3

JIRAMA									1,45*6,20				
Pompe TUGEN	2,2		415	140	94	60	31	36	65/100 71/100	Y série			4 pôles
Moteur				116	122	68	25	36	85/100 90/100				4 pôles
Moteur		24/41	380/660	195	190	187	38	36	95/100*3	Δ //			2 pôles
Moteur				72	60	92	41	24	71/100 75/100	Y série			
Moteur				72	60	92	45	24	50/100*2	Y série			2 pôles