

5/78

UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

100

DÉPARTEMENT ELECTRICITÉ

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
 المكتبة
 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

CONSTRUCTION D'UN
 TRANSFORMATEUR
 1800 KVA 35/6 KV

Proposé par

V. STIRBU

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
 المكتبة
 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

Etudié par :

A. BOUAICH

UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ELECTRICITÉ

PROJET DE FIN D'ETUDES

CONSTRUCTION D'UN
TRANSFORMATEUR
1800 KVA 35/6 KV

Proposé par

V. STIRBU

Etudié par :

A. BOUAICH

Promotion 1978

A mes PARENTS ...

... A mes AMIS

Et à TOUS ceux qui ont contribué à ma
formation, je dédie ce modeste essai.

-----(*)-----

CALIER DES CHARGES

PUISSANCE APPARENTE /	1800 KVA
TENSION PRIMAIRE :	35 KV
TENSION SECONDAIRE :	6 KV
FREQUENCE :	50 HZ
PRISE DE REGLAGE :	± 5 %
PERTES A VIDE :	0,4 %
PERTES EN COURT-CIRCUIT :	20,5 KW
TENSION DE COURT-CIRCUIT :	6,5 %
MODE DE COUPLAGE :	Dy

INTRODUCTION

- 1 -

Depuis le siècle dernier le transformateur a été progressivement remplacé par le transformateur dans l'yle.

L'utilisation de l'acier allié a eu une grande influence sur le développement des transformateurs, en particulier du poids de cuivre utilisé et même un rendement supérieur. Le poids des matériaux actifs a continué de diminuer par l'emploi de l'acier laminé à froid. On envisage de nouvelles perspectives dans ce domaine, vu l'emploi de l'acier laminé à froid à grains superorientés.

Nous nous bornerons à l'étude du transformateur de puissance car il présente le plus grand intérêt vu le développement de l'interconnexion des réseaux.

Dans les pays industriels, la consommation d'énergie double tous les 8 à 10 ans. Pour cette raison, les puissances des usines électriques ainsi que les puissances des groupes installés y compris les transformateurs augmentaient.

La construction et l'utilisation des puissants transformateurs a posé à l'industrie plusieurs importants problèmes dont l'élévation du rendement, le refroidissement et la protection contre les surtensions.

Le problème du rendement des transformateurs de puissance est d'une grande importance si l'on tient compte du fait que l'énergie produite dans une centrale est transformée trois et souvent quatre fois avant d'arriver au récepteur. Pour le rendement il fallait perfectionner constamment les méthodes de calcul des transformateurs, améliorer leur construction, utiliser de nouveaux matériaux ou les utiliser de façon plus rationnelle.

Depuis la construction des premières lignes à haute tension, le problème de la protection des transformateurs contre les surtensions présentait un intérêt exceptionnel. Des études ont montré que certains dispositifs de protection, par exemple l'amélioration de l'isolation des bobines d'extrémité étaient insuffisantes. Pour cette raison, l'idée de construire des transformateurs résonnants ou résistants à la foudre dans lequel la tension est répartie le long de l'enroulement de façon plus ou moins uniforme quelque soit le régime de fonctionnement du transformateur.

L'étude du transformateur qu'on se propose de construire est composée de trois grandes parties :

Dans première partie, on exposera les grandeurs nominales du transformateur son mode de couplage et ses particularités.

La seconde partie sera consacré à la détermination par le calcul du circuit magnétique et des enroulements de telle façon que les données du cahier des charges soient vérifiées.

La dernière partie regroupera l'étude théorique du fonctionnement du transformateur, de son échauffement et de ses sollicitations mécaniques.

I - GRANDEURS NOMINALES :

- Puissance apparente nominale : est celle aux bornes de l'enroulement secondaire, pratiquement égale à celle de l'enroulement primaire étant donné que le rendement du transformateur de puissance est assez élevé.

$$S_n = 1800 \text{ KVA}$$

- Tension primaire nominale par phase :

$$U_{2f} = U_{2n} = 35 \text{ KV}$$

- Tension secondaire nominale par phase :

C'est la tension à vide lorsque le primaire est à sa tension nominale :

$$U_{1f} = U_{1n} / \sqrt{3} = 6 / \sqrt{3} = 3,464 \text{ KV}$$

- Fréquence nominale :

$$f = 50 \text{ Hz}$$

- Courant primaire nominale par phase :

$$I_{2f} = I_n / \sqrt{3} = P_n / \sqrt{3} U_n = 17,14 \text{ A}$$

- Courant secondaire nominal par phase :

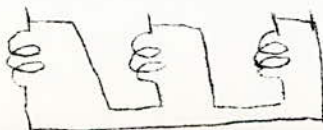
$$I_{1f} = I_n = 173,2 \text{ A}$$

- Rapport de transformation :

$$K = \frac{U_{2f}}{U_{1f}} = 35 / 3,464 = 10,00$$

- Mode de COUPLAGE :

- Enroulement primaire en triangle :





TYPE DE TRANSFORMATEUR.

C'est un transformateur de puissance servant à la distribution de l'énergie électrique :

- Triphasé
- 3 colonnes concentriques
- 2 enroulements
- Prises de réglage sur le côté H/T
- Refroidissement à l'huile.

Réglage de la tension.

L'ensemble est muni de prises de façon à permettre le réglage de la tension à $\pm 5\%$ de la tension nominale.

II. ELEMENTS PRINCIPAUX DU TRANSFORMATEUR.

Ce sont le noyau, les enroulements, la cuve avec l'huile et les isolateurs de sortie.

Le noyau est réalisé en tôles d'acier laminé à froid utilisé de telle façon que le flux circule dans le sens du laminage.

Les tôles laminées sont recuites dans une ambiance d'hydrogène pour éliminer les effets néfastes de l'écrouissage à froid lors du laminage. Les aciers modernes contiennent un peu de grains de silicium, cette opération d'addition de silicium a pour effet de réduire les pertes par hystérésis et augmenter la résistance électrique de l'acier, ce qui se traduit par une diminution des pertes par courants de Foucault.

En outre le silicium réduit le vieillissement de l'acier qui se manifeste par l'accroissement dans le temps par des pertes dans l'acier. L'acier laminé à froid comparé à l'acier laminé à chaud présente une anisotropie très accentuée.

Caractéristiques magnétiques.

- $B = f(H)$ Courbe d'aimantation
- $P = f(B)$ Pertes par hystérésis
- $P_{Fe} = f(P, f)$ Pertes par courants de Foucault

L'acier utilisé sera l'acier laminé à froid du type $\rightarrow 310$
(Noyau magnétique)

- 1 - signifie acier magnétique.
- 3 - signifie que c'est un acier à teneur en Si augmentée (2,5 à 4) %

Nuance de l'acier	Épaisseur nominale de la tôle mm	Pertes spécifiques, W/kg		
		P _{1,0/50}	P _{1,5/50}	P _{1,7/50}
		Valeurs maximales		
Э 11	1,0	5,80	13,4	—
Э 11	0,50	3,30	7,90	—
Э 12	0,50	2,80	6,80	—
Э 21	0,50	2,50	6,10	—
Э 31	0,50	2,00	4,50	—
Э 31	0,35	1,60	3,60	—
Э 41	0,50	1,60	3,60	—
Э 42	0,50	1,40	3,20	—
Э 43	0,50	1,25	2,90	—
Э 41	0,35	1,35	3,20	—
Э 42	0,35	1,20	2,80	—
Э 43	0,35	1,05	2,50	—
Э 310	0,50	1,25	2,80	3,80
Э 320	0,50	1,15	2,50	3,50
Э 330	0,50	1,05	2,30	3,20
Э 310	0,35	1,00	2,20	3,20
Э 320	0,35	0,90	1,90	2,90
Э 330	0,35	0,80	1,70	2,60

- 1. Désigne la qualité de l'acier donné en ce qui concerne les pertes spécifiques pour une induction à une fréquence donnée ainsi que pour une épaisseur de la tôle utilisée.
- 0. Ce chiffre indique qu'il s'agit d'un acier laminé à froid texturé.

Poids spécifique en fonction de la teneur en silicium.

NUANCE de l'acier	Teneur en Si, %	Poids spécifique moyen en g/cm ³
Faiblement allié	0,8 à 1,8	7,80
Moyennement allié	1,8 à 2,8	7,85
A teneur en Si augmentée:	2,8 à 4	7,65
a) laminé à chaud	2,8 à 4	7,65
b) laminé à froid	2,8 à 3,5	7,65
Fortement allié	4 à 4,8	7,65

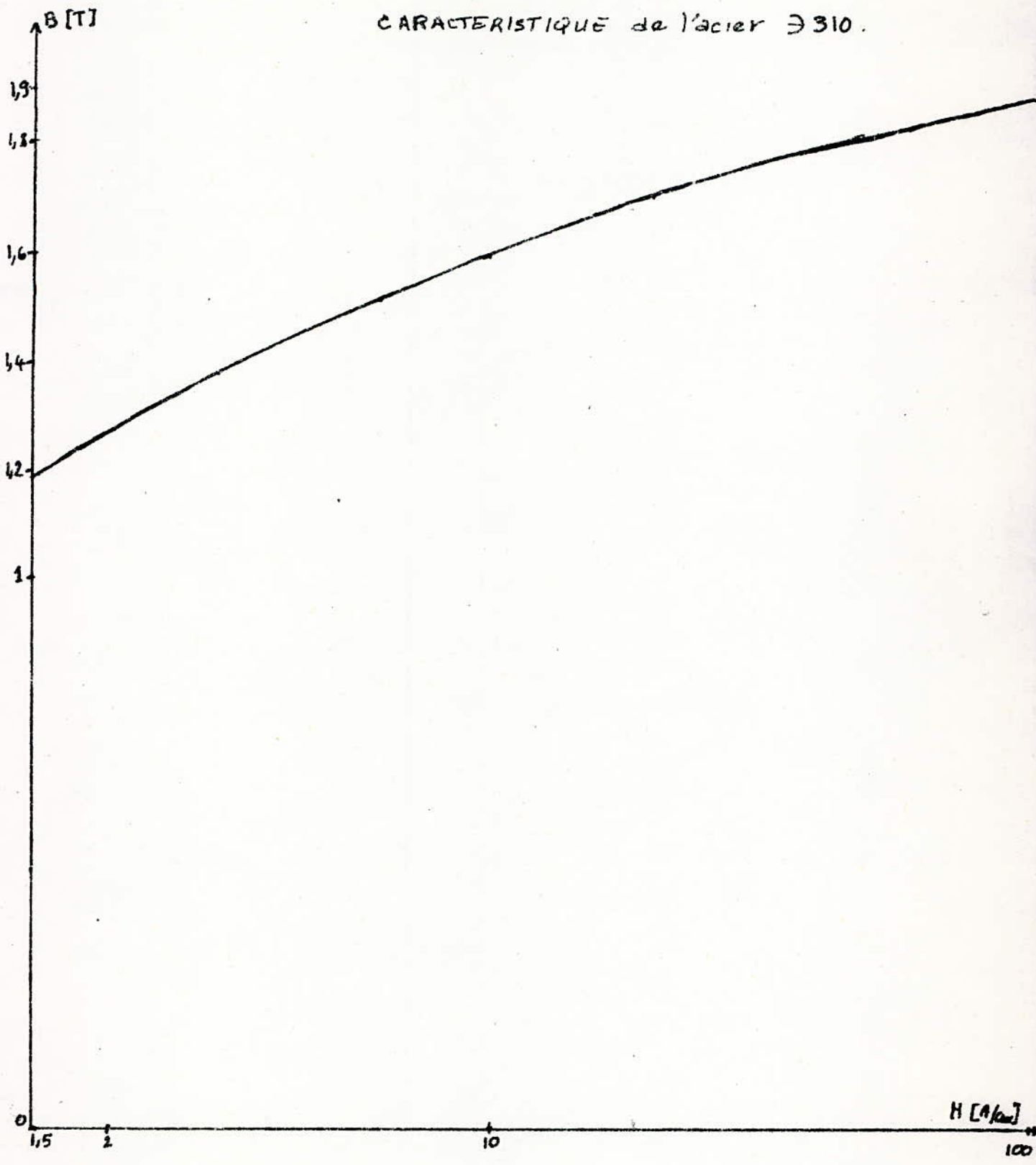
0 Ces tôles sont isolées au carlite, découpées à 45° et assemblées par encastrement.

2- CIRCUIT ELECTRIQUE

Le circuit électrique est composé d'un enroulement haute tension triphasé à prises couplé en triangle et d'un enroulement B.T. triphasé couplé en étoile.

- l'enroulement doit être économique en ce qui concerne les dépenses initiales en tenant compte du prix du cuivre et le rendement du transformateur.
- l'enroulement doit résister aux contraintes naissant lors d'un court-circuit brusque.
- le régime thermique de l'enroulement doit correspondre aux exigences de la norme car une température trop élevée réduit nettement la vie du transformateur.
- l'enroulement doit présenter la rigidité diélectrique nécessaire pour supporter les surtension.

CARACTERISTIQUE de l'acier $\exists 310$.



On utilisera pour notre transformateur des enroulements concentriques. L'enroulement T est placé à l'extérieur par rapport à l'enroulement B.T car l'isolation est plus facile à réaliser ainsi. De plus les avaries sont plus fréquentes sur le côté T que sur le côté B.T, les réparations sont plus faciles à réaliser. L'isolation de ceaque enroulement sera assurée par un cylindre isolant en papier durci.

3) Cuves du transformateur dans l'huile.

Notre transformateur est du type immergé dans l'huile avec circulation naturelle.

Le dimensionnement de la cuve sera lié au calcul thermique du transformateur.

La cuve est de forme ovale. Elle doit résister à une pression manométrique de 0,5 atm. La cuve est installée sur un carter et avec galets prévu pour supporter le poids total du transformateur.

Le refroidissement des transformateurs est d'autant plus difficile à réaliser que la puissance est plus grande. On envisagera une cuve à tubes. Sur les parois de la cuve seront soudés des tubes de 50mm de diamètre.

Couvercle et sorties.

Sur le couvercle seront placés:

- les isolateurs de sorties H.T et B.T
- le conservateur d'huile
- le relai BUCHOLZ
- le tube d'évacuation des gaz.

La tension étant de 35 KV on peut utiliser des isolateurs en porcelaine remplis d'huile ou d'air.

Le conservateur d'huile est un récipient en tôle installé sur la cuve et relié à cette dernière par une tubulure.

Le niveau d'huile dans le conservateur doit être tel que la cuve soit toujours remplie d'huile.

Vu que la surface de l'huile dans le conservateur est beaucoup plus petite que dans la cuve et que la température de l'huile dans le premier est beaucoup plus basse que dans la partie supérieure de la cuve, le phénomène d'oxydation de l'huile au contact de l'air se produit plus lentement, on assure ainsi une protection suffisante de l'huile et de l'isolation du transformateur.

Entre le conservateur et la cuve est installé un relai de Bucholz destiné à signaler tout accident dans le transformateur et (ou) séparer le transformateur du réseau en cas d'avarie.

Le tube d'échappement est destiné à protéger la cuve contre les endommagements possibles en cas de court-circuit ~~per~~ suite de la formation de gaz dans la cuve et de l'accroissement brusque de la tension.

Ce tube est en acier généralement incliné dont une ouverture communique avec la cuve et l'autre est fermée par un disque en verre; pour une certaine pression le disque est expulsé et les gaz avec l'huile sont projetés vers l'extérieur.

4) HUILE DU TRANSFORMATEUR.

Pour améliorer l'isolation et le refroidissement de la partie active du transformateur, cette dernière est immergée dans la cuve remplie d'huile minérale pour transformateur.

L'huile de pétrole utilisée a les caractéristiques:

- Poids spécifique (à + 20°C / à l'eau à + 4°C) 0,895 au max.
- Rigidité diélectrique 20 à 36 KV/mm
- Température d'inflammation 135°C au minimum
- TEMPERATURE de congélation -35°C
- Capacité calorifique 1790 à 1870 W/Kg°C
- Coefficient de dilatation volumique 0,069%/°C

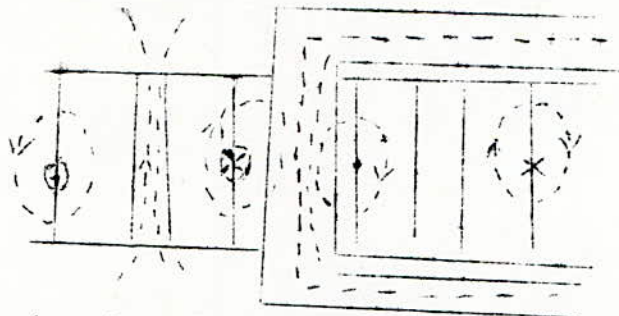
Malgré ces propriétés utiles l'huile a deux défauts importants

- Elle est inflammable
- Sa vapeur forme avec l'air dans certaines cas un mélange explosif.

2) Conditions physiques de fonctionnement des transformateurs

-Principe de fonctionnement.

Le fonctionnement d'un transformateur est basé sur l'interaction électromagnétique de deux ou plusieurs circuits invariables l'un par rapport à l'autre.



Le schéma de principe d'un transformateur monophasé est le même que pour un triphasé.

a) Equations de force magnétomotrice et de force électromotrice

L'analyse de fonctionnement d'un transformateur est basée sur les équations de f.c.m et sur les équations de f.m.m.

Soient u_1 la valeur instantanée de la tension appliquée de l'enroulement primaire provenant d'un réseau de fréquence f ; i_1 et i_2 les valeurs instantanées des courants primaire et secondaire.

La loi de KIRCHOFF appliquée aux circuits magnétiques:

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_0 w_1$$

$i_0 w_1$ est la composante magnétisante nécessaire pour créer dans le noyau des transformateurs un flux dont la valeur instantanée est ϕ_1 (flux principal) qui crée dans les enroulements primaire et secondaire des f.e.m.

$$e_1 = -w_1 \frac{d\phi_1}{dt} = - \frac{d\psi_1}{dt}$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\phi_1}{dt} = - \frac{d\psi_2}{dt}$$

En outre les f.m.m $i_1 w_1$ et $i_2 w_2$ créent des flux de dispersion primaire et secondaire.

On entend par flux de dispersion primaire le flux produit seulement par le courant i_1 et embrassant seulement l'enroulement primaire.

Les flux de dispersion se répartissent principalement dans un milieu non magnétique à perméabilité constante. On admet que les inductances L_1 et L_2 sont constantes.

Les f.e.m de dispersion créées dans les enroulements primaire et secondaire sont respectivement:

$$e_{\sigma_1} = -L_{\sigma_1} \frac{di_1}{dt}$$

$$e_{\sigma_2} = -L_{\sigma_2} \frac{di_2}{dt}$$

Selon la première loi de KIRCHOFF, on a l'équation de la f.e.m de l'enroulement primaire:

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma_1} = r_1 i_1 \quad r_1 \text{ résistance de l'enr. primaire.}$$

$$u_1 = -(e + e_{\sigma_1}) + r_1 i_1$$

$$u_1 = \frac{d\psi_{10}}{dt} + L_{\sigma_1} \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1$$

ψ_1 représente l'encerclement du flux total de l'enroulement primaire créé par le flux principal et le flux de dispersion.

De la même façon on aura l'équation des f.e.m aux bornes de l'enroulement secondaire:

$$e_2 + e_{\sigma_2} - r_2 i_2 = u_2$$

$$0 = \frac{d\psi_{20}}{dt} + L_{\sigma_2} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 + u_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + r_2 i_2 + u_2$$

Si on néglige les pertes dans le fer généralement assez petites et admettre que la perméabilité magnétique du fer est constante on peut représenter les encerclements de flux et des enroulements du transformateur sous la forme :

$$\begin{aligned} -L_1 i_1 + M_{12} \frac{di_2}{dt} + r_1 i_1 &= -L_2 i_2 + M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (M_{12} = M_{21}) \\ u_1 &= -L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + r_1 i_1 \\ -u_2 &= -L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + r_2 i_2 \end{aligned}$$

-RAPPORT de transformation.

On appelle rapport de transformation des tensions d'un transformateur le rapport des f.e.m induites dans les enroulements primaire et secondaire du transformateur par le flux magnétique principal.

$$k = \frac{e_1}{e_2} = \frac{-n_1 \frac{d\phi}{dt}}{-n_2 \frac{d\phi}{dt}} = n_1/n_2$$

EQUATIONS des f.n.n et des f.e.n pour des tensions et des courants sinusoidaux.

Si les f.e.n, les tensions et les courants sont des fonctions sinusoidales du temps on peut représenter les valeurs efficaces de ces fonctions par leur valeur complexe, U, E et I.

Equat. des f.n.n: n1i1 + n2i2 = n1io

Equat. des f.e.n U1 + E1 + Eσ = r1i1

ou : U1 = -(E1 + Eσ + r1i1) Pour l'enroulement secondaire :

E2 + Eσ2 - r2i2 = U2

Pour une variations sinusoidale du courant, la valeur instantanée de la f.e.n de dispersion de l'enroulement primaire est:

eσ = -Lσ di1/dt = -Lσ d(I1m sinωt)/dt = -Lσ I1m cosωt

e = I1m x1 cosωt.

La f.e.n est en retard de 90° sur i1 qui l'engendre et sa valeur efficace en complexe est:

Eσ = -jx1 i1

Pour l'enroulement secondaire :

Eσ2 = -jx2 i2

x1 et x2 sont les réactances inductives de dispersion des deux enroulements.

Pour l'enroulement primaire :

U1 + E1 - jx1 i1 = r1 i1

ou U1 = -E1 + (r1 + jx1) i1 = -E1 + Z1 i1

Pour l'enroulement secondaire :

E2 - jx2 i2 - r2 i2 = E2 - (x2 + r2) i2 = E2 - Z2 i2 = U2

-U2 = -E2 + Z2 i2

Z1 et Z2 sont les impedances des enroulements primaire et secondaire.

Z1 et Z2 sont les impedances de tension dans les enroulements.

D'une façon analogue on peut écrire les equations des fem:

U1 = j L1 I1 + jM I2 + r1 I1

-U2 = j L2 I2 + jM I1 + r2 I2

lors de l'analyse du transformateur de puissance on utilise assez rarement ces équations car les autoinductances et les inductances mutuelles de tels transformateurs sont des grandeurs qui varient dans des limites relativement larges.

b) Transformateur réduit.

Les deux enroulements du transformateur sont réduits à un même nombre de spires. Généralement on réduit l'enroulement secondaire au primaire, cette opération n'influe pas sur le processus énergétique.

F. e. m réduite : E'_2

$$E'_2 = \frac{w_1}{w_2} E_2 = kE_2 = E_1$$

Dans le même rapport change la f. e. m de dispersion
Courant secondaire réduit : I'_2

$$I'_2 = I_2/k \quad E'_2 I'_2 = E_2 I_2$$

Résistance ohmique réduite : r'_2

Les pertes cuivre dans l'enroulement réel et l'enroulement sont égales.

$$r'_2 I'^2_2 = r_2 I^2_2 \quad r'_2 = r_2 (I_2/I'_2)^2 = k^2 r_2$$

Résistance inductive réduite :

$$x'_2 = k^2 x_2$$

Impédance réduite : $Z_2 = r_2 + jx_2$

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2 = k^2 Z_2$$

EQUATIONS DES F. E. M ET F. M. M d'un transformateur réduit :

$$U_1 = -E_1 + Z_1 I_1$$

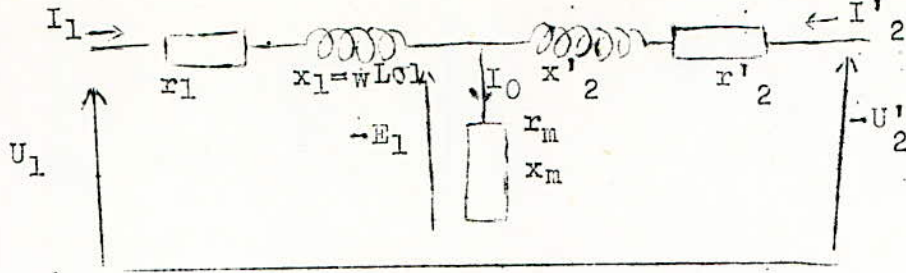
et $U_2 = -E'_2 + Z'_2 I'_2$ ou $E'_2 = E_2 = U_2 + Z'_2 I'_2$

$$w_1 I_1 + w_1 I'_2 = w_1 I_0$$

$$I_1 + I'_2 = I_0$$

L'étude analytique et graphique du fonctionnement du transformateur est simplifiée lorsqu'on remplace un transformateur réel dans lequel les enroulements sont couplés électromagnétiquement par un schéma dont les éléments ne sont couplés que électriquement.

D'après les équations fondamentales des f. e. m et des f. m. m on construit le schéma équivalent en T du transformateur.



- Les équations de fonctionnement sont :

$$I_1 + I'_2 = I_0$$

$$U_1 = E_1 + Z_1 I_1$$

$$U_2 = -E_2 + Z_2 I'_2 \quad ; E_2 = E_1 = Z_2 I'_2 + U_2$$

$$-E_1 = Z_m I_0$$

$$Z_m = r_m + jx_m$$

$$x_m = \frac{\text{pertes fer.}}{I_0^2}$$

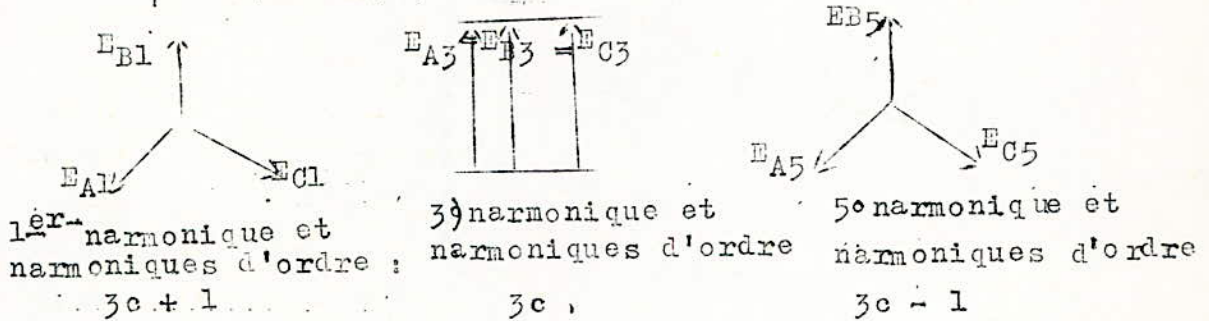
c) Couplages triangle et étoile
 F.e.m des enroulements triphasés :

Dans le cas général les f.e.m e_A, e_B et e_C dans les enroulements A, B et C ne sont pas sinusoidaux. En supposant que seuls les harmoniques impaires soient présents et en admettant que la phase initiale = 0, on a respectivement pour les enroulements A, B et C :

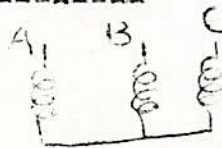
$$e_A = E_{m1} \sin \omega t + E_{m3} \sin 3\omega t + E_{m5} \sin 5\omega t + E_{m7} \sin 7\omega t + \dots$$

$$e_B = E_{m1} \sin(\omega t - 2\pi/3) + E_{m3} \sin 3(\omega t - 2\pi/3) + E_{m5} \sin 5(\omega t - 2\pi/3) + E_{m7} \sin 7(\omega t - 2\pi/3) + \dots$$

$$e_C = E_{m1} \sin(\omega t - 4\pi/3) + E_{m3} \sin 3(\omega t - 4\pi/3) + E_{m5} \sin 5(\omega t - 4\pi/3) + E_{m7} \sin 7(\omega t - 4\pi/3) + \dots$$



- Couplage étoile



Les f.e.m composées sont :

$$\begin{aligned}
e_{AB} &= e_A - e_B \\
e_{BC} &= e_B - e_C \\
e_{CA} &= e_C - e_A
\end{aligned}$$

En utilisant ces équations on a :

$$\begin{aligned}
e_{AB} &= 3E_{m1} \sin(\omega t + \pi/6) + 3E_{m5} \sin(5\omega t - \pi/6) + 3E_{m7} \sin(7\omega t + \pi/6) + \dots \\
e_{BC} &= 3E_{m1} \sin(\omega t + \pi/6 - 2\pi/3) + 3E_{m5} \sin(5\omega t - \pi/6 + 2\pi/3) + \dots \\
e_{CA} &= 3E_{m1} \sin(\omega t + \pi/6 - 4\pi/3) + 3E_{m5} \sin(5\omega t - \pi/6 + 4\pi/3) + \dots
\end{aligned}$$

On constate que pour une connexion étoile :

- Les harmoniques multiples de 3 disparaissent dans la tension composée (ordre 3o).
- Les harmoniques d'ordre (3c+1) y compris le fondamental représentent des systèmes triphasés symétriques directs à phase initiale +π/6.
- Les harmoniques d'ordre (3c-1) sont des systèmes triphasés symétriques à ordre de phase inverse et à phase initiale -π/6.

VALEUR EFFICACE DES f.e.m. simples :

$$E_s = \sqrt{1/2(E_{m1}^2 + E_{m3}^2 + E_{m5}^2 + \dots)}$$

VALEUR EFFICACE DES f.e.m. composées :

$$E_o = \sqrt{3/2(E_{m1}^2 + E_{m5}^2 + E_{m7}^2 + \dots)}$$

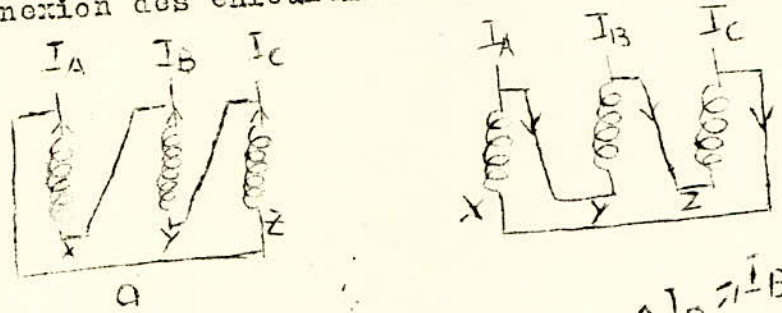
$$E_o = E_s \sqrt{3 \frac{1+k_5^2+k_7^2+\dots}{1+k_3^2+k_5^2+k_7^2+\dots}} \quad \text{où } k_{c1} = E_{m1}/E_{m1} = E_1/E_1$$

Pour une connexion des enroulements en étoile les courants simples partent directement vers la ligne on a alors :

$$I_c = I_s$$

Couplage triangle :

La connexion des enroulements peut se faire de deux manières :

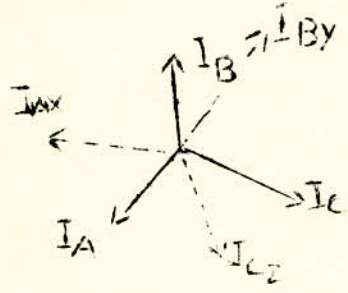


Pour le schéma (b) on a :

$$i_A = i_{AX} - i_{BY}$$

$$i_B = i_{BY} - i_{CZ}$$

$$i_C = i_{CZ} - i_{AX}$$



Le vecteur courant composé est en avance sur le vecteur du courant simple de 30° et on a :

$$I_{C1} = I_s \sqrt{3}$$

Par rapport au troisième harmonique et à ses multiples, le triangle représente un circuit fermé dans lequel tous les anneaux agissent dans un sens, soit depuis le commencement de chaque enroulement de p aise vers la fin, soit en sens inverse. La valeur efficace est multiple de 3 et :

$$E_{3\Delta} = \sqrt{E_3^2 + E_5^2 + \dots}$$

CHAPITRE II

* CALCUL DES DIMENSIONS PRINCIPALES.

Dans le calcul des dimensions d'un transformateur interviennent souvent des coefficients relatifs à la technologie adoptée (nature des matériaux, technique de réalisation etc ...).

La connaissance des aspects théoriques du fonctionnement d'un transformateur bien qu'indispensable, reste insuffisante. Il faut pour cela praiser plusieurs variantes de construction données par des expériences de construction.

I - CHOIX DES PARAMETRES :

On utilise dans la construction du circuit magnétique des tôles en acier laminé à froid du type \rightarrow 310, d'épaisseur 0,5mm. L'isolation des tôles est faite au vernis à l'huile ou au carlite.

En fonction de l'épaisseur de la tôle utilisée et du type d'isolation intervient un facteur de remplissage K_r ; pour l'isolation au carlite et l'épaisseur des tôles de 0,5mm :

$$K_r = 0,97 \text{ à } 0,98$$

Pour une puissance de 1800 KVA on choisira la section du noyau à 6 gradins. Cette forme du noyau introduit un facteur géométrique K_g qui dépend du nombre de gradins :

$$K_g = 0,95$$

Le facteur de sveltesse influence directement les dimensions du transformateur. Si β augmente le poids de la colonne diminue ainsi que le poids des enroulements, mais les pertes dues à la charge et le courant de marche à vide augmentent.

Pour un enroulement en cuivre et en fonction de la puissance :

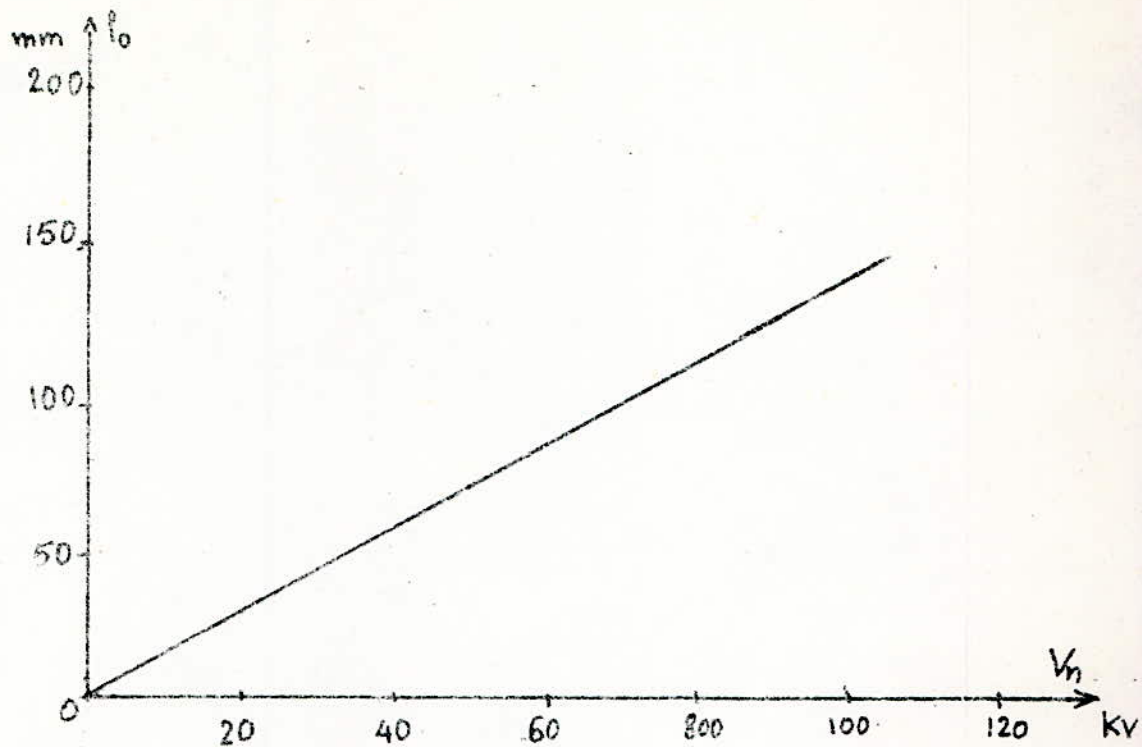
$$\beta = 3 \text{ à } 1,8$$

On prendra dans un premier calcul $\beta = 2,25$.

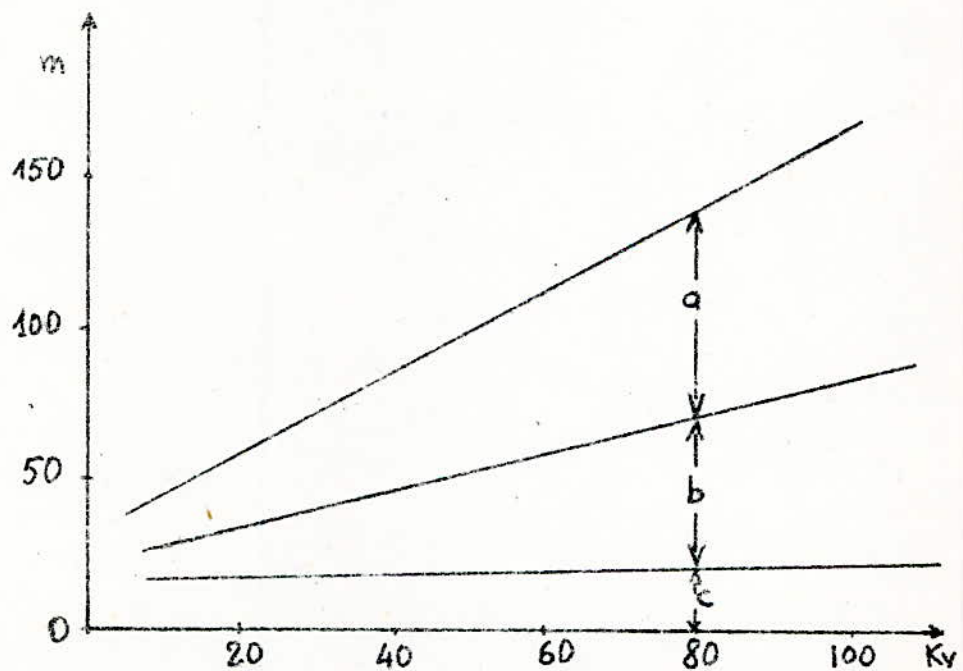
Le choix de l'induction de crête est compris entre 1,6 et 1,7 T pour le type de tôles laminées à froid utilisé.

L'induction de crête B_c est prise égale à 1,63 T.

La largeur du canal de fuite a_{12} est fonction de la tension d'essai de l'enroulement avec la tension la plus grande; on prendra : $a_{12} = 2,6 \text{ cm.}$



DISTANCE ENTRE ENROULEMENT ET LA CULASSE DANS LA FENETRE EN FONCTION DE LA H.T



DROITE a: distance entre les enroulements de H.T des noyaux de fer voisins

DROITE b: distance entre la B.T et la H.T

DROITE c: distance entre noyau de fer et enroulement B.T.

en fonction de la H.T

L'épaisseur rapportée du canal de fuite ayant pour formule :

$$a_r = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3$$

a_1 : épaisseur de la bobine B.T

a_2 : épaisseur de la bobine H.T

avec : $(a_1 + a_2) / 3 = K \sqrt{S_c}$ en cm si S_c (KVA).

Le facteur K est fonction de la puissance et de la tension la plus grande :

S_c (KVA)	100	100 - 560	750 - 5600
U_n (KV)	10		10 à 35
K	0,6 - 0,8		0,48 - 0,6

On prendra dans nos calculs : $K = 0,48$

soit $a_r = 2,6 + 0,48 \sqrt{600} = 4,976$ cm.

- Facteur de REGOVSKI : $K_R = 1 - 1 / 2 \pi \cdot (2a_{12} + a_1 + a_2) / H_B$

Pour le calcul préliminaire on prend : $K_R = 0,95$.

- Facteur d'utilisation est défini par la relation :

$$K_u = K_g \cdot K_r \text{ soit } K_u = 0,97 \times 0,95 = 0,902.$$

2) CIRCUIT MAGNETIQUE

- Diamètre de la colonne :
Il se détermine à partir de la relation :

$$D = 1,9 \sqrt[4]{\frac{P_r \cdot B_c \cdot K_R \cdot S_c}{K_u \cdot 2 B_c^2 \cdot \mu_{KR}}}$$

Application numérique :

$$D = 1,9 \sqrt[4]{\frac{4,976 \cdot 225 \cdot 0,95 \cdot 600}{0,902 \cdot 1,63 \cdot 6,4}} \times 100 = 27,8 \text{ cm}$$

- Diamètre moyen du canal de fuite D_{12} .

$$D_{12} = D + 2a_{0L} + 2a_1 + a_{12}$$

Avec a_{0L} : distance entre la B.T et le noyau de la colonne .
On fixe $a_{0L} = 1,5$ cm .

Dans ce calcul préliminaire, l'épaisseur de l'enroulement B.T est estimée d'après la formule :

$$a_1 = K_{a1} \sqrt[4]{S_c} \quad K_{a1} = \begin{cases} 0,55 \text{ pour } U_{n2} \leq 35 \text{ KV} \\ (0,45 \text{ pour } U_{n2} \leq 110 \text{ KV} \end{cases}$$

A.N :

$$a_1 = 0,55 \sqrt[4]{600} = 2,72 \text{ cm}$$
$$D_{12} = 30,84 \text{ cm}$$

- Hauteur des enroulements B

$$B = \pi \cdot D_{12} / \beta = 54,23 \text{ cm}$$

Pour ce qui est des tôles, on utilisera six formats différents.

La section nette du fer de la colonne : S_{fec}

$$S_{fec} = K_u \cdot \pi^2 / 4$$

LE diamètre du cercle circonscrit à cette section est :

$$D = \sqrt{4S_{fec} / \pi} = 26,40 \text{ cm}$$

Le premier côté de chaque escalier vaut :

- $0,96D = 25,34 \text{ cm}$
- $0,885D = 23,36 \text{ cm}$
- $0,775D = 20,46 \text{ cm}$
- $0,631D = 16,65 \text{ cm}$
- $0,465D = 12,27 \text{ cm}$
- $0,280D = 7,39 \text{ cm}$

Par application du théorème de Pythagore, on détermine l'autre côté :

- $ln_1 = \sqrt{D^2 - (0,96D)^2} = 7,39 \text{ cm}$
- $ln_2 = \sqrt{D^2 - (0,885D)^2} = 12,29 \text{ cm}$
- $ln_3 = \sqrt{D^2 - (0,775D)^2} = 16,68 \text{ cm}$
- $ln_4 = \sqrt{D^2 - (0,631D)^2} = 20,48 \text{ cm}$
- $ln_5 = \sqrt{D^2 - (0,465D)^2} = 23,37 \text{ cm}$
- $ln_6 = \sqrt{D^2 - (0,28 D)^2} = 25,34 \text{ cm}$

On en déduit ainsi le deuxième côté :

$$l_{n1} = l_{n1} = 7,39 \text{ cm}$$

$$l'_{n2} = \frac{12,22 - 7,39}{2} = 2,45 \text{ cm}$$

$$l'_{n3} = \frac{16,68 - 12,22}{2} = 2,195 \text{ cm}$$

$$l'_{n4} = \frac{20,48 - 16,68}{2} = 1,90 \text{ cm}$$

$$l'_{n5} = \frac{23,37 - 20,48}{2} = 1,445 \text{ cm}$$

$$l'_{n6} = \frac{25,344 - 23,37}{2} = 0,987 \text{ cm}$$

Par un calcul fait au préalable, on doit laisser un canal axial de refroidissement du noyau ($e_r = 6\text{mm}$). La section de fer sera alors inscrite dans un cercle de 25 cm de diamètre.

CALCUL DE LA CULASSE /:

La section de la culasse S_{cul} a une section rectangulaire égale à la section brute du noyau.

$$S_{cul} = \frac{S_{fec}}{K_u} = 547,5 / 0,902 = 606,98 \text{ cm}^2$$

La longueur de la culasse est prise égale à la plus large tête du noyau, soit :

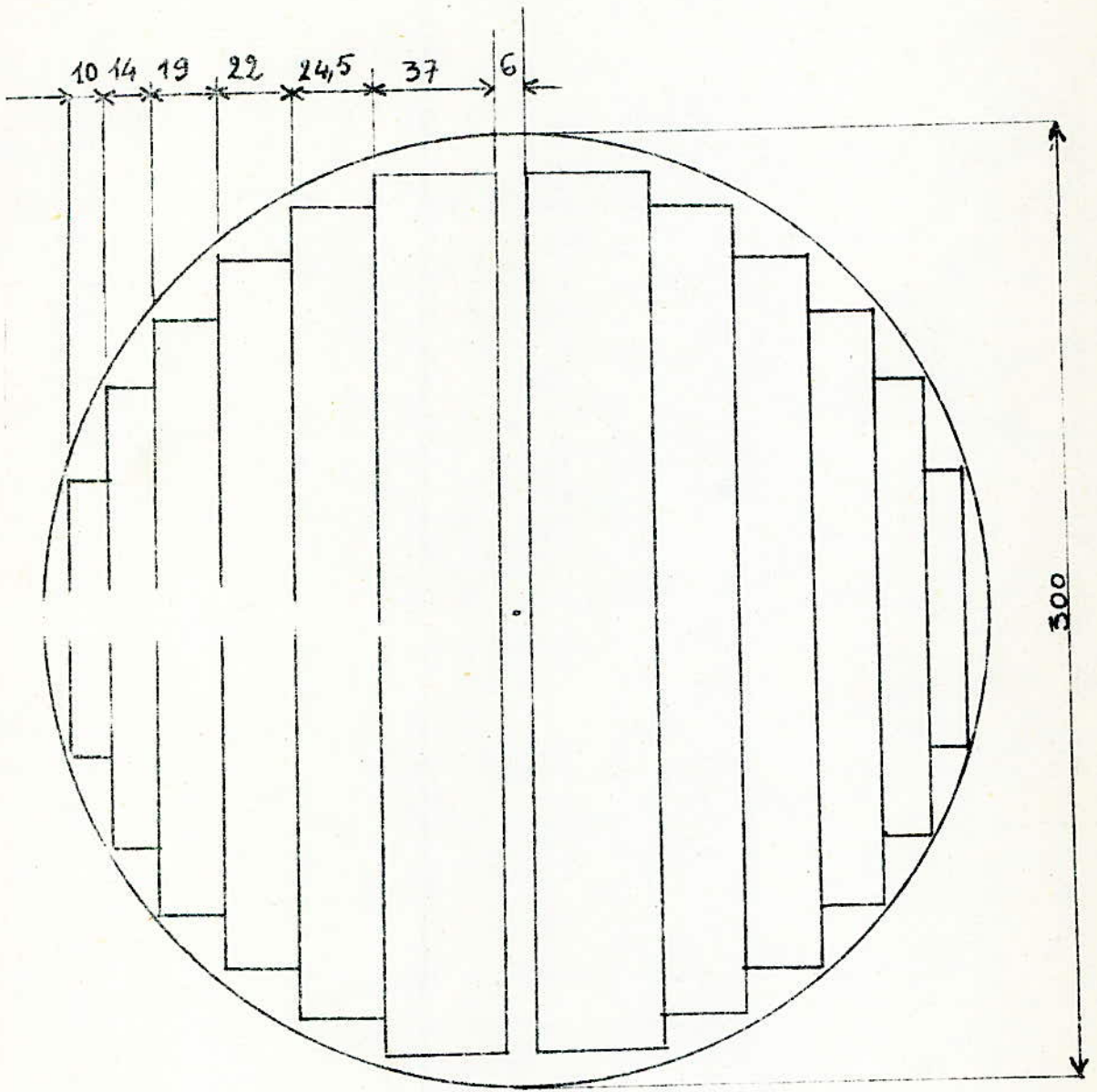
$$l_c = 25,344 \text{ cm}$$

La hauteur de la culasse h_c :

$$h_c = \frac{S_{cul}}{l_c} = 606,98 / 25,344 =$$

$$h_c = 23,95 \text{ cm.}$$

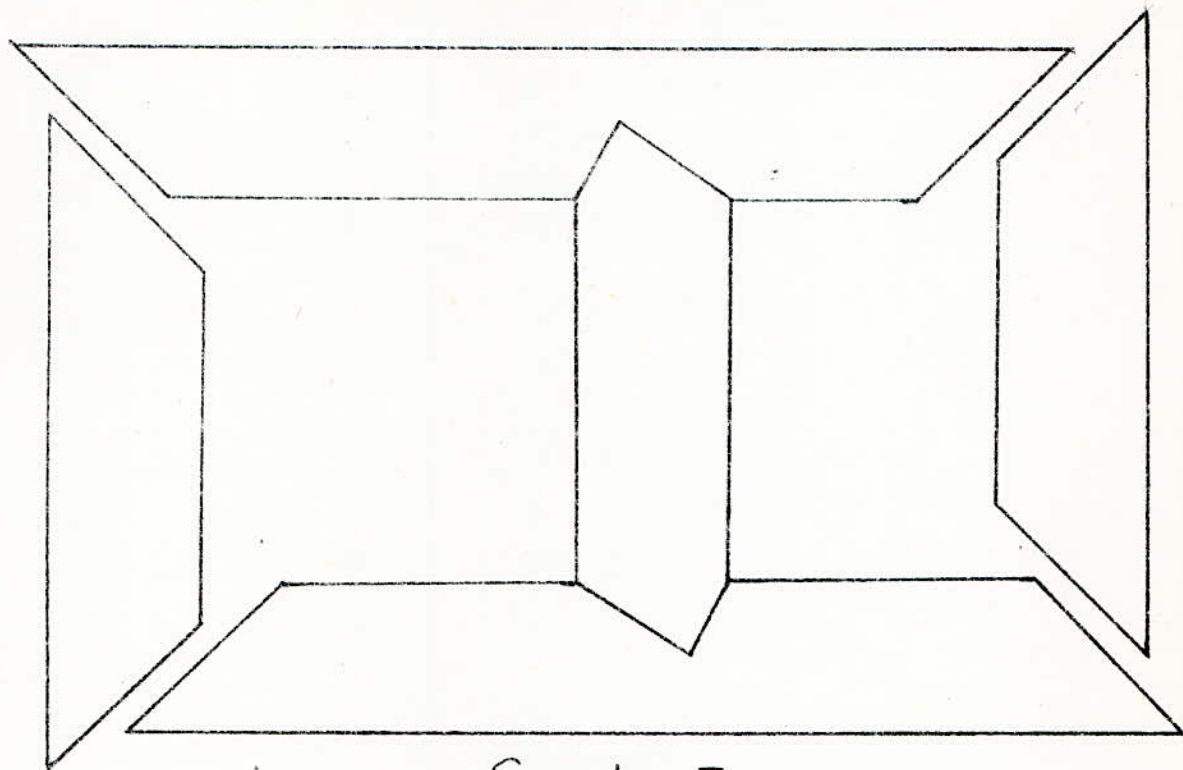
.../...



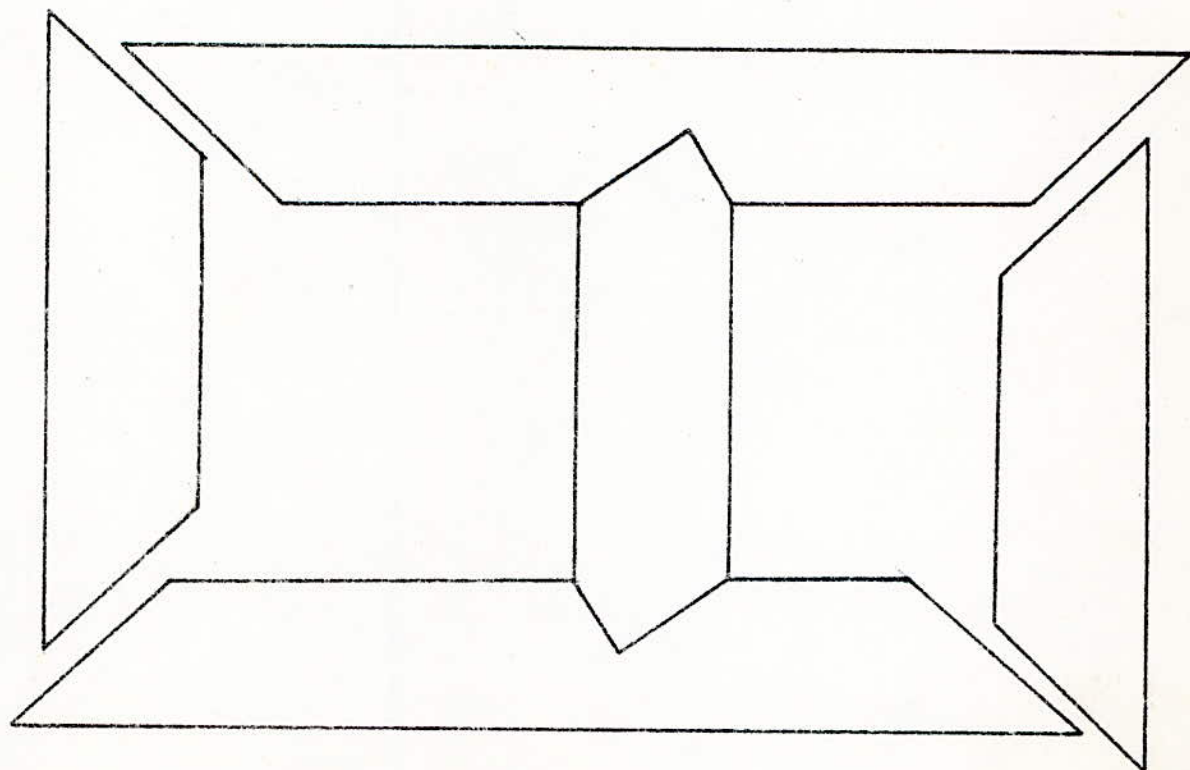
Echelle: 1/2

SECTION DU NOYAU

ASSEMBLAGE DES TOLES



Cycle I



Cycle II

3) CALCUL DE L'ENROULEMENT BASSE TENSION :

En général, le nombre de spires dépend de la tension par spire et de la tension nominale.

$$U_{nfl} = W_1 U_{spl}$$

La tension par spire U_{spl} se détermine à partir de la relation

$$U_{spl} = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot S_{fec} \cdot B_c$$

A.N :

$$U_{spl} = 20,1 \text{ V/spire .}$$

- NOMBRE DE SPIRES :

$$W_1 = \frac{U_{fl}}{U_{spl}} = 3464 / 20,1 = 172 \text{ spires.}$$

- DENSITE DE COURANT moyenne J_m :

Elle est donnée par l'expression pratique pour un entoulement en cuivre :

$$J_m = 7,34 \frac{P_k \cdot U_{spl}}{K_{pk} \cdot D_{12} \cdot S_n}$$

K_{pk} : facteur de pertes supplémentaires donné dans le tableau.

S_n (KVA)	30	150	600	1000	1600	2000	2500
K_{pk}	1,02	1,025	1,05	1,06	1,07	1,075	1,08

On prendra $K_{pk} = 1,072$

$$J_{m1} = 7,34 \frac{20,1 \cdot 20,1}{1,072 \cdot 38,84 \cdot 1800} \times 100 = 4,02 \text{ A/mm}^2$$

ON en déduit la section du conducteur nu :

$$s_{wl} = \frac{I_{fl}}{J_{m1}} = 173,2 / 4,02 = 43,02 \text{ mm}^2$$

On prendra une section normalisée de 45,1 mm². Le conducteur sera de forme néelate ayant les dimensions 10/4,4 mm.

Densité de courant recalculée :

$$J_{m1} = 173,6/43,1 = 4,018 \text{ A/mm}^2$$

L'isolation du conducteur est faite avec du papier; l'isolation bilatérale correspondante sera de 1,04 mm.

Les dimensions du conducteur isolé seront :

$$10 + 1,04 = 11,04 \text{ mm}$$

$$4,4 + 1,04 = 5,44 \text{ mm}$$

Choix du bobinage.

D'après la norme allemande en prenant comme contrainte du cylindre isolant de 10.000 KV/n.

La tension d'essai est de $3,25.6 = 19,5 \text{ KV}$

On prendra comme épaisseur du cylindre isolant de 2 mm.

On adoptera pour l'enroulement B.T, l'enroulement continu en bobines.

En faisant l'enroulement sur le champ, la hauteur d'une bobine est :

$$n_b = b' = 11,04 \text{ mm}$$

Les bobines seront espacées entre elles par des canaux radiaux :

$$n_c = 4 \text{ mm}$$

La hauteur de l'enroulement doit satisfaire à la relation :

$$H_B = N_b \cdot n_b + (N_b - 1) \cdot 4 + 5 \text{ à } 15 \text{ mm de tassement.}$$

N_b : Nombre de bobines.

$$542,3 = N_b \cdot 11,04 + (N_b - 1) \cdot 4 + 15 \text{ mm}$$

$N_b = 172$ spires. CES 172 spires seront réparties en 35 bobines.

29 bobines à 5 spires chacune.

6 bobines à 4,5 spires chacune

L'isolation des bobines de tête sera renforcée de 0,3 mm.

6 Largeur de la bobine :

$$a_1 = 5(5,44 + 0,1 \text{ mm de jeu}) = 27,7 \text{ mm.}$$

Recalcul du facteur de sveltesse /:

$$H_B = 29 \cdot 11,04 + 6 \cdot 11,34 + 34,4 \cdot 15 = 539,2 \text{ mm}$$

$$D_{12} = 27,8 \cdot 3 + 2 \cdot 2,77 + 2,6 = 38,95 \text{ cm}$$

$$\beta_{\text{rec}} = \pi \cdot D_{12} / H_B = 2,26$$

.../...

- Diamètre moyen de l'enroulement :

$$D_{m1} = D + 2a_{o1} + a_1 = 27,8 + 3 + 2,77 = 33,57 \text{ cm}$$

- Longueur totale du conducteur de l'enroulement B.T

$$l_1 = W_1 \cdot l_{w1} = 181,39 \text{ m}$$

- Résistance :

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S_{w1}} = 0,0909$$

- Poids de l'enroulement :

$$G_1 = \gamma_{11} \cdot S_{w1} \cdot l_1 = 8,8 \cdot 10^{-3} \cdot 181,39 \cdot 43,1 = 69,58 \text{ Kg.}$$

4. CALCUL DE L'ENROULEMENT H.T

- Nombre de spires :

Sachant que le rapport de transformation est dans le rapport du nombre de spires :

$$W_2 = W_1 \frac{U_{f2}}{U_{f1}} = 172 \frac{35}{5,464} = 1738 \text{ spires.}$$

- Vérification du rapport de transformation :

$$\frac{l_2}{W_2} = 1738 / 172 = 10,1046$$

$$\frac{U_{f2}}{U_{f1}} = 10,104$$

Les rapports l_2/W_2 et U_{f2}/U_{f1} sont pratiquement égaux.

Le nombre de spires qui correspond à la prise la plus grande sera :

$$W_2' = 1,05 W_2 = 1825 \text{ spires}$$

la prise minimale aura :

$$W_2'' = 0,95 W_2 = 1651 \text{ spires}$$

L'enroulement haute tension porte des prises de réglage. La possibilité de réglage est de $\pm 5\% U_n$.

- Densité de courant J_{m2} :

On choisit la densité de courant J_{m2} légèrement inférieure ou égale à J_{m1} .

On prend $J_{m2} = 3,95 \text{ A/mm}^2$

. Calcul de la section :

$$S_{w2} = \frac{17,14}{3,95} = 4,34 \text{ mm}^2$$

La section normalisée d'un conducteur de section circulaire d'après la norme NFC 31-423 procède la valeur calculée est de $4,48 \text{ mm}^2$; de diamètre $2,36 \text{ mm}$.

L'isolation bilatérale du conducteur est prise égale à $1,04 \text{ mm}$ Selon la norme Allemande la tension d'essai est :

$$1,75.35 + 15 = 76,25 \text{ KV}$$

L'épaisseur du cylindre isolant entre les enroulements H.T et B.T est choisie égale à $7,6 \text{ mm}$ pour une contrainte du cylindre de 10.000 KV/m .

Pour un courant I_{f2} jusqu'à 30 ou 50 A et une tension U_n jusqu'à 35 KV et pour une section maximale de 10 mm^2 le type d'enroulement adopté est le type stratifié.

Le conducteur isolé aura pour dimensions :

$$d' = 2,36 + 1,04 = 3,4 \text{ mm.}$$

Si W_s est le nombre de spires par couche :

$$b = d' (W_s + 1) + (5 \text{ à } 15) \text{ mm}$$

$$W_s = 156 \text{ spires}$$

Les 1825 spires seront réparties en 12 couches :

10 couches de 156 spires

2 couches de 132 spires ; une servant de bobine de tête avec isolation renforcée de $0,6 \text{ mm}$; l'autre de bobine terminale avec isolation renforcée .

Pour éviter un échauffement excessif de l'enroulement on laissera un canal axial de refroidissement $e_r = 6 \text{ mm}$.

- Largeur de l'enroulement H.T

$$a_2 = 2(3,4 + 0,6 + 0,1 \text{ mm de jeu}) + 10(3,4 + 0,1) + 6 \text{ mm}$$

$$a_2 = 4,92 \text{ cm}$$

- PARAMETRES DE L'ENROULEMENT :

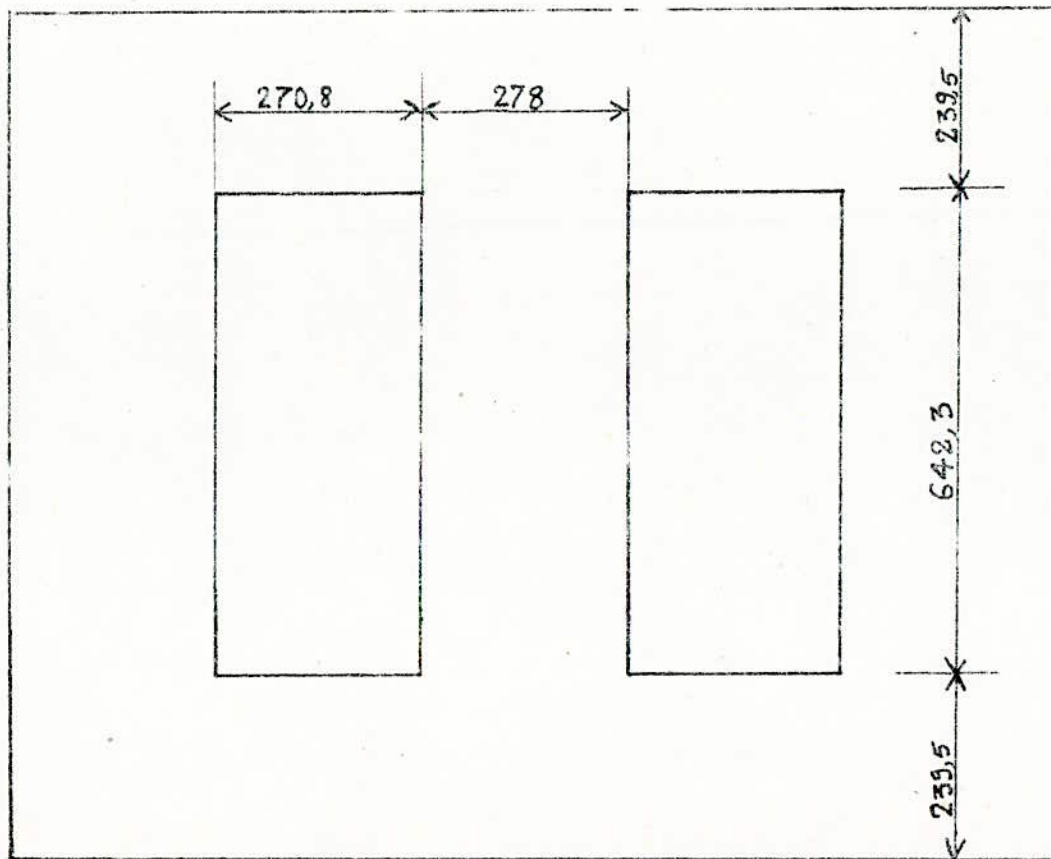
. Diamètre moyen :

$$D_{m2} = D_{m1} + a_1 + 2a_{12} + a_2$$

$$D_{m2} = 46,46 \text{ cm}$$

. Longueur moyenne d'une spire :

$$l_{w2} = \pi . D_{m2} = 145,96 \text{ cm}$$



CIRCUIT MAGNETIQUE

Echelle: 1/10

- Longueur totale du conducteur :

- 28 -

$$l_2 = W_2 l_{w2} = 2663,74 \text{ m}$$

- Résistance :

$$R_2 = \rho \frac{l_2}{S_{w2}} = 12,84$$

- Poids de l'enroulement :

$$G_2 = \gamma l_2 S_{w2} = 9,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2663,74 \cdot 4,48 = 106,2 \text{ Kg}$$

5) VERIFICATION DES PERTES :

a) Pertes cuivre .

- Pertes de base par effet Joule.

Dans les 3 enroulements B.T on a :

$$P_{j1} = 3R_1 I_{f1}^2 = 3 \cdot 0,0909 \cdot (173,2)^2 = 8180,52 \text{ W}$$

DANS les 3 enroulements H.T on a :

$$P_{j2} = 3R_2 I_{f2}^2 = 3 \cdot 12,84 \cdot (17,14)^2 = 11316,39 \text{ W}$$

- Pertes dans les connexions :

• Pour un couplage étoile (enroulement B.T) les pertes Joule dans les connexions sont comme suit :

$$l_{1con} = 7,5 H_B = 406,725 \text{ cm}$$

$$S_{w1con} = S_{w1} = 43,1 \text{ mm}^2$$

$$R_{1con} = \rho \frac{l_{1con}}{S_{w1con}} = 0,002$$

$$P_{j1con} = 3R_{1con} I_{f1}^2 = 180 \text{ W}$$

• Pour un couplage triangle (enroulement .T)

$$l_{2con} = 14 H_B = 759,22 \text{ cm}$$

$$S_{w2con} = \sqrt{3} S_{w2} = 7,76 \text{ mm}^2$$

$$R_{2con} = \rho \frac{l_{2con}}{S_{w2con}} = 0,021$$

$$P_{j2con} = 3R_{2con} I_{f1}^2 = 18,62 \text{ W.}$$

- Pertes supplémentaires :

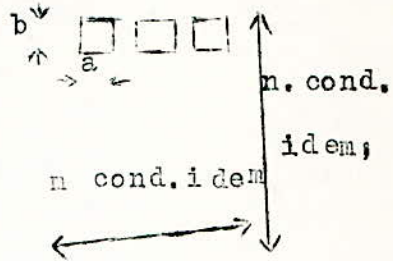
Le champ magnétique de fuite qui existe entre les enroulements détermine des pertes dues aux courants de circulation entre les conducteurs en parallèle. Ce phénomène appelé communément effet pelliculaire est caractérisé par un coefficient K_{mr} de la résistance en courant continu.

- Pour les conducteurs méplats :

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

α : Coefficient caractérisant la Profondeur de pénétration du champ.

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



$$H_F = B + 2l_0$$

H_F = hauteur de la fenêtre

l_0 : distance entre l'enroulement et la culasse

On prend $l_0 = 5$ cm

$$H_F = 54,25 + 10 = 64,25 \text{ cm}$$

$$= \frac{35,16 \cdot 100 \cdot 11,4 \cdot 11,10^{-7}}{642,3 \cdot 2 \cdot 0,0216 \cdot 10^{-6}} = 70,56$$

$$K_{mr} = 1,025$$

- Conducteur circulaire :

$$K_{mr} = 1 + \frac{n^2 - 0,2}{15,25} (\alpha d)^4$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{nd \cdot \omega \mu_0}{H_F \cdot 2 \rho}}$$

$$= \frac{156 \cdot 2,63 \cdot 100 \cdot 11,4 \cdot 11,10^{-7}}{642,3 \cdot 2 \cdot 0,0216 \cdot 10^{-6}} = 20,4$$

$$K_{mr} = 1 + \frac{144 - 0,2}{15,25} \times (20,4 \cdot 2,36 \cdot 10^{-3})^4$$

$$K_{mr} = 1,00005$$

Pertes supplémentaires dans l'enroulement B.T

$$P_{sup1} = (K_{mr} - 1) P_{j1} = 204 \text{ W}$$

Pertes supplémentaires dans l'enroulement .T

$$P_{sup2} = (K_{mr} - 1) P_{j2} = 0,56 \text{ W}$$

Les pertes globales P = somme des pertes cuivre

$$P = P_{cul} + P_{cu2} = 180,52 + 11316,39 + 0,56 + 204$$
$$P = 19,70 \text{ KW}$$

Les pertes totales dues à la charge sont données par la relation :

$$P_k = K_{pk}(P_{cul} + P_{cu2})$$
$$P_k = 21,12 \text{ KW}$$

Soit une erreur avec le cahier de charges :

$$\Delta P_k = \frac{21,12 - 20,5}{21,12} \times 100 = 2,9\%$$

b) Calcul des pertes fer .

- Dimension du circuit magnétique :

hauteur de la fenêtre :

$$H_F = H_D + 2l_0 = 54,23 + 10 = 64,23 \text{ cm}$$

Largeur de la fenêtre :

$$L_F = 2(a_{01} + a_1 + a_{12} + a_2) + a_{22}$$

a_{22} : Distance entre deux enroulements H.T de fers voisins.

$$a_{22} = 3,5 \text{ cm}$$

$$L_F = 27,08 \text{ cm}$$

- Volume des trois noyaux :

$$V_n = 3.5_{\text{rec}} H_F$$

$$V_n = 3.547,5.64,23 = 105497,77 \text{ cm}^3$$

Le poids spécifique moyen pour l'acier laminé à froid étant égal à $7,65 \text{ g/cm}^3$; on détermine le poids des trois noyaux.

$$P_n = 807 \text{ KG}$$

- Volume des deux culasses :

$$V_{cul} = 2S_{cul} (2L_F + 3D) \\ = 2 \cdot 606,98 (54,16 + 85,4) = 166992 \text{ cm}^3$$

- Poids des deux culasses :

$$P_{cul} = 7,65 \cdot 166992 = 1277,5 \text{ Kg}$$

- Induction dans la culasse :

En écrivant l'égalité des flux à travers la section du noyau et celle de la culasse, on a :

$$B_c \cdot S_{fec} = B_{cul} \cdot S_{cul}$$

$$B_{cul} = \frac{S_{fec}}{S_{cul}} \cdot B_c = 0,902 \cdot 1,63 = 1,47 \text{ T}$$

Les pertes fer sont composées par les pertes principales P_{fo} dans le fer et les pertes supplémentaires P_{so} :

Les pertes principales comprennent :

- Les pertes par hysteresis par unité de masse lors d'une inversion d'aimantation alternative .
- Les pertes par courants de Foucault créés par la naissance de forces électromotrices de sens déterminé. Dans ce même sens, sont dirigés les courants créés par ces f.e.m .
- Pertes fer dans le noyau P_{fm} :

DETERMINATION DES PERTES SPECIFIQUES /

Pour des inductions comprises entre 0,5 et 1,7 T ; et des frequences jusqu'à 100 Z, on peut calculer les pertes d'après la formule :

$$P = P_{1,0} \cdot B^n (f/50)^{1,3}$$

$P_{1,0}$ = pertes en W/Kg pour $B = 1 \text{ T}$

$$n = 5,7 \log \frac{P_{1,5}}{P_{1,0}}$$

$P_{1,5}$ = pertes en W/Kg pour $B = 1,5 \text{ T}$

$$n = 5,7 \log 2,8 / 1,25 = 1,9$$

$$P_{1,65} = 1,25 (1,63)^{1,9} = 3,16 \text{ W/Kg}$$

$$P_{fn} = P_{1,63} \cdot P_n = 3,16 \cdot 807 = 2550 \text{ W}$$

- Pertes fer dans les culasses P_{fec}

$$\text{pertes spécifiques : } P_{1,47} = 1,25 (1,47)^{1,9} = 2,60 \text{ W/Kg}$$

$$P_{fec} = 2,6 \cdot 1277,5 = 3321,5 \text{ W}$$

Donc, les pertes principales P_{fo} dans le fer seront égales à :

$$P_{fo} = 2550 + 3321,5 = 5871,5 \text{ W}$$

- Pertes supplémentaires P_{so} :

Elles comprennent :

- Les pertes supplémentaires dans le fer par suite de la variation de la structure des tôles lors de leur usinage.

- Les pertes aux joints et aux endroits où se trouvent les goujons par suite d'une répartition non uniforme de l'induction.

- Les pertes dans les différentes pièces telles que pièces de serrage, cuve du transformateur, etc...

On ne peut pas déterminer ces pertes néanmoins, l'expérience montre que :

$$P_{so} = (0,15 \text{ à } 0,20) P_{fo}$$

En prenant :

$P_{so} = 0,18 P_{fo}$, on peut évaluer les pertes totales dans le fer :

$$P_f = P_{fo} + 0,18 P_{fo}$$

$$P_f = 6,93 \text{ KW}$$

Soit en pourcentage :

$$P_f(\%) = \frac{P_f}{S_n} \times 100 = \frac{6,93}{1800} \times 100 = 0,385\%$$

Les normes fixent ces pertes à 0,4% .

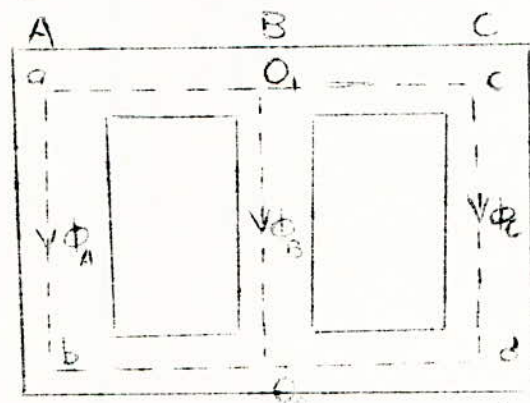
6) - ETUDE DES PRINCIPAUX REGIMES ;

a) Courant de marche à vide .

On a utilisé de l'acier laminé à froid : la courbe d'aimantation est linéaire jusqu'à l'induction 1,6T . La partie comprise entre 1,6 et 1,7T correspond au coude de saturation . La saturation n'est effective qu'au delà de 1,7T . PLUS le fer sera saturé, plus la présence d'harmonique d'ordre impair se fera sentir.

Le courant de marche à vide a 2 composantes : la composante réactive représentant approximativement le courant magnétisant et la composante active correspondant dans le transformateur essentiellement aux pertes dans le fer par hystérésis et par courant de Foucault . Celles par effet Joule sont insignifiantes à vide .

On se propose de déterminer les courants I_A, I_B et I_C dans les 3 phases en utilisant le circuit magnétique représenté par la figure tel que les colonnes et les culasses soient liées :



On applique la loi de Kirchoff aux circuits magnétiques :

-Nœud O1 et O2 :

$$\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$$

-MAILLE abO2O1

$$\Phi_A (R_{col} + 2R_c) - \Phi_B R_{col} = \bar{F}_A - \bar{F}_B$$

Avec : R_{col} : réluctance de la colonne

R_c : réluctance de la culasse

-Maille cdO2O1

$$\Phi_C (R_{col} + 2R_c) - \Phi_B R_{col} = \bar{F}_C - \bar{F}_B$$

Par résolution de ces équations :

$$\bar{F}_A = (R_{col} + 2R_c)\Phi_A + 2/3 R_c \Phi_B$$

$$\bar{F}_B = (R_{col} + 2/3 R_c)\Phi_B$$

$$\bar{F}_C = (R_{col} + 2R_c)\Phi_C + 2/3 R_c \Phi_B$$

Les réductances sont déterminées par :

$$R_{col} = \frac{l_{col}}{\mu_{col} S_{col}} ; R_c = \frac{l_c}{\mu_c S_c}$$

l_{col} : Ligne moyenne de flux dans la colonne .

l_c : " " " " la culasse.

$$l_{col} = l_F + l_c = 64,23 + 23,95 = 88,18 \text{ cm.}$$

$$l_c = l_F + D = 27,08 + 27,8 = 54,88 \text{ cm}$$

$$R_{col} = \frac{\mu_{fe} \cdot 88,18}{B_{fe} \cdot 547,5} = 0,148 \frac{\mu_{fe}}{B_{fe}}$$

$$R_c = \frac{\mu_{fe} \cdot 54,88}{B_{fe} \cdot 606,98} = 0,0904 \frac{\mu_{fe}}{B_{fe}}$$

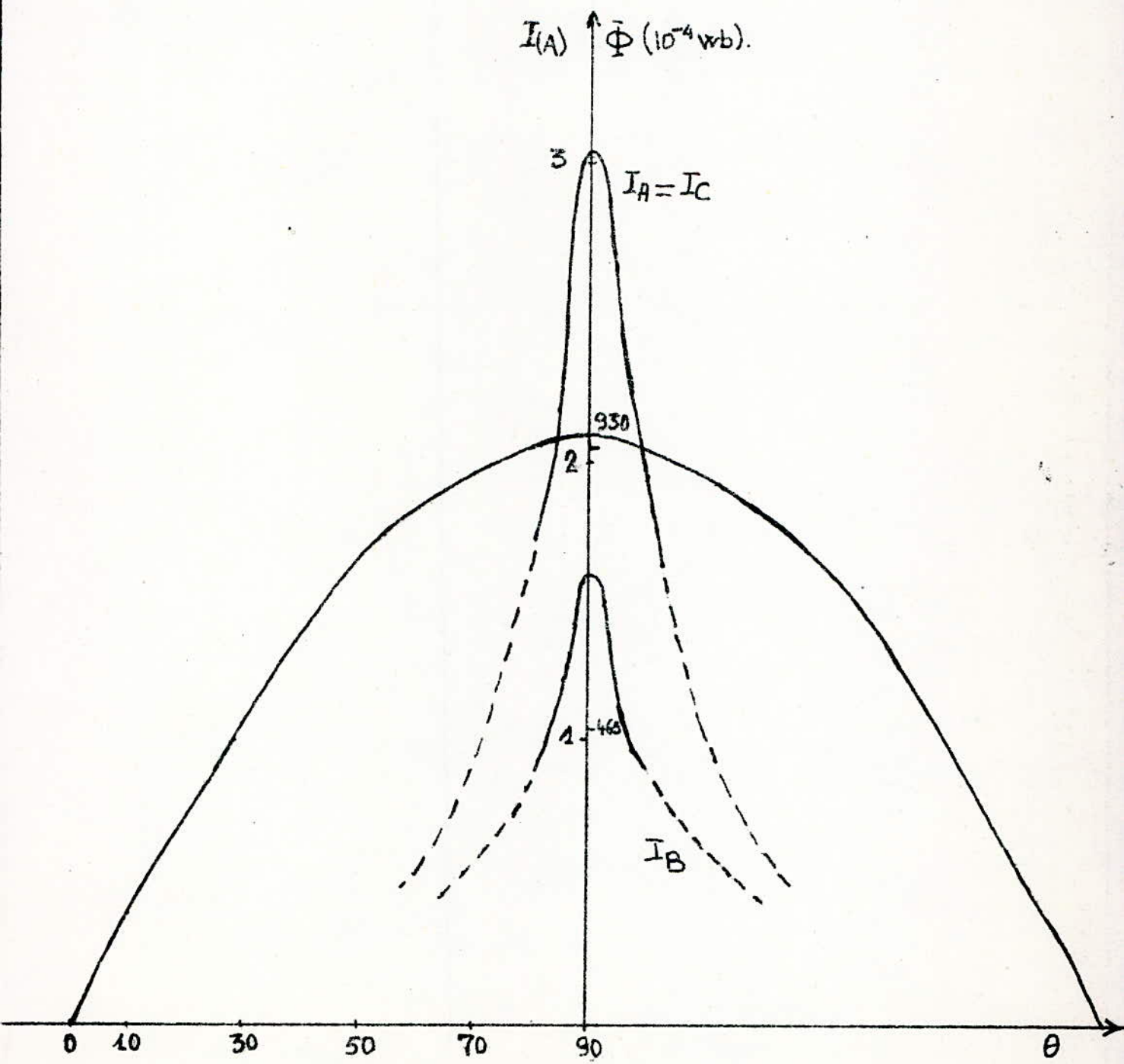
Pour une valeur de l'induction B_{fe} dans le fer correspond une valeur du champ H_{fe} d'où une valeur de $\phi_A, \phi_B, \phi_C, R_c$ et R_{col} .

Les courants I_A, I_B et I_C seront déduits graphiquement à partir des calculs suivants :

$B_{Fec} (T)$	1,70	1,68	1,65	1,63	1,60
$B_{Fecul} (T)$	1,53	1,515	1,488	1,47	1,44
$H_{Fec} (A/m)$	25	20	18	14	12
$H_{Fecul} (A/m)$	22	18	16	12,5	11
$\Phi (10^{-4} Wb)$	930,75	919,8	903,37	892,4	876
$\rho_{csp} (At/cm^2)$	2,176	1,762	1,614	1,271	1,110
$\rho_{cul} (At/cm^2)$	1,300	1,074	0,972	0,768	0,621
$\bar{F}_A =$	$4,776\Phi_A + 0,867\Phi_B$	$3,91\Phi_A + 0,716\Phi_B$	$3,56\Phi_A + 0,648\Phi_B$	$2,807\Phi_A + 0,512\Phi_B$	$2,352\Phi_A + 0,414\Phi_B$
$\bar{F}_B =$	$3,04\Phi_B$	$2,478\Phi_B$	$2,262\Phi_B$	$1,783\Phi_B$	$1,524\Phi_B$
$\bar{F}_C =$	$4,776\Phi_C + 0,867\Phi_B$	$3,91\Phi_C + 0,716\Phi_B$	$3,56\Phi_C + 0,648\Phi_B$	$2,807\Phi_C + 0,512\Phi_B$	$2,352\Phi_C + 0,414\Phi_B$
$F_A (At)$	5252	4254	3800	2962	2422
$F_B (At)$	2829	2279	2043	1591	1335
$F_C (At)$	5252	4254	3800	2962	2422
$I_A (A)$	3,02	2,44	2,18	1,70	1,39
$I_B (A)$	1,62	1,31	1,17	0,91	0,77
$I_C (A)$	3,02	2,44	2,18	1,70	1,39

Φ 10^{-4} Wb	θ°	$I_A = I_C$	$I_A \sin \theta$	$I_A \sin 3\theta$	$I_A \sin 5\theta$	$I_A \sin 7\theta$	I_B	$I_B \sin \theta$	$I_B \sin 3\theta$	$I_B \sin 5\theta$	$I_B \sin 7\theta$
81	5	0,02	0,0017	0,005	0,008	0,011	0,015	0,0013	0,0038	0,006	0,0086
240	15	0,06	0,015	0,042	0,058	0,058	0,025	0,0064	0,0176	0,024	0,024
393	25	0,10	0,042	0,096	0,082	0,008	0,04	0,0169	0,0386	0,032	0,0035
533	35	0,16	0,091	0,154	0,014	-0,145	0,08	0,0458	0,0772	0,007	-0,072
658	45	0,28	0,198	0,198	-0,198	-0,198	0,16	0,113	0,113	-0,113	-0,113
762	55	0,44	0,360	0,113	-0,438	0,187	0,28	0,229	0,072	-0,279	0,118
843	65	0,64	0,580	-0,165	-0,252	0,637	0,46	0,417	-0,119	-0,264	0,458
899	75	1,30	1,256	-0,919	0,336	0,336	0,70	0,676	-0,495	0,181	0,181
927	85	2,4	2,390	-2,318	2,175	-1,966	1,1	1,096	-1,062	0,997	-0,901
somme des termes d'1 même colonne →			4,933	-2,794	1,785	-1,072		2,601	-1,354	0,591	-0,293

CORRANTS A VIDE ET FLUX.



Les courants I_A , I_B et I_C décomposés en harmoniques s'écrivent :

$$I_A = I_C = a_1 \sin \theta + a_3 \sin 3\theta + a_5 \sin 5\theta + a_7 \sin 7\theta$$

$$I_B = a_1' \sin \theta + a_3' \sin 3\theta + a_5' \sin 5\theta + a_7' \sin 7\theta$$

avec :

$$a_1 = 2/9 \cdot 4,933 = 1,096$$

$$a_1' = 2/9 \cdot 2,601 = 0,578$$

$$a_3 = -2/9 \cdot 2,974 = -0,662$$

$$a_3' = -2/9 \cdot 1,359 = -0,30$$

$$a_5 = 2/9 \cdot 1,785 = 0,396$$

$$a_5' = 2/9 \cdot 0,591 = 0,131$$

$$a_7 = -2/9 \cdot 1,072 = -0,238$$

$$a_7' = -2/9 \cdot 0,293 = -0,065$$

D'où les valeurs des courants :

$$I_A = I_C = \sqrt{\frac{(1,096)^2}{2} + \frac{(0,662)^2}{2} + \frac{(0,396)^2}{2} + \frac{(0,238)^2}{2}} = 0,948 \text{ A}$$

$$I_B = \sqrt{\frac{(0,578)^2}{2} + \frac{(0,30)^2}{2} + \frac{(0,131)^2}{2} + \frac{(0,065)^2}{2}} = 0,472 \text{ A}$$

Avec l'assimilation du courant magnétisant avec la composante réactive le courant magnétisant sera égale à la moyenne arithmétique des courants I_A , I_B , et I_C .

$$I_o = I_{or} = 1/3 \cdot (0,948 + 0,472 + 0,948) = 0,79 \text{ A}$$

soit en (%) :

$$I_{or} = \frac{I_{or}}{I_n} \times 100 = \frac{0,79}{17,14} \times 100 = 4,61\%$$

- Composante active du courant à vide :

$$I_{oa}(\%) = \frac{P_o}{S_n} \times 100 = \frac{6,93}{1800} \times 100 = 0,385 \%$$

- Le courant à vide vaut :

$$I_o = \sqrt{I_{or}^2 + I_{oa}^2} = \sqrt{(2,66)^2 + (0,385)^2} = 2,68 \%$$

$$I_o(\%) = 2,68 \%$$

b) REGIME DE COURT-CIRCUIT :

La tension de court-circuit a 2 composantes :

• La composante active U_{ka} qui représente la chute de tension active.

• La composante réactive U_{kr} qui représente la chute de tension réactive.

La composante U_{ka} est calculée suivant la formule :

$$U_{ka} = \frac{P_{Kk}}{S_n} \cdot 100 = \frac{21,12}{1800} \cdot 100$$

$$U_{ka} = 1,17 \%$$

La composante réactive :

$$U_{kr} = \frac{2 \cdot \Pi \cdot f \cdot W_l^2 \cdot a_r \cdot K_R \cdot I_{fl}}{U_{fl}}$$

avec : recalculé = 2,26

$$a_r = 2,6 + \frac{2,77 + 4,92}{3} = 5,16 \text{ cm}$$

$$K_R = 1 - \frac{1}{2 \Pi} \cdot \frac{5,2 + 2,77 + 4,92}{54,23} = 0,96$$

$$U_{kr} = 6,53 \%$$

La tension de C-C U_k vaut :

$$U_k = \sqrt{U_{ka}^2 + U_{kr}^2} = 6,63 \%$$

Soit une erreur avec les données du cahier de charges :

$$U_k = \frac{6,63 - 6,5}{6,63} = 1,96 \%$$

I- Calcul du rendement.

Le rendement est étudié par la méthode de détermination indirecte (chaque puissance est exprimée par l'autre et les pertes

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_k$$

P_1 : Puissance amenée aux bornes du transformateur.

P_2 : Puissance fournie par le transformateur.

On utilisera la formule du rendement sous sa forme générale

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + K^2 P_k}{K P_n \cos \phi + P_0 + K^2 P_k} \right) 100$$

K : Coefficient de charge.

On fera le calcul pour une charge résistive ($\cos \phi = 1$)

et pour une charge réactive ($\cos \phi = 0,8$).

$$P_0 = P_f = 6,93 \text{ Kw}$$

$$P_k = 21,12 \text{ Kw}$$

K	P_0 (Kw)	$K^2 P_k$	$K P_n \cos \phi$	$P_0 + K^2 P_k$	Rendement %
1/4	6,93	1,52	450	8,25	98,20
1/2	6,93	5,28	900	12,21	98,66
3/4	6,93	11,88	1350	18,81	98,63
1	6,93	21,12	1800	28,05	98,46

Charges réactives : $\cos \phi = 0,8$

- 41 -

K	Po	K PK	KPn	Po+K PK	η %
1/4	6,93	1,32	360	8,25	97,76
1/2	6,93	5,28	720	12,21	98,33
3/4	6,93	11,38	1080	18,31	98,29
1	6,93	21,12	1440	28,05	98,09

2. CARACTERISTIQUE EXTERNE $U_2 = f(I_2)$

- Variation de la tension secondaire avec la charge pour un facteur de puissance donné :

$$K = \frac{P}{P_n} = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \phi}{\sqrt{3} U_{2n} I_{2n}} = \frac{U_2 I_2 \cos \phi}{U_{2n} I_{2n}}$$

$$U_2\% = \frac{U_{2n} - U_2}{U_{2n}} \cdot 100 = \frac{U'_{2n} - U'_2}{U'_{2n}} \cdot 100 = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} \cdot 100$$

- U_2 : tension secondaire pour une charge et un facteur de puissance donné.
- U_{2n} : tension secondaire nominale.
- U'_2 et U'_{2n} : tensions secondaires réduites au primaire.
- U_1 : tension primaire.

On utilise la méthode analytique où :

$$U_2\% = K \left(UK_0 \cos \phi_2 + UK_r \sin \phi_2 \right)$$

Le terme $\frac{UK_r \sin \phi_2}{100}$ étant négatif :

* CAS d'une charge résistive pure ($\cos \varphi_2 = 1$)

K	$\Delta U \%$	$U_2' (V)$	$U_2 (V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}
1/4	0,292	34897,8	3453,6	0,997	0,25
1/2	0,585	34795,3	3443,5	0,994	0,50
3/4	0,877	34693	3334,4	0,991	0,75
1	1,170	34590,5	3423	0,988	1
5/4	1,462	34488,3	3414	0,985	1,26

* CAS d'une charge capacitive $\cos \varphi_2 = 0,8$ $\sin \varphi_2 = -0,6$

$$\Delta U_b = k(-17,97 - 6,530,6) = -2,982k$$

K	$\Delta U \%$	$U_2' (V)$	$U_2 (V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}
1/4	-0,745	35260	3489	1,007	0,31
1/2	-1,491	35522	3515	1,015	0,62
3/4	-2,236	35782	3541	1,022	0,92
1	-2,982	36043	3567	1,029	1,21
5/4	-3,727	36304	3593	1,037	1,50

* CAS d'une CHARGE INDUCTIVE $\cos \varphi_2 = 0,8$ $\sin \varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U \% = K(1,17 \cdot 0,8 + 6,53 \cdot 0,6) = 4,854 K.$$

K	$\Delta U \%$	U_2^1 (V)	U_2 (V)	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}
1/4	1,22	34576	3422	0,987	0,316
1/2	2,43	34149	3379	0,975	0,641
3/4	3,64	33726	3337	0,963	0,973
1	4,85	33302	3295	0,951	1,314
5/4	6,06	32879	3254	0,939	1,664

7 DIMENSION DE LA CUVE,

Vu la puissance du transformateur on adoptera une cuve tubulaire à cause des efforts mécaniques qui s'exercent sur les parois et la quantité de chaleur à évacuer.

Un calcul thermique nous permettra de vérifier si les dimensions trouvées satisfont au critère de bon refroidissement du transformateur.

On prendra comme distance minimale entre la bobine H.T. et la paroi de la cuve la distance $a_{2c} = 80\text{mm}$ (80 à 100mm; norme). Du côté où seront les prises vers les bornes, la distance entre la bobine H.T. et la paroi de la cuve sera $a'_{2c} = 120\text{mm}$ (120 à 160 mm; norme).

- Largeur de la cuve;

$$\begin{aligned} l_c &= D + 2(a_{01} + a_1 + a_{12} + a_2) + a_{2c} + a'_{2c} \\ &= 27 + 2(1,5 + 2,77 + 2,6 + 4,92) + 8 + 12 \\ l_c &= 70,58 \text{ cm.} \end{aligned}$$

On prendra comme largeur de la cuve la valeur arrondie;

$$l_c = 72 \text{ cm.}$$

- Rayon de courbure;

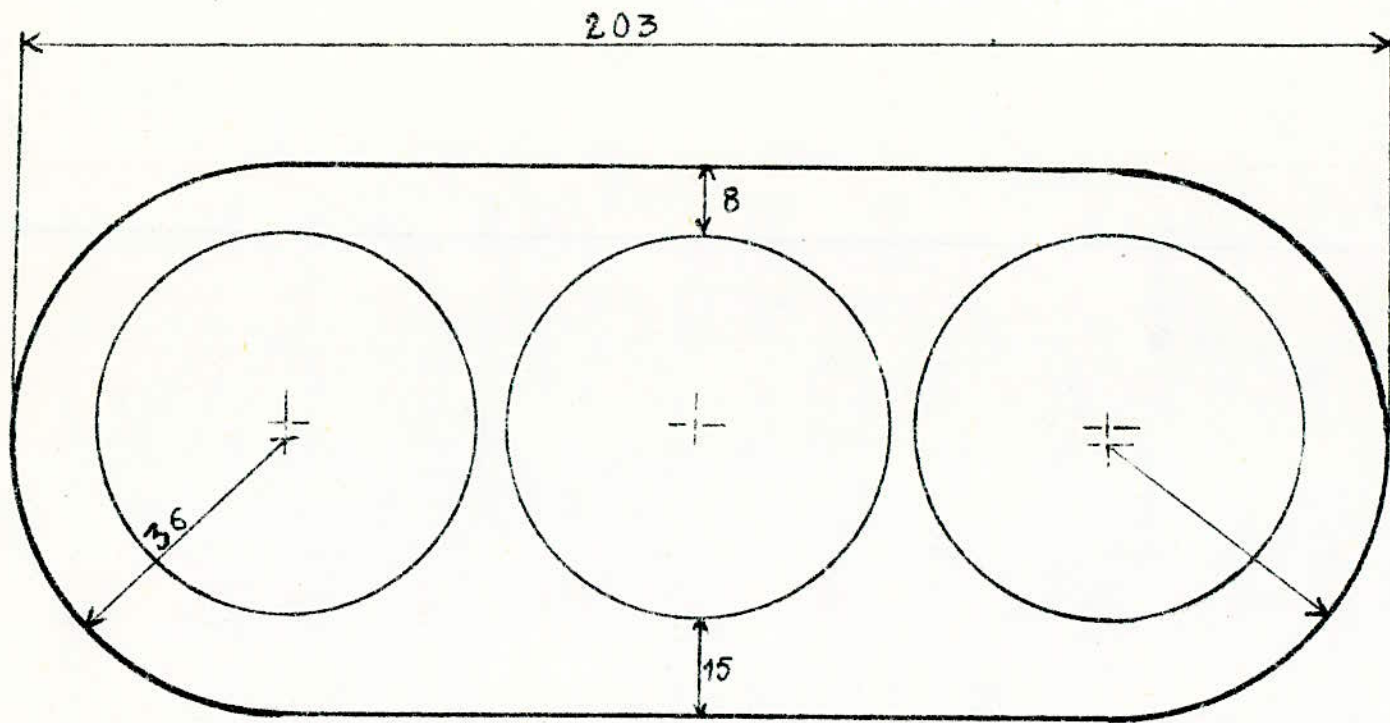
$$R_c = l_c / 2 = 36 \text{ cm.}$$

- Longueur de la cuve.

$$\begin{aligned} L_c &= 2(l_c - a'_{2c} - a_{2c}) + 2 a_{22} + 2 R_c \\ &= 3l_c + 2 a_{22} - 2(a_{2c} + a'_{2c}) \\ L_c &= 203 \text{ cm.} \end{aligned}$$

- Hauteur de la cuve;

$$H_c = H_P + h_c + d_1 + d_2$$



FOND de la CUVÉ

Echelle : 1/10

d_1 = distance entre la culasse inférieure et le fond de la cuve.

d_2 = distance entre la culasse supérieure et le couvercle

$d_1 = 50 \text{ mm}$

$d_2 = 500 \text{ mm}$

A.H./:

$c = 62,23 + 2 \times 23,95 + 5 + 50$

$c = 165,13 \text{ cm.}$

On prendra la valeur arrondie de 166 cm.

- Surface en contact avec l'huile.

$S_c = S_{bl} + S_{cp} + S_{lc}$

- Surface de base S_{bl} :

$S_{bl} = (203 - 2,36) \cdot 72 + \pi \cdot 36^2 = 13503,5 \text{ cm}^2$

- Surface du capot :

$S_{cp} = S_{bl}/2$

- Surfaces latérales S_{lc}

$S_{lc} = 2 \cdot 166 (203 - 2,36) + 2\pi \cdot 36 \cdot 166 = 81040,3 \text{ cm}^2$

La surface en contact avec l'huile est alors :

$S_c = 10,13 \text{ m}^2$

.- Détermination de la quantité de chaleur q_c par unité de surface et par degré.

$q_c = P/S_c$

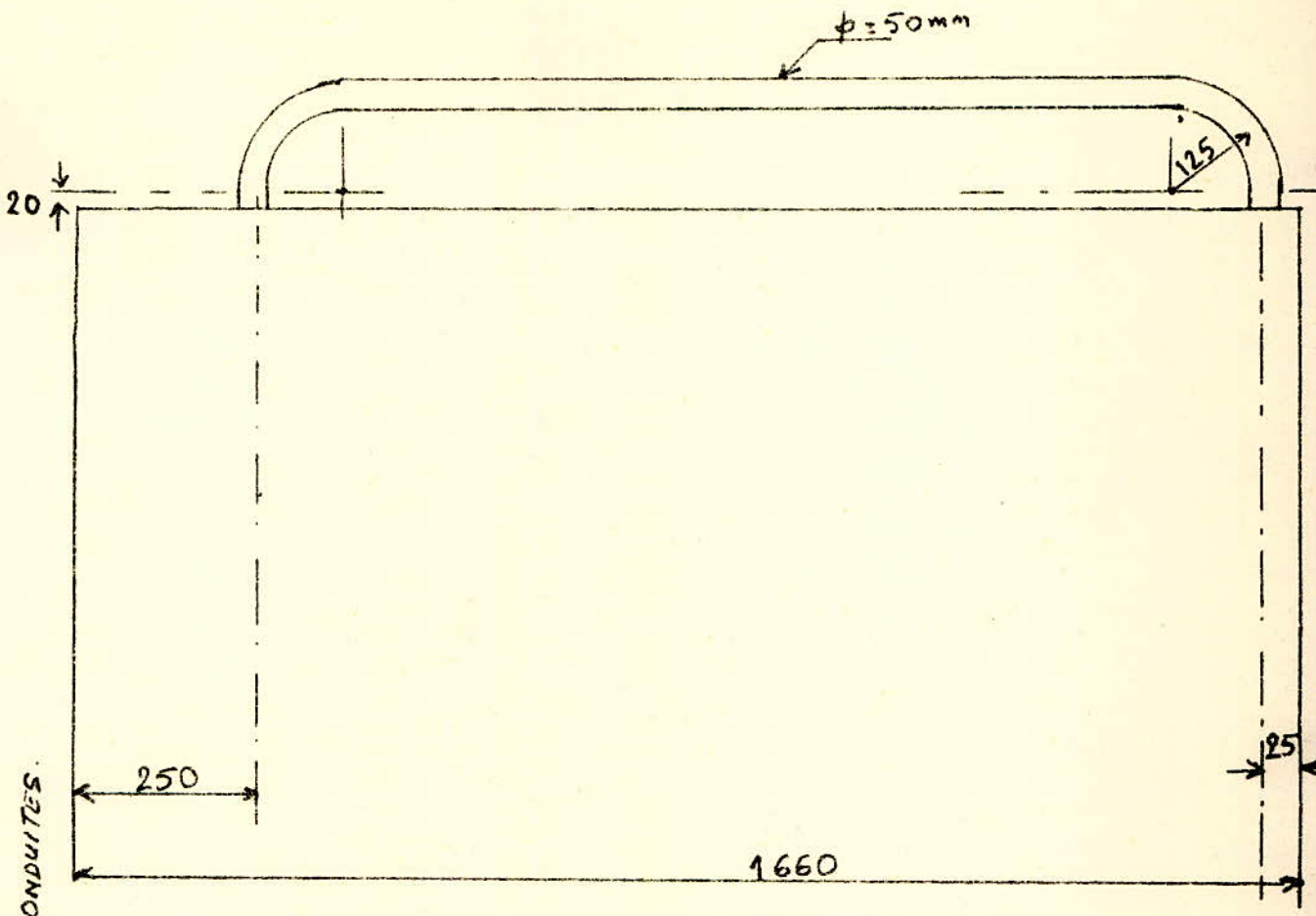
Somme des pertes : $P = 21,12 + 6,93 = 28,05 \text{ KW}$

Pour une température $\theta = 50^\circ\text{C}$, on aura : $q_c = 55,38 \text{ W/m}^2\text{C}$
Pour une cuve lisse, la valeur admissible est de $13,4 \text{ W/m}^2\text{C}$.
Pour avoir une charge thermique spécifique dans les normes, doit munir la cuve de tubes de telle façon qu'elle ait un coefficient de dissipation de la chaleur de 10 à $12,5 \text{ W/m}^2\text{C}$

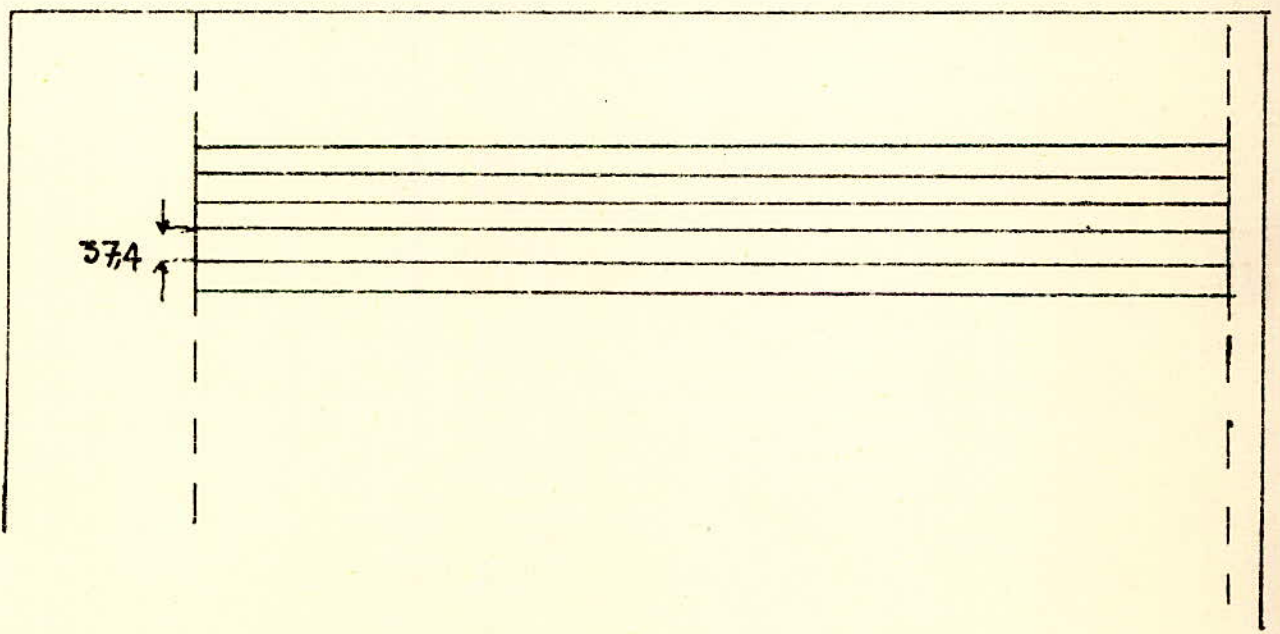
En adoptant la température $\theta_{to} = 50^\circ\text{C}$: $q_c = 50 (10 \text{ à } 12,5) \text{ W/m}^2$

- Dimension des conduites :

On utilisera des conduites en acier de 50 mm de diamètre et de 3 mm d'épaisseur.



DIMENSIONS des CONDUITES.



- hauteur extérieur d'une conduite :

- 48 -

$$H_{\text{ex}} = c - d_1 - d_2/2 = 136 \text{ cm}$$

- Section de convection d'une conduite :

La section d'une conduite est divisée en trois parties :

$$S_1 = 2\pi \cdot 2,5(136 - 25) = 1743,58 \text{ cm}^2$$

$$S_2 = 2\pi \cdot 2,5 \cdot \pi \cdot 2,5 = 616,85 \text{ cm}^2$$

$$S_3 = 2 \cdot 2\pi \cdot 2,5 \cdot 2 + 2,83 \text{ cm}^2$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = 2423,26 \text{ cm}^2$$

La section de convection d'une conduite est d'environ $0,242\text{m}^2$.
Si on fixe les pertes évacuées par unité de surface et par degré à $11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$, on doit avoir k conduites. Soit :

$$28,05 / (S_0 + k \cdot S) = 11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

$$28050 / 50(10,13 + 0,242k) = 11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

Soit : $k = 169$ conduites.

Ces 169 conduites ont une capacité d'huile de :

$$C = 169 \cdot \pi \cdot 2,5(136 - 25 + \pi \cdot 2,5 + 4) = 511,915 \text{ cm}^3$$

$$C = 511,915 \text{ dm}^3$$

- Masse d'huile :

$$0,89 \cdot 511,915 = 455,6 \text{ Kg}$$

- Poids des conduites :

$$V_c = 169 \pi \cdot 2,5(136 - 25 + \pi \cdot 2,5 + 4) \times 0,3 = 122859 \text{ cm}^3$$

$$P_c = 7,8 \cdot 10^{-3} \cdot V_c = 958 \text{ Kg.}$$

4) CALCUL DES ECHEUFFEMENTS /:

Dans les transformateurs à huile, la chaleur doit être essentiellement emportée par le courant d'huile et cédée aux parois de la cuve. Une partie infime arrive directement par conduction à ces parois.

Par l'effet de l'échauffement de l'huile dû aux matériaux actifs et de son refroidissement, le long des parois se établit une circulation naturelle de l'huile.
Toute la quantité de chaleur est emportée à travers la surface de la cuve sans que les températures des enroulements, du fer et de l'huile ne dépassent les valeurs fixées par les normes (la dissipation de la chaleur à travers la cuve se fait par rayonnement et par convection naturelle).

4.1) Échauffement des enroulements :

- 49 -

a) Enroulement BT :

Calculons la surface latérale compte tenu des écarteurs pour **une** bobine :

$$S_{b0} = 2 \cdot h_1 \cdot (h_{b0} + a_1) = 817,1 \text{ cm}^2.$$

pour 35 bobines :

$$35 \cdot S_{b0} = 28.598,6 \text{ cm}^2.$$

Surface latérale des 12 écarteurs entre 2 bobines :

$$12 (2 \cdot a_1 \cdot e) = 12 \cdot 2 \cdot 2,77 \cdot 0,6 = 51,18 \text{ cm}^2.$$

Surface de tous les écarteurs radiaux :

$$34 \cdot 51,18 = 1.808 \text{ cm}^2.$$

Surface des supports écarteurs :

$$S_{sc} = 12 (H_B - 34 \cdot 0,4) \cdot 0,6 = 292 \text{ cm}^2.$$

Surface en contact avec l'huile :

$$S_{hBT} = 28.598 - 1.808 - 292 = 26498 \text{ cm}^2.$$

Flux thermique :

$$q_1 = \frac{P_{cu1}}{S_{hBT}} = \frac{8584}{3.265} = 1055 \text{ W/m}^2.$$

ΔE_{moy} : l'échauffement moyen de la bobine

k : coefficient de transmission

$$\Delta E_{moy} = \frac{q}{k}$$

$$\text{avec } k = \frac{\lambda_{is} \cdot \gamma_{ks}}{\lambda_{is} + \frac{\delta}{2} \gamma_{ks}}$$

λ_{is} : conductivité thermique de l'isolation du fil

γ_{ks} : coefficient de transmission totale entre l'enroulement et le milieu de refroidissement.

δ : épaisseur totale de l'isolation.

Pour les bobines refroidies à l'huile $\lambda_{is} = 0,15 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$.

$$\alpha_{ks} = \alpha_s + \alpha_{kh}$$

α_s : coefficient de rayonnement

α_{kh} : coefficient de convection de l'huile

$$\alpha_{kh} = 40,3 \sqrt{\frac{\Delta\theta}{HB}}$$

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

$$k = \frac{0,15 \cdot 90}{0,15 + \frac{1,04 \cdot 10^{-3} \cdot 90}{2}} = 68,6$$

d'où : $\Delta\theta_{\text{air}} = 15,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta\theta_{\text{air}} = \Delta\theta_{\text{huile}} + \Delta\theta_h$$

$\Delta\theta_h$: élévation de température de l'huile par rapport à l'air ambiant.

$\Delta\theta_{\text{air}}$: élévation de température de la zone la plus chaude de l'enroulement par rapport à l'air ambiant.

$$\Delta\theta_{\text{air}} = 15,4 + 50 = 65,4 \text{ } ^\circ\text{C} < 70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

b) L'enroulement HT :

La bobine T comporte un canal axial de refroidissement, la surface en contact avec l'huile S_{h-HT} est :

Surface latérale totale de demi-bobines :

$$S_{\text{lat}} = 4 \cdot l_w \cdot B = 4 \cdot 145,96 \cdot 54,23 = 31661 \text{ cm}^2.$$

Surface occupée par les 12 écarteurs de 6/12 mm :

$$S_{\text{ec}} = 2 (1,2 \cdot 54,23 \cdot 12) = 1562 \text{ cm}^2.$$

Donc :

$$S_{h-HT} = S_{\text{lat}} - S_{\text{ec}} = 3 \text{ m}^2.$$

Le flux thermique est alors :

$$q_2 = \frac{P_{\text{cu}2}}{S_{h-HT}} = \frac{11317}{3,3} = 1257 \text{ W/m}^2.$$

- L'échauffement moyen de la bobine ($k_1 = k_2$)

$$\Delta\theta_{med} = \frac{q_2}{k_2} = 18,3^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{enr} = 18,3 + 50 = 68,3^\circ\text{C} < 70^\circ\text{C}$$

4.2) Echauffement du fer :

La chaleur qui se dégage dans le transformateur peut être transférée dans trois directions possibles :

- Suivant l'axe du noyau le long des tôles,
- Dans le plan de section transversale du noyau le long du paquet de tôles,
- Dans le même plan à travers le paquet de tôles.

Les différences de températures dans les deux premiers cas ne sont prises en considération à cause de la grande conductibilité de l'acier,

Dans le troisième cas, le flux thermique rencontre sur son chemin l'isolation entre les tôles dont la conductibilité thermique est faible comparée à celle de l'acier.

Soient :

$$\Delta\theta_{tot} = \frac{P_{fe} / k_1 \cdot \frac{2}{8}}{\lambda}$$

Est une totale de température de la zone la plus chaude à la surface de refroidissement.

$$\Delta\theta_e = \frac{P_{fe} / k_2}{\alpha_{ks} \cdot \frac{2}{8}}$$

Est une de température de la surface de refroidissement au milieu de refroidissement.

$$\Delta\theta = \theta_{tot} + \Delta\theta_e$$

Différence entre la température moyenne de la zone la plus chaude à celle du milieu de refroidissement.

Lorsque la transmission de la chaleur a lieu par convection et en admettant $\Delta\theta_c = 20^\circ\text{C}$:

$$\alpha_{kh} = 40,3 \sqrt[4]{\frac{20}{0,7}} = 95,3 ; \alpha_{ks} = 100$$

Alors : $\Delta T_c = \frac{3,16 \cdot 7,55 \cdot 10^3 \cdot 0,132}{100 \cdot 8} = 16^\circ\text{C}$

-52 -

Pour le cas où la transmission de chaleur s'effectue par conduction :

$$\Delta T_{\text{con}} = \frac{3,16 \cdot 7,55 \cdot 10^3 \cdot 0,132}{25 \cdot 8} = 2,1^\circ\text{C}$$

D'où $\Delta T = 16 + 2,1 = 18,1^\circ\text{C}$.

La température du fer par rapport à l'air ambiant est

de : $18,1 + 50 = 68,1^\circ\text{C} < 75^\circ\text{C}$.

.../...

Le passage d'état permanent à un autre même très court peut être accompagné d'effets importants et dangereux pour le transformateur tels que : apparition de très grandes contraintes mécaniques entre les enroulements ; répartition très inégale de la tension entre différentes parties des enroulements ou même entre spires ; surcharge brusque ; etc ...

- Courant de court-circuit brusque.

Lors d'un C-C brusque d'un transformateur, le courant de marche à vide peut être négligé. Le schéma équivalent du transformateur est un circuit électrique à résistance totale $r_{cc} = r_1 + r'_2$ et une inductance totale $x_{cc} = x_1 + x'_2 = \omega L_{cc}$ où L_{cc} est l'inductance de dispersion du transformateur. Comme les flux de dispersion se répartissent dans un milieu non magnétique L_{cc} sera constante.

L'équation de la f.e.m. en C-C s'écrit :

$$U_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_{cc}) = r_{cc} i_{cc} + L_{cc} \frac{di_{cc}}{dt}$$

En admettant $\psi_{cc} = \arctan \frac{x_{cc}}{r_{cc}} \approx 90^\circ$, on a en résolvant l'équation :

$$i_{cc} = i_{ccp} + i_{ccd} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_{cc}^2 + (\omega L_{cc})^2}} \cos(\omega t + \psi_{cc}) + \frac{U_{1m} \cos \psi_{cc} e^{-\frac{r_{cc}}{L_{cc}} t}}{\sqrt{\frac{r_{cc}^2}{L_{cc}^2} + (\omega L_{cc})^2}}$$

$$i_{cc} = I_{cc} \sqrt{2} \cos(\omega t + \psi_{cc}) + I_{cc} \sqrt{2} \cos \psi_{cc} e^{-\frac{r_{cc}}{L_{cc}} t}$$

$I_{cc} \sqrt{2}$: amplitude du courant permanent de C-C

i_{ccp} et i_{ccd} : valeurs instantanées des courants permanent et libre de C-C.

Lorsque $U_1 = 0$ ($\psi_{cc} = 0$), le C-C est le plus défavorable.

$$i_{cc}(\psi_{cc} = 0) = - I_{cc} \sqrt{2} \cos \omega t + I_{cc} \sqrt{2} e^{-\frac{r_{cc}}{L_{cc}} t}$$

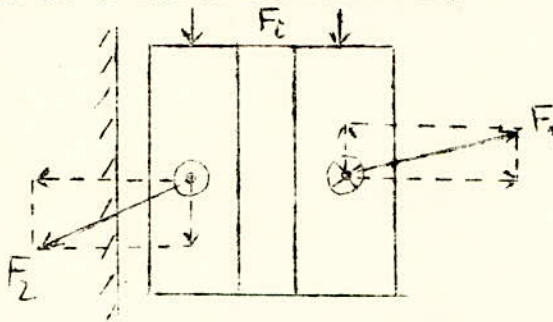
Si le C-C a lieu à tension nominale on a $I_{cc} \sqrt{2} = 100 \sqrt{2} \cdot I_n / u_{cc}$

Dans le cas limite où le coefficient d'amortissement r_{cc}/L_{cc} est nul, le courant ne s'amortit pas et au bout d'une demi-période après l'instant de C-C, l'amplitude i_{mcc} du courant de court-circuit,

$$i_{cm} / I_{cc} \sqrt{2} = k_{cc} = 2$$

Efforts mécaniques

Entre les conducteurs le courant circule en sens inverse lors d'un court-circuit. Des efforts mécaniques $F_1 = - F_2$ apparaissent qu'on décompose en composantes radiales qui tendent à écarter l'enroulement extérieur et à comprimer l'enroulement intérieur; et en composantes axiales qui tendent à déplacer les enroulements dans le sens axial. En plus de ces composantes qui s'exercent entre spires de même enroulement agissent les efforts F_1 qui tendent à comprimer l'enroulement dans le sens de la hauteur.



Pour calculer ces efforts mécaniques nous partirons de l'énergie électromagnétique des enroulements qui correspond au flux de dispersion.

On déterminera seulement les forces radiales étant donné que l'effort axial et F_1 sont très petits pour une construction symétrique.

L'expression de la force radiale s'exerçant sur un enroulement est:

$$F_x = \frac{1}{2} i_{cc}^2 \frac{\partial L_{cc}}{\partial x}$$

$$L_{cc} = L_{\sigma_1} + L_{\sigma_2} = \mu_0 \frac{w_2^2 l_{w2}}{l_{\sigma}} \left(\frac{a_2}{3} + \frac{a_{12}}{2} \right) + \mu_0 \frac{w_1^2 l_{w1}}{l_{\sigma}} \left(\frac{a_1}{3} + \frac{a_{22}}{2} \right)$$

Soit 1 sp. moy. = $\frac{l_{w1} + l_{w2}}{2}$

$$L_{cc} = \mu_0 w_2^2 (1 \text{ sp. moy. } a_r / l_{\sigma}) \quad l_{\sigma} = H_B / K_r = H_B / K_r$$

$$\frac{\partial L_{cc}}{\partial x} = \frac{\partial L_{cc}}{\partial a_r} = \mu_0 w_2^2 1 \text{ sp. moy. } / l_{\sigma} = \mu_0 w_2^2 1 \text{ sp. moy. } K_r / H_B$$

$$\text{Et } F_x = \frac{1}{2} (i_{cc} w_2)^2 1 \text{ sp. moy. } K_r / H_B$$

$$i_{cc} = i_{ccn} = 2 I_{cc} \sqrt{2} = 2.100 \sqrt{2} I_n / u_{cc}$$

$$= 2.100 \sqrt{2} . 17,14 / 6,63 = 731,24$$

Kr : Coefficient de réduction de la hauteur de l'enroulement à la longueur théorique des lignes de champ de dispersion.

$$F_x = 2II.L_0^{-7} \cdot (131,2; 1738)^2 \cdot 127,7 \cdot 0,96 / 54,23 = 2,27 \cdot 10^6 \text{ N}$$

L'effort de rupture par unité de surface est :

$$F_r = F_x / 2II.W.S_w$$

Pour la basse tension :

$$F_{r.BT} = \frac{2,27 \cdot 10^6 / 10}{2II.172.43,1} = 4,87 \text{ Kgf/mm}^2$$

Pour la haute tension :

$$F_{r.HT} = \frac{2,27 \cdot 10^6 / 10}{2II.1738.4,48} = 4,64 \text{ Kgf/mm}^2$$

L'effort admissible de rupture est de 5 à 6 Kgf/mm².

6) - CONSERVATEUR D'HUILE.

Pour déterminer le volume d'huile nécessaire au refroidissement, on soustrait du volume de la cuve la masse décuvable qui est approximativement égale à :

$$\begin{aligned} M_{dec} &= 1,2 (m_{cu} + m_{fe}) \\ &= 1,2 (3.69,58 + 3.106,2 + 807 + 1277,5) = 3134 \text{ Kg} \end{aligned}$$

- Volume décuvable :

$$V_{dec} = M_{dec} / \gamma_{dec} \quad \gamma_{dec} = 5,5 \text{ à } 6 \text{ Kg/dm}^3$$

$$V_{dec} = 3134 / 5,5 = 569,8 \text{ dm}^3$$

- Volume de la cuve :

$$V_c = (II.3,6^2 + 7,2(203 - 7,2) \cdot 16,6 = 2241,3 \text{ dm}^3$$

- Volume d'huile :

$$\begin{aligned} V_h &= V_c - V_{dec} \\ &= 2241,3 - 569,8 = 1671,5 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

- Poids de l'huile :

$$M_n = n \cdot V_n = 0,89 \cdot 1671,5 = 1487,6 \text{ Kg.}$$

- Longueur du conservateur,

l_{cons} largeur de la cuve

$$l_{\text{cons}} = 70 \text{ cm}$$

- Volume du conservateur:

$$V_{\text{cons}} = (0,07 \text{ à } 0,1) V_n$$

$$V_{\text{cons}} = 0,08 \cdot 1671,5 = 133,7 \text{ dm}^3$$

- Diamètre du conservateur

$$D_{\text{cons}} = (4V_{\text{cons}} / \pi \cdot l_{\text{cons}})^{1/2} = 49,2 \text{ cm.}$$

-- POIDS TOTAL du transformateur.

Le poids des accessoires tels que isolation, pièces de serrages et de fixation, ... est estimé à :

$$M_{\text{acc}} = 0,2 (m_{\text{cu}} + m_{\text{fe}})$$

- Poids de la cuve :

Le couvercle et le fond de la cuve sont construits en acier de 5mm d'épaisseur. Les parois latérales ont une épaisseur de 3 mm .

- Volume du couvercle et du fond de la cuve.

$$V_1 = 2 \cdot 0,5 (\pi \cdot 36 + (203-72) \cdot 72) = 9545 \text{ cm}^3$$

- Volume des parois latérales :

$$V_2 = 2 \cdot 0,3 (\pi \cdot 30 \cdot 166 + (203-72) \cdot 166) = 22434 \text{ cm}^3$$

- Masse de la cuve (sans conduites) :

$$M_{\text{cuve}} = 7,8 (9545 + 22434) = 250 \text{ Kg}$$

- Masse de la cuve avec conduites :

$$M_c = 250 + 958 = 1208 \text{ Kg.}$$

- Poids du conservateur :

Le conservateur est fait en acier de 3 mm d'épaisseur.

$$M_{\text{cons}} = \left((2 \cdot \frac{II.49,3^2}{4} + II.49,3 \cdot 70) \cdot 0,3 \cdot 7,8 \right)$$

$$M_{\text{cons}} = 34,3 \text{ Kg.}$$

- POIDS TOTAL du transformateur

$$P = M_{\text{cons}} + M_c + M_{\text{acc}} + M_n + M_{m.a.}$$

$$P = 34,3 + 1208 + 522 + 1487,6 + 455,6 + 2612$$

$$P = 6320 \text{ Kg.}$$

BIBLIOGRAPHIE.

- 1- M. KOSTENKO & L. PIOTROVSKI
Machines électriques : Tome 1 & 2
Edition de Moscou 1976
- 2- M. LIWCO ITZ
Calcul des machines électriques PARIS 1967-1970
- 3- N. I. BULGACOV
Calculul Transformatorilor.
Edition Technica. Bucaresti : 1951