UNIVERSITE D'ALGER

DEPARTEMENT ELECTRICITE

FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTRONIQUE

1978

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET : CALCUL D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE

1600 KVA – 6000/400V – Dyo 11

PROPOSE PAR : Mr V. STIRBU

REALISE PAR : Mr M. MEGHERBI

REMERCIEMENTS

Je remercie tous ceux qui ont participé à ma formation, en particulier Monsieur V. STIRBU qui a bien voulu diriger ce projet.

J'adresse aussi mes remerciements à tous ceux qui ont contribué à l'accomplissement de ce Travail.-

Introduction

Que ce soit dans l'industrie ou pour les usages domestiques, l'energie électrique est très utiliseé, et cela parce-qu'elle présenté de nombreux avantages par rapport aux autres formes d'énergie.

Cependant, cette énergie sera souvent produité loin du lieu de consommation, aussi faudra t'il souvent la Transporter sur de Très grandes distances..

Afin d'améliorer la capacité de Transit des lignes electriques, le Transport se fera sous tension élevée du lieu de production jusqu'au lieu de consommation où cette tension sera abaissée..

Ces deux fonctions, élevation et abaissement de la tension, sont réalisées par des organes appelés "Transformateurs de puissance".

Le Travail qui suivra est un calcul d'un de ces Transformateurs de puissance..

Caractéristiques principales du transformateur calculé.

Puissance nominale	$S_n = 1600 KVA$
Tension primaire nominale	$U_{2n} = 6000 V$
Tension secondaire nominale	$U_{1n} = 400 V$
Tension de court-circuit	$U_{cc} = 5\% U_n$
Pertes en court-circuit.	$P_{cc} = 18,4 Kw$
Courant à vide	$I_0 = 2,5\% I_n$
Pertes à vide	$P_0 = 0,18\%$

Réglage de la tension à $\pm 5\%$ de U_{2n}.

Couplage ΔY_{011}

Refroidissement naturel à l'huile.

I. Calcul du circuit magnétique et des enroulements

A. Dimensionnement du circuit magnétique et des enroulements.

a. Détermination du diamètre du cercle où sera inscrite la colonne.

Ce diamètre D du cercle où sera inscrite la colonne est donné par la formule

$$D = 1,9 \sqrt[4]{\frac{a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{(K_u)^2 \, (\hat{B}_c)^2 \cdot u_{ccr}}} \quad [\mathrm{cm}]$$

Dans cette formule :

a_r : représente la largeur rapportée du canal de fuite. [cm].

β représente le facteur de sveltesse du transformateur.

K_R représente le coefficient de Rogowsky.

K_u représente le facteur d'utilisateur de la surface du cercle.

S_c représente la puissance par colonne [KVA]

$\hat{B}_c$ représente l'induction maximale [T].

u_{ccr} représente la composante réactive de la tension de court-circuit, elle est exprimée en % de la tension nominale.

A l'exception de S_c qui est fixe, les facteurs entrant dans cette formule ne seront connus qu'une fois le transformateur dimensionné. On procédera donc ainsi : on choisit les valeurs de ces paramètres en se basant sur l'expérience déjà acquise dans le domaine de la construction des transformateurs. Une fois que l'on peut déterminer l'un de ces facteurs avec précision, on le fera et seule cette nouvelle valeur sera prise en considération dans la suite des calculs.

- Choix du coefficient de sveltesse β.

Ce coefficient dépend de la puissance du transformateur et de la nature des conducteurs.

Pour une puissance comme la nôtre et des enroulements en cuivre, on a :

$$1{,}75 \leq \beta \leq 3{,}4$$

On prend $\beta = 2{,}15$

- La puissance par colonne est la puissance totale divisée par le nombre de colonnes :

$$S_c = \frac{1600}{3} \qquad S_c = 533{,}33 \text{ KVA}$$

- Choix de l'induction de crête $\hat{B}_c$

Nous utiliserons des tôles en acier laminé à froid, pour ce genre de tôles et une puissance semblable à la nôtre, l'induction de crête prend normalement des valeurs comprises entre 1,62T et 1,68T.

Nous prenons $\hat{B}_c = 1{,}67\,T.$

- Choix du coefficient de Rogowsky.

Ce facteur est, en général, égal à 0,95. Donc on prend dans le calcul préliminaire

$$K_R = 0{,}95$$

- La composante réactive de la tension de court-circuit est :

$$U_{ccr} = \sqrt{U_{cc}^2 - U_{cca}^2}$$

$U_{cc} = 5{,}5\,\%.$

U_{cca} : composante active de la tension de court-circuit. Elle est égale à :

$$U_{cca} = \frac{P_{cc}}{S_n} = \frac{18{,}1}{1600} \cdot 100$$

$$U_{cca} = 1{,}15\,\%.$$

Donc : $$U_{ccr} = \sqrt{(5{,}5)^2 - (1{,}15)^2}$$

$$U_{ccr} = 5{,}38\,\%$$

- Choix du coefficient d'utilisation K_u :

Ce facteur est le produit de deux coefficients K_r et K_g.

K_r, le coefficient de remplissage nous rend compte du fait que le fer n'est pas massif mais feuilleté. Dans notre cas, le noyau est formé de <u>tôles de 0,35 mm d'épaisseur</u>.

Nous prenons alors :

$$K_r = 0{,}95$$

K_g, le facteur géométrique tient compte du fait que la section du fer n'est pas circulaire mais formée d'un certain nombre de gradins.

Dans notre cas, le noyau sera constitué de 6 gradins et l'on prendra

$$K_g = 0{,}93$$

On a alors :

$$K_u = 0{,}88.$$

- Calcul de la largeur rapportée du canal de fuite :

Elle est donnée par la formule :

$$a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

Dans cette formule, les différentes grandeurs sont :

a_{12} : distance entre les enroulements de haute et de basse tension.

a_1: épaisseur de l'enroulement de basse tension.

a_2: épaisseur de l'enroulement de haute tension.

a_{12} dépend de la tension la plus haute, ici nous avons une tension 6KV qui correspond à une tension d'essai de 22KV, et l'on prend

$$a_{12} = 1\text{ cm}.$$

Le facteur $\frac{a_1+a_2}{3}$ se calcule à ce stade de calcul par la formule

$$\frac{a_1+a_2}{3} = K\sqrt[4]{S_c}$$

Pour une puissance de l'ordre 533,33 KVA par colonne et une tension de 6KV, on peut prendre $K = 0{,}5$.

D'où $$\frac{a_1+a_2}{3} = 0{,}5\sqrt[4]{533{,}33} = 2{,}4\text{ cm}$$

et l'on tire :

$$a_R = 1 + 2{,}4 = 3{,}4\text{ cm}$$

$$a_R = 3{,}4\text{ cm}.$$

Connaissant toutes ces valeurs, on peut déduire celle du diamètre :

$$D = 1{,}9\sqrt[4]{\frac{3{,}4 . 2{,}15 . 0{,}95 . 533{,}33}{0{,}88^2 . 1{,}67^2 . 5{,}38 . 10^{-2}}} = 25{,}39\text{ cm}$$

On prend $D = 25{,}40\,cm$.

Connaissant le diamètre et le coefficient d'utilisation, on peut avoir la section de fer.

Le diamètre étant de beaucoup inférieur à 35cm, le noyau peut être réalisé sans canaux de refroidissement.

- Calcul de la section de fer S_{Fe}:

La section de fer ne sera connue que lorsqu'on aura sa géométrie exacte. La section sera constituée de 6 gradins dont les longueurs seront:

0,96D, 0,885D; 0,775D; 0,631D; 0,465D; 0,28D.

On appellera h_i l'épaisseur, dans une moitié de disque de rayon D, du $i^{ème}$ gradin, et l_i sa longueur, ainsi la surface occupée par le i-ème gradin sera:

$$S_{gi} = 2\, l_i . h_i$$

La valeur exacte de h_i ne sera connue qu'avec le nombre exact de tôles comprises dans le i-ème gradin.

On procédera de la manière suivante: On considérera la longueur d'un gradin égale à l'une des valeurs citées précédemment.

On pourra alors connaître la hauteur approximative h'_i, on divise h'_i par l'épaisseur d'une tôle et l'on trouve le nombre de tôles que l'on arrondit s'il le faut. On multiplie ce nombre par l'épaisseur d'une tôle et l'on aura l'épaisseur h_i et l'on calcule l_i.

- Surface occupée par le premier gradin :

$$h'_1 = \left[1 - 0{,}96^2\right]^{1/2} . 127 = 35{,}56 \text{ mm}.$$

Nombre de tôles :

$$n'_1 = \frac{35{,}56}{0{,}35} = 101{,}6.$$

On arrondit à $n_1 = 102$

$$h_1 = 102 . 0{,}35 = 35{,}70 \text{ mm}.$$

$$l_1 = 2\left[127^2 - 35{,}70^2\right] = 243{,}76 \text{ mm}.$$

$$S_{g_1} = 2 . 243{,}76 . 35{,}70$$

$$S_{g_1} = 17404{,}46 \text{ mm}^2$$

- Surface occupée par le second gradin :

$$h'_2 = \left(1 - 0{,}885^2\right)^{1/2} . 127 - 35{,}70 = 23{,}43 \text{ mm}$$

Nombre de tôles :

$$n'_2 = \frac{23{,}43}{0{,}35} = 66{,}94$$

On arrondit à $n_2 = 67$

$$h_2 = 67.0,35 = 23,45 \text{ mm}.$$
$$l_2 = 2\left[127^2 - (23,45+35,70)^2\right]^{1/2}$$
$$l_2 = 224,77 \text{ mm}.$$

$$S_{g_2} = 2.224,77.23,45$$
$$S_{g_2} = 10541,67 \text{ mm}^2$$

- Surface occupée par le troisième gradin :

$$h'_3 = 80,259 - 35,70 - 23,45 = 21,11 \text{ mm}.$$

Nombre de tôles :

$n'_3 = 60,31$. On arrondit à : $n_2 = 60$

$$h_3 = 60.0,35 = 21 \text{ mm}.$$
$$l_3 = 197,03 \text{ mm}.$$
$$S_{g_3} = 2.197,03.21$$
$$S_{g_3} = 8275,16 \text{ mm}^2.$$

Pour le quatrième gradin, nous aurons 53 tôles.

$$h_4 = 18,55 \text{ mm}.$$
$$l_4 = 159,84 \text{ mm}.$$
$$S_{g_4} = 2.159,84.18,55$$
$$S_{g_4} = 5930,11 \text{ mm}^2$$

Pour le cinquième gradin, nous aurons 39 tôles.

$$h_5 = 13,73 \text{ mm}.$$
$$l_5 = 118,43 \text{ mm}.$$

$$S_{g_5} = 2 \cdot 118,43 \cdot 13,73$$

$$S_{g_5} = 3233,17 \, mm^2.$$

Pour le sixième gradin, nous aurons 27 tôles.

$$h_6 = 9,45 \, mm.$$

$$l_6 = 71,94 \, mm.$$

$$S_{g_6} = 2 \cdot 71,94 \cdot 9,45$$

$$S_{g_6} = 1359,62 \, mm^2$$

La section géométrique occupée par les six gradins est :

$$S_{gt} = S_{g_1} + S_{g_2} + S_{g_3} + S_{g_4} + S_{g_5} + S_{g_6}.$$

$$S_{gt} = 46744,06 \, mm^2$$

La section de fer est alors :

$$S_{Fer} = S_{gt} \cdot K_r$$

$$= 46744,06 \cdot 0,95$$

$$S_{Fe} = 44406,86 \, mm^2.$$

. Calcul du nombre de spires nécessaires pour les enroulements de basse tension et de haute tension :

La tension par spire est donnée par la formule suivante :

$$U_{sp_i} = \sqrt{2} \, \pi \cdot f \cdot \hat{B}_c \cdot S_{Fe}$$

$$U_{sp} = 1{,}414 . 3{,}14 . 50 . 1{,}67 . 44406{,}86 . 10^{-6}$$

$$U_{sp} = 16{,}47\,V.$$

Connaissant la tension par spire, on tire le nombre de spires nécessaire pour la basse tension

$$W_1 = \frac{U_{f1}}{U_{sp1}}$$

Comme on a un couplage étoile :

$$U_{f1} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

Donc :

$$W_1 = \frac{400}{\sqrt{3} . 16{,}47} = 14{,}02.$$

On arrondit ce nombre à 14 spires.

$$W_1 = 14 \text{ spires}.$$

On aura donc

$$U_{sp1} = \frac{230{,}95}{14} = 16{,}5\,V.$$

Le nombre de spires de l'enroulement de haute tension est trouvé en se servant du rapport de transformation.

$$W_2 = W_1 . \frac{U_{f2}}{U_{f1}} = 14 . \frac{6000}{230{,}95} = 363{,}72.$$

On arrondit à 363,5 spires.

$$W_{2n} = 363{,}5 \text{ spires}.$$

Le rapport de transformation fixé par le cahier de charges est égal à 25,98.

Le rapport de transformation trouvé est

$$k = \frac{363}{14} = 25{,}93.$$

Cette variation de 0,19% est négligeable.

On prendra:

$$k = 25{,}93.$$

Le nombre total de spires de l'enroulement de haute tension est obtenu en tenant compte des spires de réglage.

$$W_{2t} = 363 \cdot 1{,}05 = 381{,}15$$

On arrondit à 381 spires.

$$W_{2t} = 381 \text{ spires}.$$

C'est ce nombre W_{2t} qui interviendra lors du calcul de la hauteur de l'enroulement de haute tension.

A ce stade de calcul, connaissant la tension par spire et la section de fer, on peut calculer quelle sera la valeur de l'induction de crête.

$$U_{sp} = \frac{6000}{363} = 16{,}5 V.$$

$$\hat{B}_c = \frac{U_{sp}}{\pi \sqrt{2} \cdot f \cdot S_{Fe}} = \frac{16{,}5}{3{,}14 \cdot 1{,}414 \cdot 50 \cdot 44406{,}86}$$

$$\hat{B}_c = 1{,}67 T$$

Cette valeur est égale à celle choisie auparavant.

b. Calcul des enroulements:

Pour calculer les enroulements, il faut connaître les dimensions des conducteurs utilisés. Il faut donc connaître la densité moyenne de courant J_m.

La densité de courant est directement reliée aux pertes cuivre, elle est donnée par la formule:

$$J_m = 7,34 \frac{P_{cc}\ U_{sp}}{K_{pcc}\ S_n \cdot D_{12}} \quad A/mm^2$$

K_{pcc} est un facteur tenant compte du fait que la résistance en courant alternatif est maj-orée par rapport à celle en courant continu à cause de l'effet pelliculaire.

On prendra

$$K_{pcc} = 1,07$$

$D_{12} = D + 2a_{01} + a_{12} + 2a_1.$

a_{01} représente la distance entre le noyau sup-posé circulaire de diamètre D et l'enroulement de basse tension.

a_1 est l'épaisseur de l'enroulement de basse tension.

Pour le moment a_1 n'est pas connu, mais on peut le calculer approximativement par la formule suivante:

$$a_1 = K_{a_1} \sqrt[4]{S_c} \quad [cm].$$

K_{a_1} est pris égal à 0,549.

On aura donc:

$$a_1 = 0{,}549 \sqrt[4]{533{,}33} = 2{,}64 \text{ cm}.$$

$$D_{12} = 25{,}40\text{cm} + 1 + 1 + 5{,}28\text{cm} = 32{,}68\text{cm}.$$

La densité moyenne de courant aura donc pour valeur:

$$J_m = 7{,}34 \frac{1}{1{,}07} \cdot \frac{1{,}15}{100} \frac{16{,}5}{32{,}68.10^{-2}}$$

$$J_m = 3{,}98 \text{ A/mm}^2$$

b_1. Calcul de l'enroulement de basse tension:

Pour l'enroulement de basse tension, la densité sera prise égale à $3{,}8 \text{ A/mm}^2$ pour ne pas avoir des problèmes de refroidissement.

$$J_1 = 3{,}8 \text{ A/mm}^2.$$

La section totale de cuivre en basse tension:

$$S_{w_1} = \frac{I_{f_1}}{J_1}$$

I_{f_1} est le courant de phase de la basse tension. Comme en basse tension, on a un couplage étoile.

$$I_{f_1} = \frac{S_n}{U_1 \sqrt{3}} = \frac{1600.\,10^3}{400.\,1{,}732} = 2309{,}5 \text{ A}.$$

On a donc :

$$S_{W_1} = \frac{2309,5}{3,8} = 607,76 \text{ mm}^2.$$

Pour avoir cette section, on utilisera 14 conducteurs méplats avec deux fils de commencement de 7 conducteurs chacun.

Les dimensions de ces conducteurs seront

$$3,53 \times 12,5 \text{ mm}^2.$$

Compte tenu de l'arrondissement des angles, la section élémentaire s_{W_1} d'un conducteur sera :

$$s_{W_1} = 43,6 \text{ mm}^2$$

On aura donc pour la section totale du cuivre :

$$S_{W_1} = 43,6 \times 14 = 610,4 \text{ mm}^2.$$

et une densité de courant :

$$J_1 = \frac{2309,5}{610,4} =$$

$$J_1 = 3,78 \text{ A/mm}^2$$

Afin de répartir uniformément le courant dans les conducteurs élémentaires, ces derniers doivent avoir une longueur égale. On aura donc recours à des transpositions. Ces transpositions se feront d'un fil à l'autre et ne prendront pratiquement pas d'espace.

Les conducteurs élémentaires seront isolés avec du papier d'une épaisseur $\delta_{io_1} = 0,64$ mm.

La hauteur d'une spire sera donc, compte tenu d'un jeu de 0,1 mm :

$$h_{sp_1} = (12,5 + 0,64 + 0,1)2 = 26,48 \text{mm}.$$

$$h_{sp_1} = 26,48 \text{mm}$$

L'épaisseur d'une spire sera

$$a_1 = 7(3,53 + 0,64 + 0,1) = 29,89 \text{mm}.$$

$$a_1 = 29,89 \text{mm}$$

Entre les spires, on laissera un espace h_{c_1} de 7mm pour permettre à l'huile de bien lécher les conducteurs.

La hauteur de la bobine de basse tension sera donc :

$$h_{B_1} = (14+1)26,48 + 14.7 = 495,2 \text{mm}$$

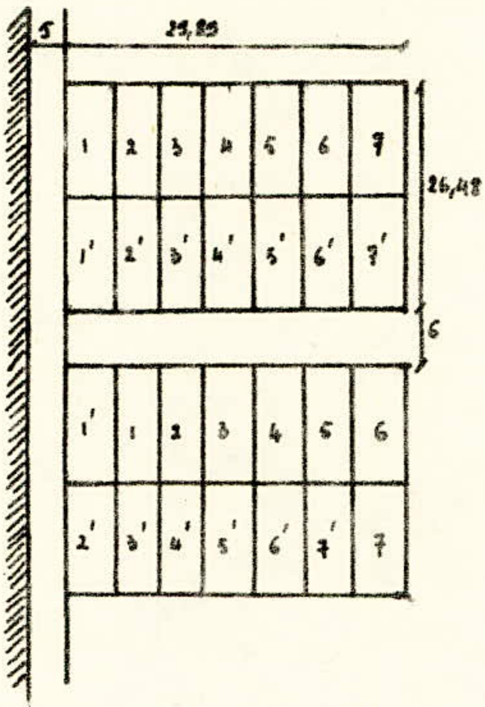
$$h_{B_1} = 495,2 \text{mm}$$

Maintenant on peut calculer D_{12}.

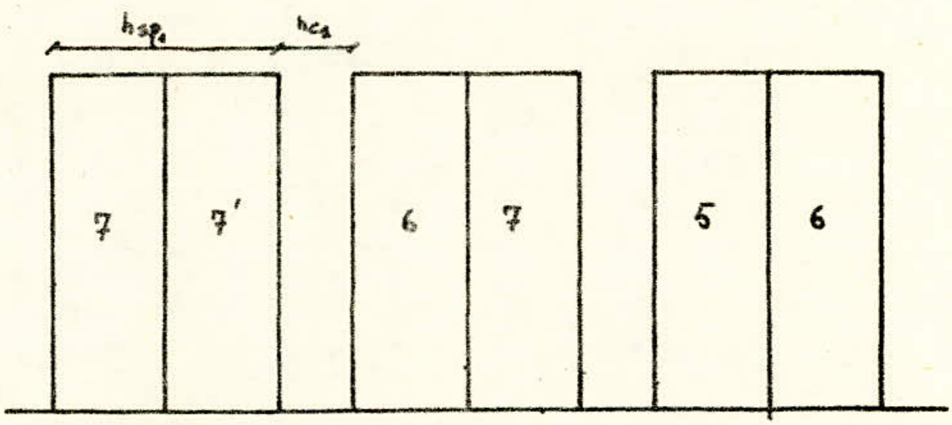
$$D_{12} = 25,4 + 1 + 1 + 2.2,989.$$

$$D_{12} = 33,38 \text{cm}$$

Representation des enroulements de basse tension.



.Disposition des enroulements d'une spire.



Mode derealisation destranspositions lors du passage d'un spire à une autre.

A ce niveau de calcul, on peut faire une vérification sur la valeur du coefficient de sveltesse β. La valeur que l'on trouvera ne doit pas s'éloigner de 20% de celle choisie dans le calcul préliminaire.

$$\beta = \frac{\pi . D_{12}}{h_{B_1}}$$

$$\beta = \frac{3,14 . 333,8}{495,2}$$

$$\beta = 2,12.$$

Cette valeur s'éloigne de 1,3% de celle choisie. On peut continuer les calculs dans lesquels la valeur de β sera celle que l'on vient de recalculer.

b_2. Calcul de l'enroulement de haute tension :

Pour calculer la section du cuivre de l'enroulement de haute tension, on y suppose une densité de courant égale à celle de la basse tension, ce qui donne :

$$S_{\omega_2} = \frac{88,39}{3,78} = 23,4 \text{ mm}^2.$$

On y prend une densité de courant un peu plus grande car les conditions de refroidissement sont plus pénibles. On prendra donc un conducteur méplat de dimensions $a = 2,44$ mm et $b = 9,3$mm.

ce qui donne une surface élémentaire $s_{w_2} = 24 mm^2$. Cette surface est suffisante et l'on a $s_{w_2} = 24 mm^2$ et une densité de courant

$J_2 = 3{,}7 A/mm^2$.

L'enroulement de haute tension sera réalisé en galettes continues.

On utilisera 33 galettes dont 5 de 9 spires chacune et 28 de 12 spires.

La première prise de réglage correspondant à $1{,}05\, U_{2n}$ sera placée sur la première spire.

La prise nominale sera ~~sur le~~ début de la seconde galette, c'est-à-dire à la fin de la 13ème spire.

La prise correspondant à $0{,}95\, U_{2n}$ sera sur le début de la 5ème galette.

Le conducteur sera disposé à plat et isolé avec du papier d'une épaisseur de 0,64 mm.

La hauteur d'une bobine est

$h_{B_0} = 9{,}3 + 0{,}64\, mm$.

$h_{B_0} = 9{,}94 mm$.

L'épaisseur des bobines à 12 spires est :

$a_2 = 13 (2{,}44 + 0{,}64 + 0{,}1)\, mm$

$a_2 = 41{,}34 mm$

Pour avoir la même épaisseur pour toutes les bobines entre les spires des bobines à 9 spires, nous devons intercaler une feuille de papier d'une épaisseur de 1,1 mm.

Entre les bobines, nous laisserons un espace pour le refroidissement $h_{c_2} = 5,73$ mm.

La hauteur de l'enroulement de haute tension pour la prise nominale est

$$h_{B_{2n}} = 31\, h_{B_0} + 30\, h_{c_2}.$$
$$= 31.9,94 + 30.5,73 .$$
$$h_{B_{2n}} = 480\text{mm}.$$

La hauteur totale de l'enroulement haute tension est égale à :

$$h_{B_2} = 32.5,73 + 33.9,94 .$$
$$h_{B_2} = 511,4\text{mm}.$$

L'enroulement haute tension est représenté à la page 20 bis

- Hauteur du noyau magnétique h_{noy}

$$h_{noy} = h_{B_2} + 2\, l_{o_2}.$$

l_{o_2} : distance entre l'enroulement haute tension et la culasse. $l_{o_2} \simeq 40$mm.

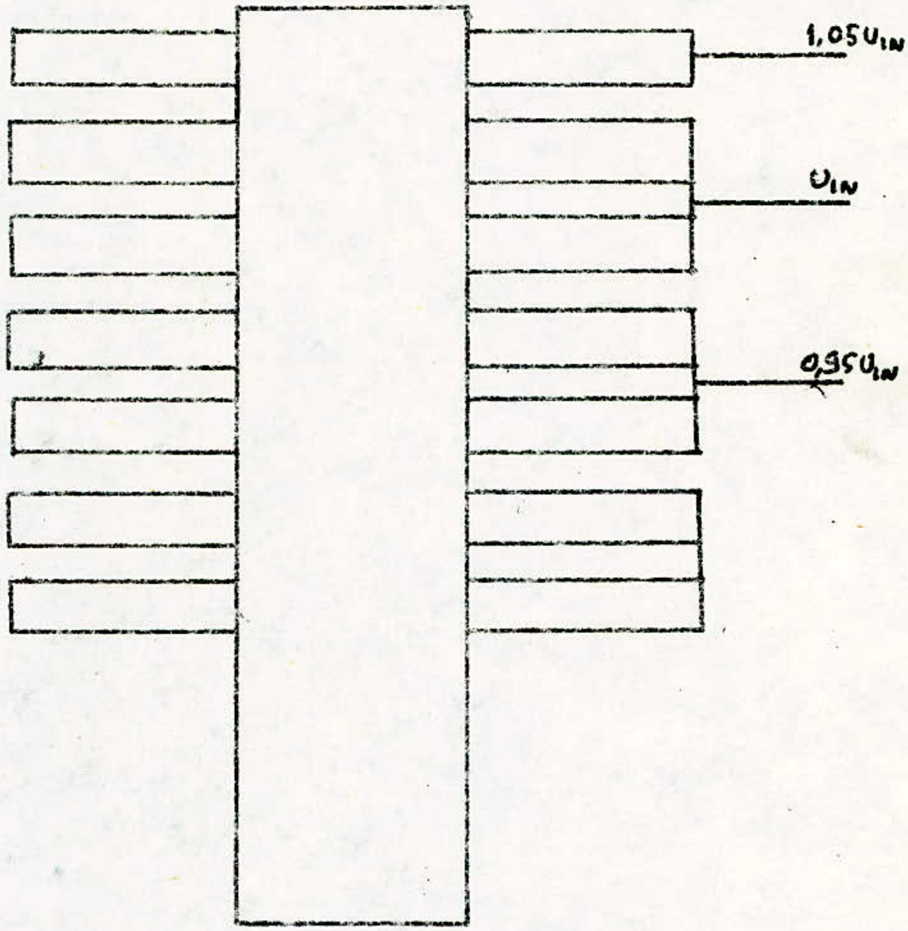
Pour notre tension, on prend $l_{o_2} = 40$mm,

Donc on aura:

$$h_{noy} = 511,40 + 2.40 .$$
$$h_{noy} = 591,40\text{mm}$$

Représentation schématique de l'enroulement HT

avec les prises de réglage



- Hauteur de la culasse :

Prenons une culasse ayant une section de 1,2 fois la section de fer du noyau. La culasse sera rectangulaire.

La section de la culasse est :

$$S_{cl} = 1{,}2 . S_{Fe}$$

$$S_{cl} = 1{,}2 . 44406{,}86 = 53288{,}23 \, mm^2$$

La hauteur de la culasse sera alors :

$$h_{cl} = \frac{S_{cl}}{l_{cl}}$$ où l_{cl} est la largeur de la culasse.

l_{cl} est égale à la hauteur totale des différents gradins du noyau.

$$l_{cl} = 2 (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6).$$

$$l_{cl} = 224{,}70 \, mm.$$

finalement :

$$h_{cl} = \frac{53288{,}23}{224{,}70}$$

$$h_{cl} = 237{,}2 \, mm.$$

Longueur de la culasse :

Si a_{22} est la distance entre 2 enroulements haute tension voisins, on a la longueur de la culasse donnée par :

$$L_{cl} = 3.D + 2a_{22} + 4a_1 + 4a_2 + 4a_{12} + 4a_{01}.$$

On prend $a_{22} = 15 mm$.

$$L_{cl} = 3.254 + 2.15 + 4.38{,}16 + 4.29{,}80 + 4.10 + 4.5$$

$$L_{cl} = 1094{,}2 \, mm$$

B. Comparaison des caractéristiques du transformateur projeté avec celles imposées dans le cahier de charges

a. Calcul de la tension relative de court-circuit : U_{ccr}

Dans le calcul préliminaire nous avons pris K_R le coefficient de Rogowsky égal à 0,95 et la largeur rapportée du canal de fuite égale à 34 cm.

Maintenant que l'on connait les valeurs exactes des épaisseurs a_1 et a_2 des enroulements de "basse" de "haute" tension et la hauteur $h_{B1} = 495{,}2$ mm de la bobine de basse tension nous pouvons recalculer ces deux paramètres et connaître ainsi leurs valeurs exactes.

$$\boxed{K_R = 1 - \frac{(2a_{12} + a_1 + a_2)}{2\pi h_{B1}}}$$

avec :
$a_1 = 29{,}89$ mm
$a_2 = 41{,}34$ mm
$h_{B1} = 495{,}2$ mm
$a_{12} = 10$ mm.

A.N.

$$K_R = 1 - \frac{(2 \times 10 + 41{,}34 + 29{,}89)}{2 \times 3{,}14 \times 495{,}2} = 0{,}97$$

$$\boxed{K_R = 0{,}97}$$

Pour la largeur rapportée du canal de fuite a_r nous avons :

$$\boxed{a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}}$$

A.N.

$$a_r = 10 + \frac{41{,}34 + 29{,}89}{3} = 33{,}7 \text{ mm}$$

$$\boxed{a_r = 33{,}7 \text{ mm}}$$

La composante réactive de la tension de court-circuit est donnée par la formule suivante :

$$\boxed{U_{ccr} = \frac{2\pi f \mu_0 W_1^2 \, a_r \, \beta \, K_R \, I_{f1} \times 100}{U_{f1}} \text{ en\% de } U_n}$$

toutes les grandeurs dans cette formule sont en MKSA

A.N.

$$U_{ccr} = \frac{2 \times 3{,}14 \times 4.\pi.10^{-7}.14^2.33{,}7.10^{-3}.2{,}12 \times 0{,}97 \times 2309{,}5 \times 50}{230{,}95} =$$

$$\boxed{U_{ccr} = 5{,}36\%}$$

La valeur fixée par le cahier de charge est $U_{ccr} = 5{,}38\%$, la valeur trouvée s'en éloigne de 0,4 % elle est donc bonne.

$$\boxed{U_{ccr} = 5{,}36\% \, U_n}$$

b_ Calcul des pertes joules

1_ Calcul des pertes joule pour l'enroulement Basse tension

$$\boxed{P_{J1tot} = P_{J1} + P_{Jcon1} + P_{Jsup1}}$$

avec :
- P_{J1tot} : pertes joule totales en basse tension
- P_{J1} : pertes joule principales " "
- P_{J1} : " " connexions " "
- P_{Jsup1} : " " suplementaires " "

_ Calcul de P_{J1} :

$$P_{J1} = 3 R_1 I_{f1}^2$$

R_1 : Resistance de l'enroulement B.T.

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S_{w1}}$$

avec : ρ : resistivité du cuivre à chaud $\rho = 0{,}022\,10^{-6}\,\Omega\,m$

. l_1 = longueur totale de l'enroulement

. S_{w1} : la section totale des conducteurs

$$l_1 = W_1 \pi D_{m1}$$

D_{m1} : le diametre moyen de la spire

$$D_{m1} = D + 2 a_{01} + a_1$$

A.N :

$$D_{m1} = 254 + 10 + 29{,}89 = 293{,}89 \text{ mm}.$$

$$l_1 = \pi \times 293{,}89\,10^{-3} \times 14 = 12{,}919 \text{ m}.$$

$$S_{w1} = 14 \times 43{,}6 = 610{,}40 \text{ mm}^2$$

$$R_1 = \frac{0{,}022.10^{-6} \times 12{,}919.10^{-3}}{610{,}40.10^{-6}} = 47.10^{-5}\,\Omega$$

$$\boxed{R_1 = 47.10^{-5}\,\Omega}$$

On aura donc :

$P_{j1} = 3 \times 47\,10^{-5} \times (2309{,}5)^2 = \underline{7521\ W.}$

– Calcul des pertes dans les connexions en basse tension :

L'enroulement basse tension étant connecté en étoile on aura donc approximativement pour la longueur des connexions

$$l_{con1} = 7{,}5\ h_{B1} = 7{,}5 \times 0{,}495 = 3{,}7\,m$$

et pour séction des connexions

$$S_{con1} = S_{w1} = 14 \times 43{,}6 = 610{,}4\ mm^2$$

la resistance des connéxions.

$$R_{con} = \frac{0{,}022.10^{-6} \times 3{,}7}{610{,}4} = 14.10^{-5}\,\Omega$$

d'où on a :

$$P_{j\,con1} = 14.10^{-5}.(2309{,}5)^2$$

$$\underline{P_{con1} = 746{,}73\ W.}$$

- Calcul des pertes supplementaires $P_{j\,sup1}$:

$$P_{j\,sup1} = (K_{mR1} - 1)\, P_{j1}$$

K_{mR1} est un facteur tenant compte de la majoration de la resistance en courant alternatif.

$$K_{mR1} = 1 + \frac{m^2 - 0{,}2}{9} (\alpha a)^4$$

m : est le nombre de conducteurs actifs identiques dans le sens radial $m = 7$

$$\alpha = \sqrt{\frac{nb}{h_F} \frac{\omega \mu_0}{2\rho}}$$

avec : n : est le nombre de conducteurs identiques dans le sens longitudinal.
$n = 28$

h_F : est la hauteur de la fenêtre

$h_F = 519{,}4$ mm.

a, b : sont les dimensions des conducteurs

$b = 12{,}5$ mm, $a = 3{,}53$ mm.

d'où

$$\alpha = \sqrt{\frac{28 \times 12{,}5}{519{,}4} \cdot \frac{100\pi\, 4\pi\, 10^{-7}}{2 \cdot 0{,}022\, 10^{-6}}}$$

$\alpha = 77{,}72$

$$(\alpha a)^4 = (77{,}72 \times 3{,}53.10^{-3})^4 = 0{,}006$$

$$K_{mR1} = 1 + \frac{7^2 - 0{,}2}{9}(0{,}006) = 1{,}03$$

d'où on aura les pertes Joule supplementaires.

$$P_{J\,sup1} = (1{,}03 - 1)\,7521 = \underline{225{,}7\ W}$$

Les pertes Joule totales :

$$P_{J\,tot} = 7521 + 225{,}7 + 746{,}7 = 8493\ W.$$

$$\boxed{P_{J\,tot} = 8493\ W}$$

2 – <u>Calcul des pertes dans l'enroulement de haute tension :</u>

On procédera comme pour la basse tension.

. Diamètre moyen de la spire D_{m2}

$$D_{m2} = D + 2a_{01} + 2a_1 + 2a_{12} + a_2.$$

<u>A. N:</u>

$$D_{m2} = 254 + 10 + 20 + 2 \times 23{,}89 + 41{,}34.$$

$$D_{m2} = \underline{385{,}12\ mm}.$$

. Longueur totale de l'enroulement

$$\ell_2 = 3{,}14 \times 385{,}12.10^{-3} \times 363{,}5 = 440\ m.$$

$$\underline{\ell_2 = 440\ m}.$$

la résistance de l'enroulement haute tension :

$$R_2 = \rho \frac{l_2}{S_{w2}}$$

A.N :

$$R_2 = \frac{0{,}022\,10^{-6} \times 440}{24\,10^{-6}} = 0{,}4\,\Omega$$

d'où on a :

$$P_{J2} = (88{,}89)^2 \times 0{,}4 \times 3 = \underline{9481{,}5}$$

- <u>Pertes joule dans les connexions</u>

pour la haute tension nous avons un couplage en triangle, dans ce cas la longueur approximative des connexions est :

. $l_{con2} = 14\,h_{B2}$

$= 14 \times 511{,}4.10^{-3} = 7{,}2$ m.

. $S_{con2} = \sqrt{3}\,S_{w2}$

$= \sqrt{3}\,.\,24 = 41{,}57\ mm^2$

. $R_{con2} = \dfrac{0{,}022\,10^{-6} \times 7{,}2}{41{,}6.\,10^{-6}} = 3{,}8\,10^{-3}\,\Omega$

. $P_{Jcon2} = 3{,}8.10^{-3}.\,(88{,}89)^2 = 30\,W.$

$$\underline{P_{Jcon2} = 30\,W.}$$

– Les pertes supplémentaires :

$$P_{j\,sup_2} = (K_{mR_2} - 1)\, P_{j2}$$

$$K_{mR2} = 1 + \frac{m^2 - 0{,}2}{9}(\alpha a)^4 \quad \text{avec } m = 12$$

$$a = 2{,}44\ mm$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{n b}{h_F} \cdot \frac{\omega \mu_0}{2\rho}}$$

$$n = 31$$
$$b = 9{,}3\ mm$$

A.N.

$$\alpha = \sqrt{\frac{31 \times 9{,}3}{519{,}4} \cdot \frac{100\pi\, 4\pi\, 10^{-7}}{2 \times 0{,}022\, 10^{-6}}} = 70{,}5$$

$$(\alpha a)^4 = (70{,}5 \times 2{,}44\, 10^{-3})^4 = 9 . 10^{-4}$$

$$K_{mR2} = 1 + \frac{(12)^2 - 0{,}2}{9} . 9\, 10^{-4} = 1{,}014$$

d'où on à les pertes joules supplémentaires.

$$P_{j\,sup2} = (1{,}014 - 1)\, 9481{,}5 = \underline{136{,}3\,W.}$$

les pertes joule totales de l'enroulement de haute tension

$$P_{j2\,tot} = 9481{,}5 + 136{,}3 + 30 = 9648\ w.$$

$$\boxed{P_{j2\,tot} = 9648\ W}$$

3 – Calcul des pertes totales dûes a la charge

$$P_{cc} = (P_{j1\,tot} + P_{j2\,tot}) \times K_{pcc}$$

$$P_{cc} = [8493 + 9648] \times 1{,}07 = 19411\ w$$

$$\boxed{P_{cc} = 19411\ W}$$

– Les pertes supplémentaires :

$$P_{j\,sup_2} = (K_{mR_2} - 1)\,P_{j2}$$

$$K_{mR2} = 1 + \frac{m^2 - 0{,}2}{9}(\alpha a)^4 \qquad \text{avec } m = 12$$

$a = 2{,}44\ mm$

$$\alpha = \sqrt{\frac{nb}{h_F}\cdot\frac{\omega\mu_0}{2\rho}}$$

$n = 31$
$b = 9{,}3\ mm$

A.N.

$$\alpha = \sqrt{\frac{31\times 9{,}3}{519{,}4}\cdot\frac{100\pi\, 4\pi 10^{-7}}{2\times 0{,}022\, 10^{-6}}} = 70{,}5$$

$$(\alpha a)^4 = (70{,}5\times 2{,}44\, 10^{-3})^4 = 9.10^{-4}$$

$$K_{mR2} = 1 + \frac{(12)^2 - 0{,}2}{9}\cdot 9\,10^{-4} = 1{,}014$$

d'où on à les pertes joules supplémentaires.

$$P_{j\,sup2} = (1{,}014 - 1)\,9481{,}5 = \underline{136{,}3W.}$$

les pertes joule totales de l'enroulement de haute tension

$$P_{j2\,tot} = 9481{,}5 + 136{,}3 + 30 = 9648\ W.$$

$$\boxed{P_{j2\,tot} = 9648\ W}$$

3 _ Calcul des pertes totales dües a la charge

$$P_{cc} = (P_{j1\,tot} + P_{j2\,tot}) \times K_{pcc}$$

$$P_{cc} = [8493 + 9648] \times 1{,}07 = 19411\ W$$

$$\boxed{P_{cc} = 19411\ W}$$

On a une variation de 5,5 % entre la puissance de court-circuit fixée et la puissance de court-circuit calculée.

3 – Calcul de la tension de court-circuit

La composante active de la tension de court-circuit est égale à

$$U_{cca} = \frac{P_{cc}}{S_n} = \frac{19411}{1600.10^3} = 1,21\,\%$$

La tension de court-circuit est alors :

$$U_{cc} = \sqrt{U_{ccr}^2 + U_{cca}^2}$$

A.N.

$$U_{cc} = \sqrt{(1,21)^2 + (5,36)^2} = 5,49\%$$

cette valeur ne diffère pratiquement pas de celle demandée.

$$\boxed{U_{cc} = 5,49\%}$$

c – Calcul des pertes fer

Le noyau et la culasse seront réalisés avec de l'acier laminé à froid de nuance soviétique Э310 avec des toles de 0,35 mm. Les pertes spécifiques de cet acier pour une induction de 1,6 T sont de 3 W/kg.

La section de la culasse étant 1,2 fois plus grande que celle du noyau noyau l'induction y sera 1,2 fois moindre, elle y sera de 1,4T. Nous prendrons à 1,4T l'acier Э310 présente des pertes spécifiques de 2 W/kg.

_ Pertes fer dans les culasses

La longueur de la culasse est $L_{cl} = 1094{,}2\,10^{-3}$;

La section de la culasse est :

$S_{cl} = 1{,}2 \times 44406{,}86\,10^{-6} = 53288{,}23\,10^{-6}\,m^2$

La masse volumique du fer est $\gamma = 7{,}65\,10^{3}\,kg/m^3$

La masse de fer pour les deux culasses est:

$M_{cl} = 2 \times 1094{,}2\,10^{-3} \times 53288{,}23\,10^{-6} \times 7{,}65\,10^{3} = 892\,kg$

$M_{cl} = 892\,kg.$

Les pertes spécifiques pour la culasse étant 2 W/kg, on tire les pertes fer pour la culasse.

$P_{fcl} = 892 \times 1 = 892\,W.$

_ Pertes fer dans les noyaux.

La hauteur d'un noyau est $h_{noy} = 591{,}4\,mm$

La section de fer du noyau est $S_{Fe} = 44406{,}86\,m$

la masse des 3 noyaux est:

$M_{noy} = 3 \times 44406{,}86\,10^{-6} \times 591{,}4 \times 7{,}65\,10^{3} = \underline{602{,}7\,kg}$

Les pertes fer dans les noyaux sont ; puisque on a des pertes spécifiques de 3 W/kg

$$P_{Fe\,noy} = 602{,}7 \times 3 = 1808 \text{ W}$$

Les pertes fer totales sont :

$$P_{Fe} = P_{Fe\,noy} + P_{Fe\,cl}$$

$$= 1808 + 992 = 2800 \text{ W}$$

pour avoir les pertes fer il faudra ainsi tenir compte des pertes supplementaires qui sont de l'ordre de 10 à 15% des pertes fer

On aura donc :

$$P_{Fe} = 2800 \times 1{,}1 = 3080 \text{ W}$$

les pertes fer en % de Sn sont :

$$P_{Fe} = 0{,}19\,\%\, S_n.$$

les pertes fer specifiées sont de 0,18 %

ce resultat est acceptable.

d_ Calcul du courant à vide I_0

Pour connaître la composante réactive du courant à vide I_{or} on doit determiner la puissance réactive nécessaire pour faire circuler le flux.

L'acier Э310 utilisé a besoin d'une puissance réactive spécifique de 11,3 VAR/Kg à 1,7 T.

Donc la puissance réactive nécessaire pour faire circuler le flux dans les noyaux est :

$$Q_{noy} = 602{,}7 \cdot 11{,}3 = \underline{6811 \text{ VAR}}.$$

à 1,4 T cet acier présente une puissance réactive spécifique de 1,41 VAR/Kg donc la puissance réactive nécessaire pour faire circuler le flux dans les culasse est :

$$Q_{cl} = 892 \times 1{,}41 = \underline{1257 \text{ VAR}}.$$

La puissance réactive spécifique pour l'entrefer est de 2,93 VAR/cm² à 1,7 T.
La section d'un entrefer étant $S_{Fe} = 44406{,}86 \text{ mm}^2$ et comme on a 7 entrefers, la puissance réactive nécessaire pour faire circuler le flux dans les entrefer est :

$$Q_{ent} = 7 \times 2{,}93 \times 44406{,}86 \, 10^{-6} = 9108 \text{ VAR}$$

la puissance réactive totale est donc :

$$Q_{tot} = (9108 + 1257 + 6811) = 17176 \text{ VAR}.$$

$$\underline{Q_{tot} = 17176 \text{ VAR}}$$

Au passage dans les coins le flux est perpendiculaire au sens du laminage et il presente une puissance réactive supplementaire pour tenir compte de cela on multiplie la puissance réactive trouvée par 1,1 on aura donc:

$$Q = 17176 \times 1{,}1 = 18894 \text{ VAR}.$$

$$\boxed{Q = 18894 \text{ VAR}.}$$

d'autre part on sait que.

$$Q = U\sqrt{3}\, I_{0r}$$

I_{0r} est la composante réactive du courant à vide (magnetisant)

$$18894 = 6000\sqrt{3}\, I_{0r}.$$

donc : $I_{0r} = \dfrac{18894}{6000\sqrt{3}} = 1{,}82\,A.$

$$\boxed{I_{0r} = 1{,}82\,A}$$

La composante active du courant à vide se calcul à partir des pertes fer.

$$P_{fe} = U\, I_{0a} \sqrt{3}$$

$$I_{0a} = \frac{P_{fe}}{U\sqrt{3}}$$

A.N. $\quad I_{0a} = \dfrac{3080}{6000\sqrt{3}} = 0{,}3\,A.$

Le courant à vide I_0 est égale à:

$$I_0 = \sqrt{I_{0i}^2 + I_{0a}^2}$$

$$I_0 = \sqrt{(0,3)^2 + (1,82)^2} = 1,84\,A$$

$$I_0\% = \frac{1,84 \times 100}{88,89} = 2,1\%$$

<u>Pertes totales</u> P_{tot}

$$P_{tot} = P_{cc} + P_{Fe} = 3080 + 19411 = 22491\,W$$

$$\boxed{P_{tot} = 22491\,W}$$

Les pértes totales spécifiés sont

$(1,15 + 0,18)\%\, S_n = \underline{21280\,W}$

Les pertes trouvés ne s'éloignant pas de 10% de la valeur spécifiée, le resultat est acceptable.

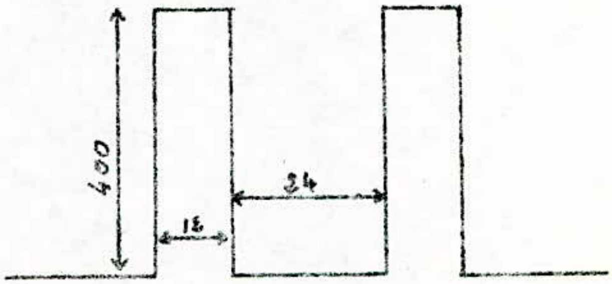
CALCUL THERMIQUE

Cette partie consiste à dimensionner la cuve et calculer les échauffements des differentes parties de la machine

A Dimensionnement de la cuve

La cuve sera réalisée en tole ondulée et sera muni d'un réservoir d'expansion.

Le profilé de la tole ondulée utilisée est donné par le schema suivant



Longueur de la cuve L_c

$$L_c = 2a_{20} + 2a_{22} + 6a_{10} + 6a_1 + 6a_{12} + 6a_2 + 3D$$

$a_{20} = 65\ mm$ distance entre l'enroulement H.T. [illegible] la cuve

$a_{22} = 15\ mm$ distance entre deux enroulements [illegible] voisins

$a_{10} = 5\ mm$ distance entre l'enroulement BT [illegible] noyau

$a_1 = 29{,}89\ mm$ épaisseur de l'enroulement BT

$a_2 = 41{,}34\ mm$ épaisseur de l'enroulement [illegible]

$a_{12} = 10\ mm$ distance entre les enroulements

$D = 254$ mm diamètre du noyau de fer

$$L_c = 3 \times 254 + 6(29{,}89) + 6(4{,}34) + 6(10) + 6(5) + 2(65)$$

$$\underline{L_c = 1439 \text{ mm}}$$

Largeur de la cuve l_c

$$l_c = D + 2a_1 + 2a_2 + 2a_{10} + 2a_{20}$$

$$l_c = 254 + 2(29{,}89) + 2(41{,}34) + 2(5) + 2(65)$$

$$\underline{l_c = 526{,}46 \text{ mm}}$$

Hauteur de la cuve $H_c = H_{jF} + 2h_{el} + h_{noy} + H_{jo}$

Si l'on appelle H_{jF} la distance entre la culasse inférieure et la cuve ; H_{jo} la distance entre la culasse supérieure et le couvercle.

On aura $H_{jF} = 35$ mm , $H_{jo} = 250$ mm

$$H_c = 35 + 250 + 2(237{,}2) + 591{,}4 = 1351 \text{ mm}$$

$$\underline{H_c = 1351 \text{ mm}}$$

Avec la tole ondulée choisie on pourra mettre 33 ondulations dans le sens de la longueur et 11 ondulations dans le sens de la largeur.

La surélévation de température des parois de la cuve par rapport à l'air ambiant est donnée d'après Liwschitz par la formule suivante

$$\Delta\theta_p = \frac{W}{A_{reff}(\sigma_e \times \alpha_k + \alpha_s)}$$

W désigne les pertes totales à évacuer auparavant nous les avions notées P_{tot}.

$$W = 22491\ W$$

α_s désigne le coëfficient de rayonnement

$$\alpha_s = 6\ W/m^2{}^\circ C$$

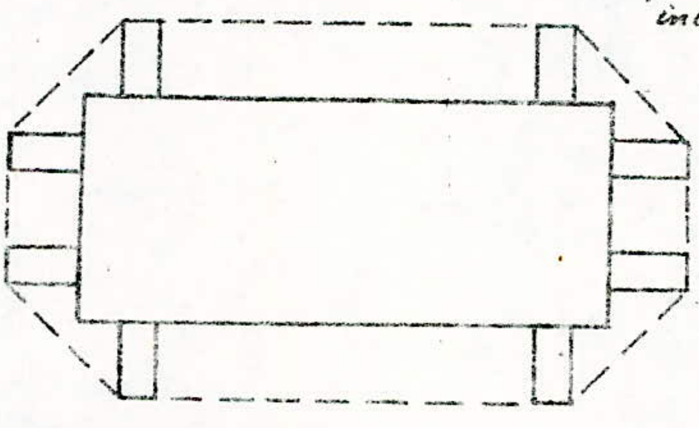
α_k est le coëfficient de convection naturelle il est donné par la formule suivante

$$\alpha_k = 2{,}55 \sqrt[4]{\Delta\theta}$$

σ_e est le rapport de la longueur totale développée de la cuve L à son plus petit périmètre extérieur Pe

a/ Détermination du périmètre extérieur minimal Pe

Le périmètre exterieur minimal Pe est représenté en trait interrompu sur la figure



En mettant 33 ondulations sur la longueur de la cuve nous laissons de part et d'autre 55 mm.

En mettant 11 ondulations dans le sens de la largeur nous laissons de part et d'autre 49,7 mm.

$$Pe = 2\left[44 \times 17 + 42 \times 24\right] + \sqrt{211600 + 206752} = 6,099\ m$$

b/ Détermination de la longueur totale développée L

$$L = 2\left[44 \times 817 + 42 \times 24 + 104,5\right] = 74,121\ m$$

Maintenant on peut calculer la valeur de σ_e

$$\sigma_e = \frac{L}{Pe} = \frac{74,121}{6,099} = 12,15$$

c/ Determination de la surface efficace A_{neff}

$$A_{neff} = Pe \times h_{eff}$$

ici h_{eff} represente la hauteur efficace, cette est en général prise du milieu de la culasse-inférieure jusqu'au début de l'arète supérieure d'une ondulation

L'arète supérieure de l'ondulation se trouve à 40 mm du couvercle

donc

$$h_{eff} = 1351 - \frac{237,2}{2} - 35 - 40 = 1,157\ m$$

Pour la surface efficace nous aurons

$$A_{neff} = 1157 \times 6,099 = 7,06\ m^2$$

Le coéfficient α_k de convéction naturel est donné par

$\alpha_k = 2,55 \sqrt[4]{\Delta\theta}$ supposons un saut de tempéra-

-ture de 38,3°C entre les parois et l'air.

on aura alors

$$\alpha_k = 2,55 \sqrt[4]{38,3} = 6,34\ W/m^2 °C$$

Nous avons donc pour la surélévation de température des parois de la cuve par rapport à l'ambiance

$$\Delta\theta_p = \frac{22491}{7{,}06\,(18{,}15 \times 6{,}34 + 6)} = 38{,}3\,°C$$

Pour avoir la température moyenne de l'huile par rapport à l'ambiance il faut ajouter à la température déjà trouvée le saut de température entre les parois et l'huile $\Delta\theta_{h-p}$

$$\Delta\theta_{h\text{-}p} = \frac{W}{A_{reff}\,\alpha_{kh}\,\sigma_e}$$

α_{kh} est le coefficient de convection de l'huile il est donné par: $\alpha_{kh} = 38\sqrt[4]{\Delta\theta}$

Supposons entre l'huile et les parois un saut de 4,7 °C

on a alors

$$\alpha_{kh} = 38\sqrt[4]{4{,}7} = 55{,}55\ W/m^2\,°C$$

et l'on a

$$\Delta\theta_{h\text{-}p} = \frac{22491}{7{,}06 \times 55{,}95 \times 18{,}15} = 4{,}7\,°C$$

La température moyenne de l'huile est:

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{h\text{-}p} + \Delta\theta_p = 4{,}7 + 38{,}3 = 43\,°C$$

$$\Delta\theta_h = 43\,°C$$

La température de l'air ambiant est considerée égale à 40 °C

Echauffement des enroulements

Echauffement de l'enroulement de haute tension

Pour l'enroulement de haute tension formé de galettes l'échauffement moyen est donné par la formule

$$\theta_{enr_2} = q_2 \left(\frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_{conv_2}} \right)$$

Dans cette formule

θ_{enr_2} représente la température moyenne de l'enroulement de haute tension

q_2 représente le flux thermique spécifique qui traverse l'isolation vers l'huile

λ_{is} la conductivité thermique de l'isolation

$$\lambda_{is} = 0{,}17 \ W/m°C$$

δ_{is} représente l'épaisseur de l'isolation d'un seul coté

$$\delta_{is} = 0{,}32 \ mm$$

α_{conv_2} représente le coéfficient de convéction globale de l'huile.

Le flux spécifique q_2 est donné par la formule suivante

$$q_2 = \frac{500 \ K_{mR_2} \ \rho \ J_2^2 \ S_{W_2} \ W_{spg}}{(b' + W_{spg} \ a') \ \gamma}$$

K_{mR_2} = coefficient de majoration des pertes en courant alternatif

$K_{mR_2} = 1{,}014$

ρ = résistivité du cuivre à chaud $\rho = 0{,}02\ \Omega\ \frac{mm^2}{m}$

J_2 = densité de courant dans l'enroulement HT

$J_2 = 3{,}7\ A/mm^2$

a' et b' sont les dimensions du conducteur isolé

$a' = 3{,}08$ mm

$b' = 9{,}94$ mm

s_{vo_2} est la séction du conducteur

$s_{vo_2} = 24\ mm^2$

W_{spg} = nombre de spires par galette

$W_{spg} = 12$

ξ = coëfficient tenant compte du fait qu'une partie de la surface de la galette est recouverte par des cales et ne dissipe pas la chaleur

Le coëfficient ξ se calcule de cette manière

$$\xi = \frac{\xi_v b' + \xi_h W_{spg} a'}{b' + W_{spg} a'}$$

ξ_v et ξ_h sont des coëfficients qui tiennent compte des cales axiales et des cales radiales respéctivement.

La détermination exacte de ces deux coëfficients n'est possible que si l'on connait la surface recouverte par une cale et le nombre de cales utilisées

Dans notre cas nous utiliserons 9 cales dont les dimensions sont données à la figure page

La surface d'une cale radiale est $S_{cr} = 1134\ mm^2$

La surface d'une cale axiale est $S_{ca} = 159,04\ mm^2$

Le diamètre extérieur de l'enroulement H.T est

$$D_{ext} = 254 + 10 + 59,78 + 88,68 = 426,46\ mm$$

Le diamètre interieur de l'enroulement H.T est

$$D_{int} = 254 + 10 + 53,78 = 343,78\ mm$$

Détermination du coëfficient γ_h

$$\gamma_h = \frac{\pi/4\,(D_{ext}^2 - D_{int}^2) - n_c\, S_{cr}}{\pi/4\,(D_{ext}^2 - D_{int}^2)}$$

$$n_c = 9$$

A.N

$$\gamma_h = \frac{\pi/4\left[(426,46)^2 - (343,78)^2\right] - 9 \times 1134}{\pi/4\left[(426,46)^2 - (343,78)^2\right]} = 0,80$$

$$\gamma_h = 0,80$$

$$\gamma_v = \frac{\pi\, D_{ext}\, b' + n_c\, S_{ca}}{\pi\, D_{ext}\, b'} = \frac{3,14 \times 9,94 \times 426,46 - 9 \times 159,04}{9,94 \times 3,14 \times 426,46}$$

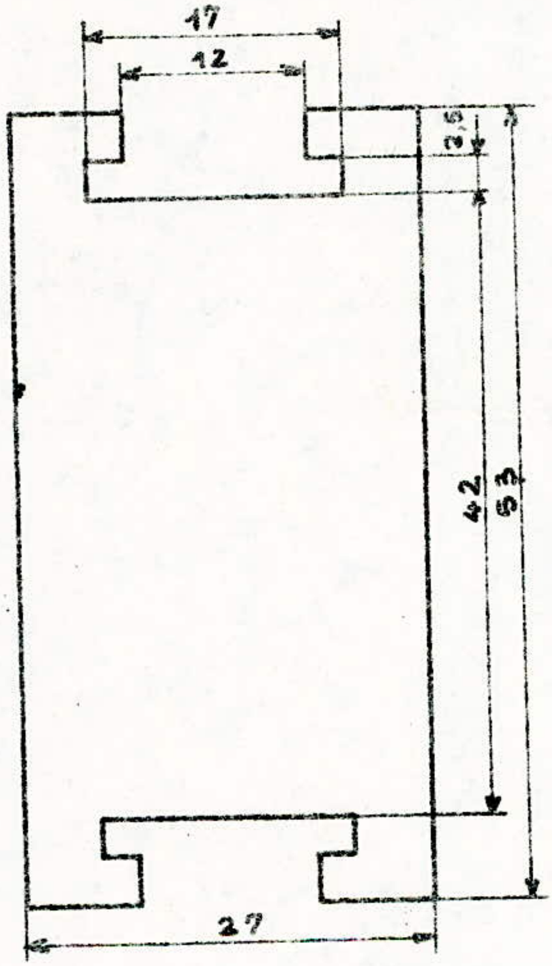
$$\gamma_v = 0,89$$

Determination du coëfficient γ

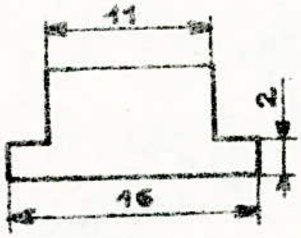
$$\gamma = \frac{\gamma_v\, b' + \gamma_h\, W_{spg}\, a'}{b' + W_{spg}\, a'} = \frac{0,89 \times 9,94 + 0,80 \times 12 \times 3,08}{9,94 + 12 \times 3,08}$$

$$\gamma = 0,82$$

Schéma donnant les différentes côtes des cales



cale radiale de l'enroulement H·T



cale axiale de l'enroulement H·T

Maintenons nous pouvons calculer la valeur du flux thermique spécifique

$$q_2 = \frac{500 \times 1{,}014 \times 0{,}02 \times (3{,}7)^2 \times 34 \times 12}{(9{,}94 + 18 \times 3{,}08)\ 0{,}82} = 1040\ W/m^2$$

Détermination du coëfficient de convection globale α_{conz}

Ce coëfficient est donné par la formule suivante

$$\alpha_{conz} = \frac{1 + \frac{\alpha_{conh}}{\alpha_{conv}} \frac{W_{spga'}}{b'} \frac{f_h}{f_v}}{1 + \frac{W_{spga'}}{b'} \frac{f_h}{f_v}} \alpha_{conv}$$

α_{conv} est le coëfficient de convéction pour les sur-face verticales. Les valeurs de ce coëfficient sont com-prises entre 100 et 110 $W/m^2 °C$

nous prendrons $\alpha_{conv} = 110\ W/m^2 °C$

La largeur de l'espace laissé entre deux galettes pour le refroidissement étant supérieur au dix-ième de l'épaisseur de la galette, nous pouvons prende un coëfficient de convéction pour les surfaces horizontales égal à la moitié de la valeur de celle du coëfficient de convéction pour les surfaces verticales.

Soit $\frac{\alpha_{conh}}{\alpha_{conv}} = 0{,}5$

On aura donc

$$\alpha_{con2} = 110 \frac{1 + 0{,}5 \cdot \frac{12 \times 3{,}08}{9{,}94} \cdot \frac{0{,}80}{0{,}89}}{1 + \frac{12 \times 3{,}08}{9{,}94} \cdot \frac{0{,}80}{0{,}89}} = 67{,}64 \ W/m^2{}^\circ C$$

Et nous tirons la valeur de l'échauffement moyen de l'enroulement de haute tension par rapport à l'huile.

$$\theta_{en2} = 1040 \left(\frac{0{,}32 \, 10^{-3}}{0{,}17} + \frac{1}{67{,}64} \right) = 17{,}6 \ ^\circ C$$

$$\underline{\theta_{en2} = 17{,}6 \ ^\circ C}$$

Echauffement de l'enroulement de basse tension

Le calcul de l'échauffement de l'enroulement de basse tension se fait d'une manière similaire à celle utilisée pour calculer l'échauffement de l'enroulement de haute tension

$$\theta_{en1} = \frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_{con1}}$$

avec

$$q_1 = \frac{500 \ K_{mR_2} \ \rho \ J_1^2 \ s_{vv_1} \ n_{c1/2}}{(2b' + a_1) \ \rho}$$

n_{el} est le nombre de conducteurs par spire. Nous considérons le nombre moitié $n_{el}/_2$ car nous avons deux fils de commencement

$K_{mR_1} = 1{,}03$

$J_1 = 3{,}78\ A/mm^2$

$s_{w_1} = 43{,}6\ mm^2$

$b' = 13{,}14\ mm$ $\qquad\qquad a_1 = 29{,}89\ mm.$

φ le coëfficient tenant compte des cales s'écrit

$$\varphi = \frac{\varphi_v \times 2b' + \varphi_h a_1}{2b' + a_1}$$

Pour déterminer les coëfficients φ_v et φ_h nous devons connaitre le nombre et les dimensions des cales de l'enroulement de basse tension

Le nombre des cales est $\qquad n_c = 8$

Les différentes dimensions des cales sont données à la figure page

l_{ca} est la largeur d'une cale axiale

$l_{ca} = 17\ mm$

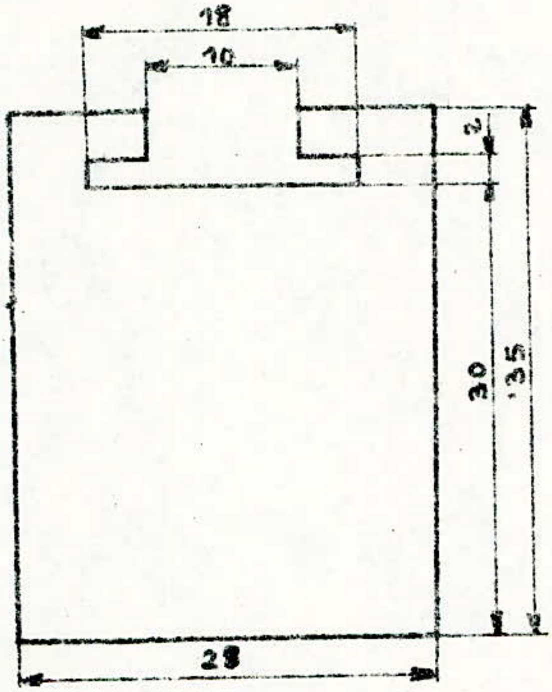
l_{cr} est largeur d'une cale radiale

$l_{cr} = 28\ mm$

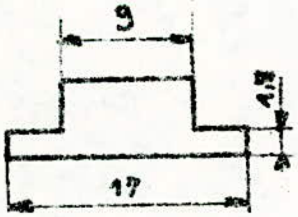
Le diamètre extérieur de l'enroulement est

$D_{ex1} = 294\ mm$

Schéma donnant les différentes côtes des cales



cale radiale de l'enroulement B·T



cale axiale de l'enroulement B·T

Le diamètre intérieur de l'enroulement est $D_{int1} = 264 mm$

$$\gamma_v = 1 - \frac{8 \times 17}{\pi(264+294)} = 0{,}92$$

$\gamma_v = 0{,}92$

$$\gamma_h = 1 - \frac{8 \times 30 \times 2}{\pi(264+294)} = 0{,}73$$

$\gamma_h = 0{,}73$

On aura donc

$$\gamma = \frac{0{,}92 \times 26{,}28 + 0{,}73 \times 29{,}89}{26{,}28 + 29{,}89} = 0{,}82$$

$\gamma = 0{,}82$

Le flux thermique spécifique est alors égal à

$$q_1 = \frac{500 \times 1{,}03 \times 0{,}02 \times (3{,}78)^2 \times 13{,}6 \times 7}{(29{,}89 + 26{,}28)\ 0{,}82} = 975\ W/m^2$$

Détermination du coëfficient de convéction globale

$$\alpha_{con1} = \alpha_{conv} \frac{1 + \frac{\alpha_{conh}}{\alpha_{conv}} \frac{a_1}{2b'} \frac{\gamma_h}{\gamma_v}}{1 + \frac{a_1}{2b'} \frac{\gamma_h}{\gamma_v}}$$

On prend $\alpha_{conv} = 105\ W/m^2 °C$

et $\alpha_{conh} = \frac{\alpha_{conv}}{2}$ pour les mêmes raisons que pour la haute tension. C'est à dire que l'espace laissé entre deux spires pour le refroidissement est supérieur au dixième de l'épaisseur de la spire

Nous avons donc

$$\alpha_{conv1} = 105 \frac{1 + 0{,}5 \frac{29{,}89}{26{,}28} \frac{0{,}73}{0{,}92}}{1 + \frac{29{,}89}{26{,}28} \frac{0{,}73}{0{,}92}} = 80 \ W/m^2 °C$$

Et l'on tire l'échauffement moyen de l'enroulement de basse tension

$$\theta_{en1} = \left(\frac{0{,}32\,10^{-3}}{0{,}17} + \frac{1}{80}\right) 975 = 14\ °C$$

$$\underline{\theta_{en1} = 14°C}$$

Echauffement du circuit magnétique

Pour calculer l'échauffement du circuit magnétique on considèrera ce circuit comme ayant une séction rectangulaire de dimensions a et b

on prendra $a = 0{,}92\,D$ $\qquad a = 233{,}68\ mm$

et $b = \frac{S_{Fe}}{a}$ $\qquad S_{Fe}$ étant la séction de fer

on aura donc

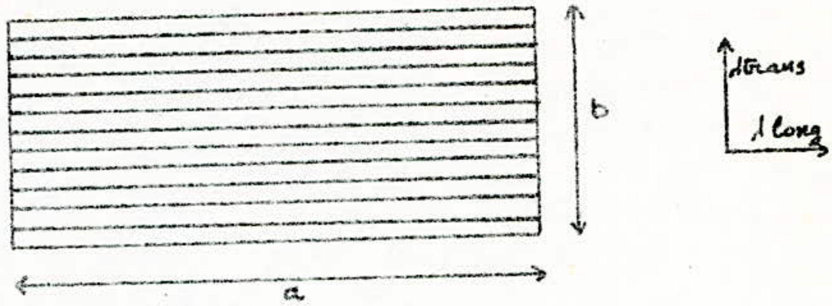
$$b = \frac{44406{,}86\,10^{-6}}{233{,}68\,10^{-3}} = 0{,}19\ m$$

on a donc

$a = 233{,}7\ mm$

$b = 190\ mm$

représentation de la séction du circuit magnétique



La conductivité thermique dans la diréction transversale est $\lambda_{trans} = 3 W/m°C$

La conductivité thermique dans la diréction longitunale est $\lambda_{long} = 20 W/m°C$

on calcule les echauffements suivants

$\theta_1 = \frac{Pa^2}{8\lambda_{long}}$ = échauffement maximal par rapport à la surface dans la diréction longitudinale

$\theta_2 = \frac{Pa}{2\alpha_{con}}$ = différence de température entre les surfaces du circuit magnétique et l'huile dans la diréction longitudimale

$\theta'_1 = \frac{Pb^2}{8\lambda_{trans}}$ = echauffement maximal par rapport à la surface dans la diréction transversale

$\theta'_2 = \frac{Pb}{2\alpha_{con}}$ = différence de température entre les surfaces du circuit magnétique et l'huile dans la diréction transversale

α_{con} est le coëfficient de convéction de l'huile on le prend egal à 110 $W/m^2 °C$

P représente les pertes dans le fer par unité de volume

$$P = 3{,}0 \times 7{,}65\,10^3 = 22950\ W/m^3$$

on aura donc

$$\theta_1 = \frac{22950 \times (0{,}234)^2}{8 \times 20} = 7{,}85 °C$$

$$\theta_1' = \frac{22950 \times (0{,}19)^2}{8 \times 3} = 34{,}52 °C$$

$$\theta_2 = \frac{22950\,(0{,}234)}{2 \times 110} = 24{,}41 °C$$

$$\theta_2' = \frac{22950 \times (0{,}19)}{2 \times 110} = 19{,}82 °C$$

On calcule maintenant les échauffements maxima dans les diréctions transversale et longitudinale

$$\theta_{2\,max} = \theta_1' + \theta_2' = 34{,}52 + 19{,}82 = 54{,}34 °C$$

$$\theta_{1\,max} = \theta_1 + \theta_2 = 24{,}41 + 7{,}85 = 32{,}26 °C$$

L'échauffement du circuit magnétique est égal à

$$\theta_{CM} = \theta_{2\,max} \frac{\theta_2' + 1{,}5\,\theta_1'}{\theta_{2\,max} + \theta_2' + 1{,}5\,\theta_1'}$$

$$\theta_{CM} = 54{,}34 \frac{19{,}82 + 1{,}5 \times 34{,}52}{54{,}34 + 19{,}82 + 1{,}5 \times 34{,}52} = \underline{30{,}9 °C}$$

La température de l'enroulement de haute tension est

$$\theta_2 = 40° + 43° + 17,6° = 100,6 °C$$

La température de l'enroulement de basse tension est

$$\theta_1 = 40° + 43° + 14° = 97 °C$$

ces deux températures sont inférieures à 105 °C donc une isolation de classe A est suffisante.

La température du circuit magnetique est

$$\theta_{Fe} = 40° + 43° + 30,9° = 113,9 °C$$

ces échauffements sont accéptables

CONTRAINTES MECANIQUES LORS D'UN COURT-CIRCUIT BRUSQUE

Lors d'un court-circuit brusque le courant dans les enroulements peut atteindre des valeurs considé-rables.

Le courant de court circuit aura deux composantes un courant permanent dont la valeur peut être calculée à partir du courant nominal et de la tension de court-circuit, et un courant périodique amorti avec la constante de temps $\frac{r_{cc}}{L_{cc}}$ où r_{cc} et L_{cc} sont la résistance et l'inductance en court-circuit.

Le courant maximum de court-circuit se présente lorsque la tension est nulle. Il a pour valeur

$$I_{cc\,max} = K_{cc}\, I_{ccp} \sqrt{2}$$

I_{ccp} est la valeur éfficace du courant de court-circuit permanent.

a/ Détermination de la resistance et de l'inductance en court-circuit

La résistance en court-circuit est

$$r_{cc} = \frac{U_{ca}}{I_{en}} = \frac{1,[illegible] \times 6000}{100 \times 88,89} = 0,[illegible]\,\Omega$$

L'inductance en court-circuit est

$$L_{cc} = \frac{1}{100\pi} \frac{U_{ccr}}{I_{2n}} = \frac{1 \times 5{,}36 \times 6000}{100\pi \times 100 \times 88{,}89} = 10\,mH$$

si X_{cc} est la réactance de court-circuit

$$X_{cc} = L_{cc}\,\omega = 10.10^{-3} \times 100\pi = 3{,}14\,\Omega$$

$$\frac{r_{cc}}{X_{cc}} = \frac{0{,}82}{3{,}14} = 0{,}3$$

dans ce cas nous pouvons prendre $k_{cc} = 1{,}55$

b) Calcul des efforts radicaux s'exerçant sur les enroulements.

Les enroulements de haute et de basse tension étant parcourus par des courants de sens inverse, il nait entre ces enroulements des efforts de répulsion.

D'après Kostenko et Piotrovsky, cette force s'exprime par

$$F_{rm} = k_{cc}^2 \frac{S_c \times 148}{f \cdot U_{cc} \cdot a_r} \text{ en tonnes force}$$

S_c = puissance par colonne

= 533,33 KVA

f = 50 Hz

U_{cc} = 5,49 %

a_r = largeur rapportée du canal de fuite

= 3,37 cm.

$$F_{xm} = \frac{14,8 \times (1,55)^2 \times 533,33}{50 \times 5,49 \times 3,37} = 205\ tf$$

L'effort de rupture est donné par

$$F_r = \frac{F_{xm}}{2\pi\ \omega\ S}$$

F_r en Kgf/mm^2, F_{xm} en Kgf, ω = nombre de spires de l'enroulement considéré, S = section de la spire en mm^2

— Effort de rupture pour l'enroulement de H.T

$\omega = 363$ spires ; $S = 24\ mm^2$

$$F_{r2} = \frac{205\ 10^3}{2\pi \times 363 \times 24} = 3,75\ Kgf/mm^2$$

— Effort de rupture pour l'enroulement BT

$\omega = 14$, $S = 610,4\ mm^2$

$$F_{r1} = \frac{205\ 10^3}{2\pi \times 14 \times 610,4} = 3,82\ Kgf/mm^2$$

Ces efforts sont inférieurs à l'effort de rupture généralement admis à savoir

$F_{r\,adm} = 5\ Kgf/mm^2$

A cause de la différence de hauteur des enroulements qui sera introduite par les prises de réglage il apparaitra aussi des efforts axiaux.

Cette différence de hauteur étant toutefois minimes ces efforts seront très faibles et ne seront pas pris en considération.

Poids du tranformateur et dimensionnement du résérvoir d'éxpansion

1_ Poids du cuivre :

_ Poids du cuivre basse-tension :

$m_{cu_1} = V_1 \gamma_1$ avec V_1 volume total du cuivre basse-tension

γ_1 : poids volumique du cuivre

$V_1 = 37,5 \times 610,4.10^{-4} + 3 \times 129,19 \times 610,4 10^{-4} = 25,95\,dm^3$

$m_{cu_1} = 25,95 \times 8,9 = 231\,Kg$

_ Poids du cuivre haute-tension :

$V_2 = 3 \times 4607,34 \times 24.10^{-4} = 33,17\,dm^3$

$m_{cu_2} = 33,17 \times 8,9 = 295\,Kg$

Volume total du Cuivre :

$V_{cu} = 33,17 + 25,95 = 59,12\,dm^3$

Poids total du Cuivre :

$m_{cu} = 295 + 231 = 526\,Kg$

$$\boxed{m_{cu} = 526\,Kg.}$$

Poids total du fer :

$$m_{Fe} = 992 + 602,7 = 1605 \text{ Kg}$$

Volume du fer:

$$V_{Fe} = \frac{1605}{7,65} = 210 \text{ dm}^3$$

Volume total des materiaux actifs:

$$V_a = 210 + 59,12 = 269 \text{ dm}^3$$

Poids des materiaux actifs.

$$m_a = 1605 + 526 = 2131 \text{ Kg}$$

Volume des cales radiales. haute tension:

$$V_{C2} = 9 \times 31 \times 1134 \; 10^{-4} \times 6,24 \; 10^{-2} = 6,8 \text{ dm}^3$$

Volume des cales radiales basse tension :

$$V_{C1} = 8 \times 13 \times 30 \times 28 \; 10^{-4} \times 6 \; 10^{-2} = 0,52 \text{ dm}^3$$

Volume total des cales radiales:

$$V_c = 0,52 + 6,8 = 7,3 \text{ dm}^3$$

Volume décuvable:

$V_d = 7{,}3 \times 269 = 276\ dm^3$

Volume de la cuve :

Le volume de la cuve est egal à son volume sans les ondulations augmenté du volume des ondulations

- Volume de la cuve sans les ondulations:

$V_{so} = H_c \times L_c \times l_c$

$V_{so} = 14{,}00 \times 14{,}40 \times 5{,}42 = 1093\ dm^3$

- Volume des ondulations :

$V_o = 88 \times 12.10^{-2} \times 400.10^{-2} \times 1320.10^{-2} = 558\ dm^3$

Volume total de la cuve :

$V = 558 + 1093 = 1651\ dm^3$

$$\boxed{V = 1651\ dm^3}$$

Volume de l'huile V_h :

$V_h = V - V_d = 1651 - 276 = \underline{1375\ dm^3}$

Poids de l'huile :

$m_h = V_h \times \gamma_h$ avec $\gamma_h = 0{,}895$

$m_h = 1375 \times 0{,}895 = \underline{1231\ Kg}$

Poids de la cuve.

- Poids des parois :

Le volume des parois est :

$V_p = 4(14,40 + 5,42) \times 2,5.10^{-2} \times 2$

$+ 741,21 \times 13,20 \times 2,5\, 10^{-2} = 247\ dm^3$

d'où on a :

$m_p = 247 \times 7,65 = 1890\ Kg.$

- Volume du couvercle :

pour le couvercle on prend une tole de 10 mm d'épaisseur.

$V_{co} = (5,42 \times 14,4)\, 10.10^{-2} = 7,80\ dm^3$

d'ou on a le poids du couvercle :

$m_{co} = 7,80 \times 7,65 = 59,7\ Kg$

- Volume du fond

pour le fond on prend une tole de 8 mm d'épaisseur.

$V_F = (5,42 \times 14,4)\, 8.10^{-2} = 6,24\ dm^3$

d'ou le poids du fond :

$m_F = 6,24 \times 7,65 = 48\ Kg$

d'où le poids total de la cuve :

$m_c = m_F + m_{co} + m_p$

$= 48 + 59,7 + 1890 = 1998\ Kg$

Poids total du transformateur:

Le poids du transformateur est égal au poids du materiel actif, augmenté du poids de l'huile et du poids de la cuve

$$P = m_a + m_h + m_c$$

$$P = 1998 + 2131 + 1231 = 5360\ \text{Kg}$$

$$\boxed{P = 5360\ \text{Kg}}$$

Dimensionnement du reservoir d'expansion

La longueur de ce reservoir est égale à la longueur de la cuve, son volume est :

$$V_r = 0{,}03 . V_h$$

$$V_r = 0{,}03 \times 1375 = \underline{41{,}75\ dm^3}$$

son diamètre est:

$$\frac{\pi D^2}{4} \times 5{,}42 = 41{,}25$$

d'où on a :

$$D = \sqrt{\frac{(41{,}25) . 4}{5{,}42\,\pi}} = 31\ cm$$

$$\boxed{D = 31\ cm}$$

ETUDE DU FONCTIONNEMENT EN CHARGE

Variation du rendement en fonction de la charge pour un facteur de puissance donné

Le rendement est par définition égal au rapport de la puissance fournie par le transformateur sur la puissance qu'il absorbe

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$ P_2 = puissance fournie

P_1 = puissance absorbée

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_j}$$ P_{Fe} = Pertes dans le fer

P_j = Pertes joule

Le rendement peut aussi s'écrire sous la forme

$$\eta = 1 - \frac{P_{Fe} + P_j}{P_2 + P_{Fe} + P_j}$$

Les pertes dans le fer ont une valeur constante tandis que les pertes joule varient avec la charge.

Si l'on appelle α le facteur de charge on aura

$$P_2 = \alpha S_N \cos \varphi_2$$

$$P_j = \alpha^2 P_{cc}$$

P_{cc} représente les pertes en court circuit

Le rendement aura pour expression

$$\eta = 1 - \frac{P_{Fe} + \alpha P_{cc}}{\alpha S_n \cos \varphi_2 + \alpha^2 P_{cc}}$$

Le rendement maximum sera obtenu lorsque l'on aura les pertes Joules (variables) égales aux pertes dans le fer (constantes).

Dans ce qui suit nous allons calculer pour différentes valeurs de la charge le rendement η.

Nous ferons cela pour une charge ayant un facteur de puissance égal à l'unité et pour une charge ayant un facteur de puissance égal à 0,8.

a/ Rendement en fonction du coéfficient de charge - charge résistive

α	P_{Fe} (w)	P_{cc} (w)	$\alpha^2 P_{cc}$ (w)	$P_{Fe} + \alpha^2 P_{cc}$	$P_2 = \alpha S_n \cos\varphi_2$	η %
1/4	3080	19411	1213	4293	400000	99,93
2/4	3080	19411	4852	7932	800000	99,01
3/4	3080	19411	10918	13998	1200000	98,84
4/4	3080	19411	19411	22491	1600000	98,61
5/4	3080	19411	30330	33410	2000000	98,50

Le rendement maximum est obtenu pour $\alpha = 0,4$

il est égal à $\eta_{max} = 99,99$ %

b/ Rendement en fonction du coéfficient de charge pour un facteur de puissance égal à 0,8

α	P_{Fe} (w)	P_{cc} (w)	$\alpha^2 P_{cc}$	$P_{Fe} + \alpha^2 P_{cc}$	$P_2 = \alpha S_n \cos\varphi_2$	η %
1/4	3080	19411	1213	4293	320000	98,66
2/4	3080	19411	4852	7932	640000	98,77
3/4	3080	19411	10918	13998	960000	98,56
4/4	3080	19411	19411	22491	1280000	98,27
5/4	3080	19411	30330	33410	1600000	97,95

Le rendement maximum est obtenu pour $\alpha = 0,4$ il est égal à $\eta_{max} = 98,80$ %

Calcul de la chute de tension:

La chute de tension en % de la tension nominale est donnée par :

$$\Delta U\% = \alpha\,(U_{cca}\cos\varphi_2 + U_{ccr}\sin\varphi_2)$$

où α : est le coefficient de charge

U_{ccr} et U_{cca} sont les composantes réactives et actives de la tension de court-circuit.

φ_2 est l'angle de déphasage entre le courant de charge et la tension secondaire.

$$U_1 = U_2'\left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right)$$

$$U_2' = \left(\frac{W_1}{W_2}U_2\right)\sqrt{3} = \frac{14}{363,} \cdot 6000\sqrt{3}$$

$$U_2' = 400{,}8\ V$$

d'où on a : $U_{cca} = 1{,}21$

$U_{ccr} = 5{,}36$

$U_2' = 400{,}8\,V$

le tableau suivant donnant la chute de tension en fonction du courant de charge pour une charge résistive, $\cos\varphi_2 = 1$

charge resistive $\cos\varphi_2 = 1$

α	$\Delta U\%$	$\Delta U (V)$	U_1
0	0	0	400,7
1/4	0,303	1,212	398,8
1/2	0,605	2,424	397,6
3/4	0,908	3,632	396,4
1	1,21	4,840	395,2
5/4	1,513	6,052	393,9

Charge inductive $\cos\varphi = 0{,}8$

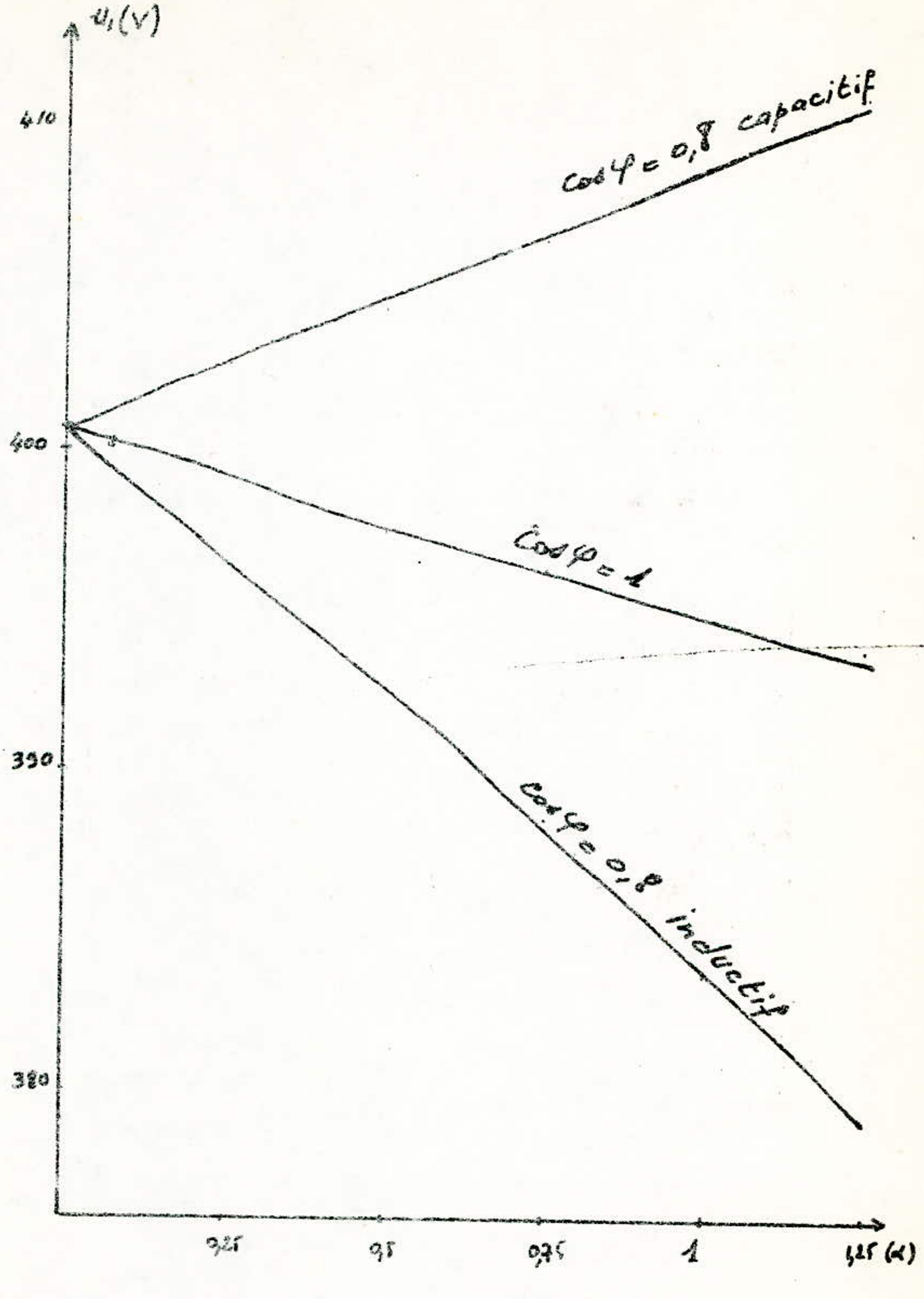
α	$\Delta U\%$	$\Delta U (V)$	$U_1 (V)$
0	0	0	400,7
1/4	1,046	4,184	395,8
1/2	2,092	8,368	391,6
3/4	3,138	12,552	387,4
1	4,184	16,736	383,3
5/4	5,230	20,920	379,1

Cas d'une charge capacitive

$\cos\varphi = 0{,}8 \quad \sin\varphi = -0{,}6$

$$\Delta U\,\% = \alpha\,(1{,}21 \times 0{,}8 - 5{,}36 \times 0{,}6) = -2{,}25\,\alpha$$

α	$\Delta U\,\%$	ΔU (V)	U_1
0	0	0	400,7
1/4	−0,562	2,248	402,2
1/2	−1,124	−4,496	404,5
3/4	−1,686	−6,744	406,7
4/4	−2,248	−8,992	409,0
5/4	−2,810	−11,240	411,2


U_1(V)
410
400
390
380
0,25
0,5
0,75
1
1,25 (α)
Cos φ = 0,8 capacitif
Cos φ = 1
Cos φ = 0,8 inductif

Conclusion

En conclusion nous pouvons dire que, sans avoir la prétention d'amener quelque chose de nouveau dans la téchnologie de construction, ce projet nous permet de comprendre les problèmes qui se posent lors d'un calcul de transformateur. Les problèmes sont multiples et variés et le problème économique n'en est pas le moindre, malheureusement ce problème n'a pu être mis en relief à cause du manque de documentation.

BIBLIOGRAPHIE

M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI

Machines éléctriques.

M. LIWSCHITZ.

Calcul des machines éléctriques.

Cours de construction de machines dispensé par Monsieur PARLOG à l'École Nationale Polytechnique.