

20/75

UNIVERSITÉ D'ALGER

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

1ed

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
 DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ
 ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

Transformateur de Puissance:

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
 6000 / 380 v.
 400 kVA. UNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

1975

Proposé par:
M. V. STIRBU.

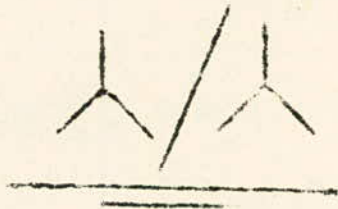
Étudié par:
A. OU ARABI

C A L C U L D ' U N

TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE :

4 0 0 K V A .

6000 / 380 V .



II) mes parents,
tous mes professeurs, en
particulier M. STIRBU Vasile,
tous mes amis et collègues;
je dédie ce modeste essai.

-----oO(*)Oo-----

T A B L E D E S M A T I E R E S

-----oOo-----oOo-----

PREMIERE PARTIE :-

CHAPITRE	I :-	Principales définitions	1.
"	2 :-	Conditions physiques de fonctionnement des transformateurs	6.
"	3 :-	Mode de couplage des enroulements	15.
"	4 :-	Marche à vide d'un transformateur triphasé	19.
"	5 :-	Régime de court-circuit dans les trans- formateurs	21.
"	6 :-	Fonctionnement des transformateurs en charge	24.
"	7 :-	Echauffement - Refroidissement des trans- formateurs	28.

DEUXIEME PARTIE :-

CHAPITRE	I :-	Section du noyau - Culasse	32
"	2 :-	Calcul des enroulements HT et BT	34
"	3 :-	Courant à vide	40
"	4 :-	Calcul thermique des enroulements	41
"	5 :-	Forces mécaniques ; forces radiales, axiales.	43
"	6 :-	Rendement - Caractéristique externe	45
"	7 :-	Dimension , calcul de la cuve	47
"	8 :-	Conservateur : Poids et volume d'huile	48
"	9 :-	Résistance mécanique de la cuve ; Poids du transformateur	50

INTRODUCTION .

De 1905 à 1940 la consommation d'énergie dans les pays industriels doublait environ tous les huit à dix ans. Pour cette raison les puissances des usines, celles des groupes installés, y compris les transformateurs, augmentaient.

1939 : on a construit un transformateur triphasé à cinq colonnes de 100 000 KVA.

1936 : un transformateur de 3 X 65 000 KVA à refroidissement normal par soufflage d'air, et de 3 X 80 000 KVA à refroidissement forcé. Dans la centrale hydroélectrique de Lenine on trouve des groupes de transformateurs de : 3 X 123 500 KVA chacun.

La tension qui était de 110 KV en 1907 passe à 220KV en 1921, à 287,5 KV en 1937 et à 400 KV en 1952.

La construction et l'utilisation de puissants transformateurs pose de gros problèmes dont :

- élévation du rendement
- refroidissement
- protection contre les surtensions.

Le but du projet est l'essai de la résolution de ces différents problèmes et en particulier le calcul des différentes dimensions nécessaires à la construction du transformateur proposé.

oooooooo0oooooooo

- CHAPITRE I -

I - PRINCIPALES DEFINITIONS.

Un transformateur est un appareil électromagnétique statique destiné à transformer un réseau alternatif donné en un autre, de même fréquence, avec en général des caractéristiques différentes en particulier un autre courant une autre tension.

Le transformateur se compose essentiellement :

- 1°)- D'un circuit magnétique réalisé par empilage et enchevêtrement de tôles magnétiques isolées entre-elles. (noyau)
- 2°)- Un enroulement dit primaire qui reçoit l'énergie du réseau d'alimentation.
- 3°)- Un enroulement dit secondaire qui restitue l'énergie électrique au réseau qu'il alimente.

Pour prévenir les effets de l'air sur l'isolement et améliorer le refroidissement du transformateur, on place son noyau avec les enroulements dans une cuve remplie d'huile. Ce sont des transformateurs dans l'huile.

Si la tension primaire est supérieure à la tension secondaire, le transformateur est dit abaisseur ou réducteur. Si au contraire la tension primaire est inférieure à celle du secondaire, le transformateur est dit élévateur.

GRANDEURS NOMINALES :

Elles caractérisent le régime nominal de fonctionnement du transformateur. Ce sont en général des grandeurs indiquées sur la plaque signalétique.

On appelle puissance nominale, la puissance obtenue au secondaire et qui s'exprime en KVA.

La tension secondaire nominale est celle obtenue au secondaire quand le transformateur fonctionne à vide.

Les courants nominaux sont aussi indiqués sur la plaque, ils se calculent à l'aide des valeurs correspondantes de la puissance nominale et tension nominale.

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n}$$

II - PRINCIPAUX TYPES DE TRANSFORMATEURS.

Les types de transformateurs les plus importants sont :

- 1) Transformateur de puissance (transport et distribution).
- 2) Les auto-transformateurs.
- 3) Les transformateurs pour l'alimentation des groupes convertisseurs statiques.
- 4) Les transformateurs d'essai (essai en H.T)
- 5) Les transformateurs de puissance spéciaux (alimentation des fours,...)
- 6) Les transformateurs de mesure.
- 7) Les transformateurs utilisés en radio-technique.

III - PRINCIPAUX ELEMENTS DE TRANSFORMATEURS.

Tout transformateur se compose essentiellement du noyau, de l'enroulement, de la cuve avec l'huile et des isolateurs de sortie.

A) NOYAU.

C'est l'ensemble formant le circuit magnétique avec tous les éléments faisant partie de cet ensemble. suivant le type du noyau on a deux types de transformateurs, transformateurs à colonnes et les transformateurs cuirassés.

Le noyau est en tôles d'acier spécial de 0,35 ou de 0,5 mm d'épaisseur. Pour $S > 100$ kVA on utilise 0,5 mm.

Pour isoler les tôles on utilise du papier de 0,03 mm d'épaisseur et le vernis à l'huile.

B) ENROULEMENTS.

Ils doivent satisfaire à plusieurs conditions :

- a) L'enroulement doit être économique.
- b) Le régime thermique doit correspondre aux exigences de la norme.
- c) L'enroulement doit résister aux contraintes lors d'un court-circuit brusque.
- d) Il doit présenter la rigidité d'électrique nécessaire pour supporter les surtensions.

Selon la disposition de la H T par rapport à la B T on distingue :

- a) Les enroulements concentriques.
- b) Les enroulements alternes.

Dans a) on distingue :

- enroulement cylindrique en couches
- enroulement en hélice et ses variantes
- enroulement continu.

C - CUVE DU TRANSFORMATEUR DANS L'HUILE.

Pour les transformateurs à l'huile la partie active (noyau + enroulements) est plongée dans une cuve remplie d'huile. En s'échauffant, l'huile circule à l'intérieur de la cuve et assure le refroidissement naturel du transformateur.

On distingue deux sortes de Cuves :

-Cuves lisses pour transformateurs de faible puissance ($S < 30$ KVA).

-Cuves à tubes pour transformateurs de puissance plus élevée jusqu'à 3000 KVA.

Pour les transformateurs jusqu'à 10.000 KVA on a des réfrigérants radiateurs à refroidissement naturel adaptés aux parois de la cuve. Pour $S > 10.000$ KVA les radiateurs sont soufflés.

D - COVERCLE DE CUVE ET SORTIES.

Sur le couvercle sont placés :

-Les isolateurs de sorties H.T et B.T

-Le conservateur d'huile

-Le tube d'évacuation des gaz
(pour transformateur à $S > 1000$ KVA)

-Entre le conservateur et la cuve on installe un relais BUCHHOLZ qui signale tout accident dans le transformateur ou sépare le transformateur du réseau en cas d'avarie.

Le tube d'échappement est destiné à protéger la cuve contre les dégats possibles en cas de court-circuit et par suite de la formation des gaz dans la cuve et de l'accroissement brusque de la pression.

E - HUILE DE TRANSFORMATEUR.

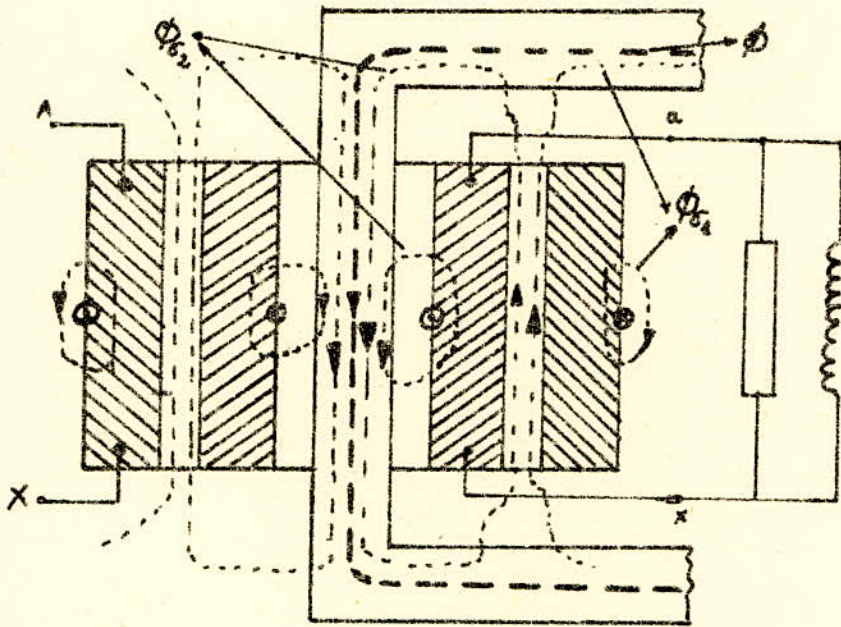
Afin d'améliorer l'isolement et le refroidissement de la partie active du transformateur, cette dernière est placée dans la cuve remplie d'huile minérale pour transformateurs. Cette huile a plusieurs propriétés :

- Rigidité dielectrique 20 à 35 KV/mm.
- Capacité calorifique 1790 à 1870W/Kg°degré.
- Coefficient de dilatation volumique 0,069 % par 4 °C.

Malgré ces propriétés utiles l'huile a deux défauts principaux :

- 1). Inflammable 135 °C.
- 2) Sa vapeur forme avec l'air un mélange explosif dans certaines conditions.

On utilise en RUSSIE le SOVTOL et aux U.S.A le PYRANOL en remplacement de cet huile quand on n'utilise pas les transformateurs à secs. Même propriétés pratiquement mais chimiquement restent stables. (coûtent cher).



SCHEMA DE PRINCIPE D'UN TRANSFORMATEUR EN CHARGE.

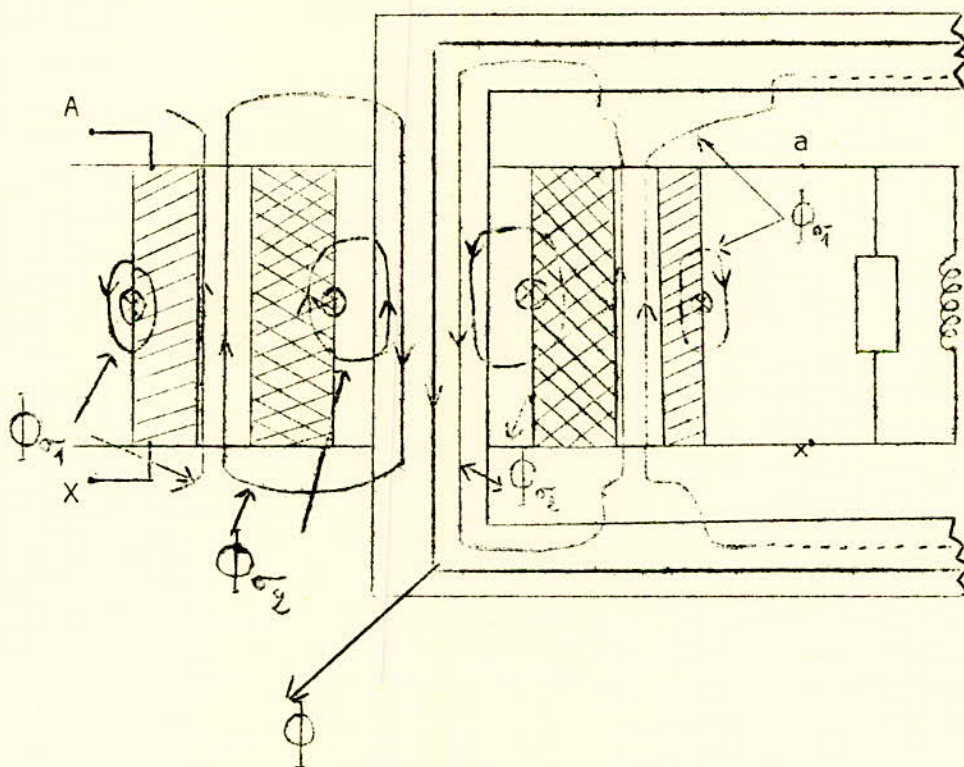
- CHAPITRE II -

CONDITIONS PHYSIQUES DE FONCTIONNEMENT
DES TRANSFORMATEURS

I - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.

Il est basé sur l'interaction électromagnétique de deux ou de plusieurs circuits immobiles l'un par rapport à l'autre.

Considérons la fig. 1 qui représente le schéma de principe d'un transformateur monophasé. (le principe est le même pour un triphasé).



(fig. 1)

Si aux bornes A, X de l'enroulement primaire on applique une tension sinusoidale provenant d'un réseau de courant alternatif, sous l'action du flux reliant les deux enroulements, il apparait dans le secondaire un courant qui alimente les récepteurs branchés aux bornes a, x. C'est ainsi que se réalise le transfert d'énergie du primaire au secondaire. Pour que ce transfert ait lieu, il faut calculer et réaliser convenablement les enroulements.

II - EQUATIONS DES F.M.M ET F.E.M.

Soit U_1 la valeur instantanée de la tension appliquée aux bornes A, X.

Dans les enroulements il apparait deux courants de valeurs instantanées i_1 et i_2 . Ces courants engendrent 2 F.M.M : $i_1 n_1$ et $i_2 n_2$.

La deuxième loi de KIRCHHOFF appliquée aux circuits magnétiques est :

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = n_1 i_0 \quad (1)$$

$$n_1 i_1 = - n_2 i_2 + n_1 i_0 \quad (2)$$

$n_1 i_0$ composante magnétisante nécessaire pour créer dans le noyau, un flux de valeur instantanée ϕ_t . C'est le flux principal embrassé par toutes les Spires primaires et secondaires.

Ce flux crée dans le primaire une F.E.M e_1 et e_2 dans le secondaire.

$$e_1 = - \frac{n_1 d\phi_t}{dt} = - \frac{d\psi_{10}}{dt} \quad (3) \text{ et } e_2 = - \frac{n_2 d\phi_t}{dt} = - \frac{d\psi_{20}}{dt} \quad (4)$$

En outre les F.M.M $n_1 i_1$ et $n_2 i_2$ créent respectivement les flux de dispersion ϕ_{σ_1} et ϕ_{σ_2} . Ces flux sont produits par i_1 et i_2 et embrassent seulement les spires correspondantes. Vu que ces flux se répartissent dans un milieu non magnétique et à perméabilité magnétique constante, on peut admettre que les inductances de dispersion L_{σ_1} et L_{σ_2} sont constantes.

Comme le flux principal crée des F.E.M e_1 et e_2 les flux de dispersion créent aussi des F.E.M e_{σ_1} et e_{σ_2} avec :

$$e_{\sigma_1} = - L_{\sigma_1} \frac{d i_1}{dt} \quad (5)$$

et

$$e_{\sigma_2} = - L_{\sigma_2} \frac{d i_2}{dt} \quad (6)$$

La deuxième de KIRCHHOFF appliquée au primaire donne :

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma_1} = i_1 r_1 \quad (7)$$

avec r_1 résistance de l'enroulement primaire.

On peut écrire l'équation sous forme :

$$u_1 = - \left[e_1 + e_{\sigma_1} + (-i_1 r_1) \right] \quad (8)$$

En remplaçant e_1 et e_{σ_1} on trouve :

$$u_1 = \frac{d \psi_{10}}{dt} + L_{\sigma_1} \frac{d i_1}{dt} + i_1 r_1 = \boxed{\frac{d \psi_1}{dt} + i_1 r_1 = u_1} \quad (9)$$

ψ_1 représente l'encerclement de flux total de l'enroulement primaire créée par ϕ_k et ϕ_{σ_1} .

Dans le secondaire on a :

$$e_2 + e_{\sigma_2} + (-i_2 r_2) = u_2 \quad (10)$$

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

$$\boxed{0 = \frac{d \psi_{20}}{dt} + i_2 r_2 + u_2} \quad (11)$$

ψ_2 encerclement du flux total du secondaire crée par ϕ_t et ϕ_{σ_2} .

Si on peut négliger les pertes fer et admettre que la perméabilité magnétique du fer est constante on peut écrire :

et

$$\psi_1 = L_1 i_1 + M_{12} i_2$$

$$\psi_2 = L_2 i_2 + M_{21} i_1$$

L_1 ; L_2 : inductances totales du primaire et du secondaire et correspondent au flux total à travers l'enroulement considéré.

$M_{12} = M_{21} = M$ inductances mutuelles des enroulements.

En introduisant les valeurs de ψ_1 et ψ_2 dans (9) et dans (11) on obtient :

$$\boxed{\begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{d i_1}{dt} + M \frac{d i_2}{dt} + i_1 r_1 \\ 0 &= L_2 \frac{d i_2}{dt} + M \frac{d i_1}{dt} + i_2 r_2 + u_2 \end{aligned}} \quad (12)$$

.../...

Dans le cas où les tensions, les F.E.M et les courants sont des fonctions sinusoidales du temps, on peut représenter les valeurs efficaces de ces fonctions par des valeurs complexes :

\dot{U} ; \dot{E} ; et \dot{i} les équations (12) prendront alors la forme :

$$\begin{aligned} \dot{U} &= j \omega L_1 \dot{i}_1 + j \omega M \dot{i}_2 + r_1 \dot{i}_1 \\ 0 &= j \omega L_2 \dot{i}_2 + j \omega M \dot{i}_1 + r_2 \dot{i}_2 + \dot{U}_2 \end{aligned} \quad (13)$$

III - RAPPORT DE TRANSFORMATION.

C'est le rapport des F.E.M induites, dans les enroulements primaire et secondaire, par le flux principal ϕ_t .

$$K = \frac{e_1}{e_2} = \frac{-n_1 \frac{d\phi_t}{dt}}{-n_2 \frac{d\phi}{dt}} = \frac{n_1}{n_2}$$

IV - TRANSFORMATEUR REDUIT.

Dans le cas général, l'enroulement primaire est différent de l'enroulement secondaire et ceci complique l'étude des phénomènes ayant lieu dans un transformateur. Pour parer ces difficultés, on réduit les deux enroulements à un même nombre de spires et généralement c'est l'enroulement secondaire qu'on réduit au primaire. Pour cela on remplace l'enroulement à n_2 spires par un enroulement réduit équivalent ayant même nombre de spires que le primaire : n_1 .

Toutes les grandeurs caractérisant le secondaire et rapportées au primaire sont dites réduites et sont désignées par des lettres primes des valeurs réelles :

$$E'_2 ; I'_2 ; r'_2 \dots$$

1) F.E.M réduite : E'_2

$$E'_2 = k E_2 = E_1 \quad k = n_1/n_2$$

La F.E.M de dispersion change dans le même rapport.

2) Courant I'_2

$$I'_2 = \frac{E_2}{E'_2} I_2 = \frac{I_2}{k}$$

3) Résistance R'_2

$$I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2' \quad \text{donc} \quad R_2' = k^2 R_2$$

4) Réactance inductive de dispersion x'_2

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

5) Impédance de l'enroulement secondaire Z'_2 et du circuit secondaire Z'_r

$$Z'_2 = k^2 Z_2$$

$$Z'_r = k^2 Z_r$$

V - EQUATIONS DES F.M.M ET DES F.E.M D'UN TRANSFORMATEUR REDUIT.

L'équation des F.M.M est :

$$\text{ou} \quad \dot{i}_1 n_1 + \dot{i}'_2 n_1 = \dot{i}_0 n_1$$

$$\dot{i}'_1 n_1 = -\dot{i}'_2 n_1 + \dot{i}_0 n_1$$

Divisons par n_1 :

$$\dot{i}'_1 + \dot{i}'_2 = \dot{i}_0 \longrightarrow \boxed{\dot{i}'_1 = -\dot{i}'_2 + \dot{i}_0} \quad (14)$$

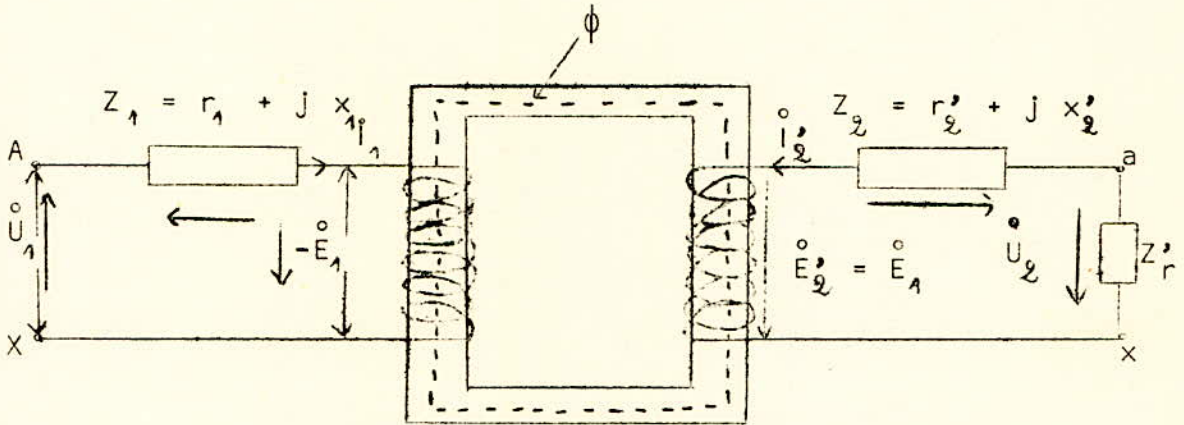
.../...

Equation des F.E.M.

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{U}_1 &= -\overset{\circ}{E}_1 + \overset{\circ}{i}_1 Z_1 - \overset{\circ}{E}'_2 - \overset{\circ}{i}'_2 Z'_2 = \overset{\circ}{U}'_2 \\ \boxed{\overset{\circ}{E}'_2 = E_1 = \overset{\circ}{i}'_2 Z'_2 + \overset{\circ}{U}'_2} & \quad (15) \end{aligned}$$

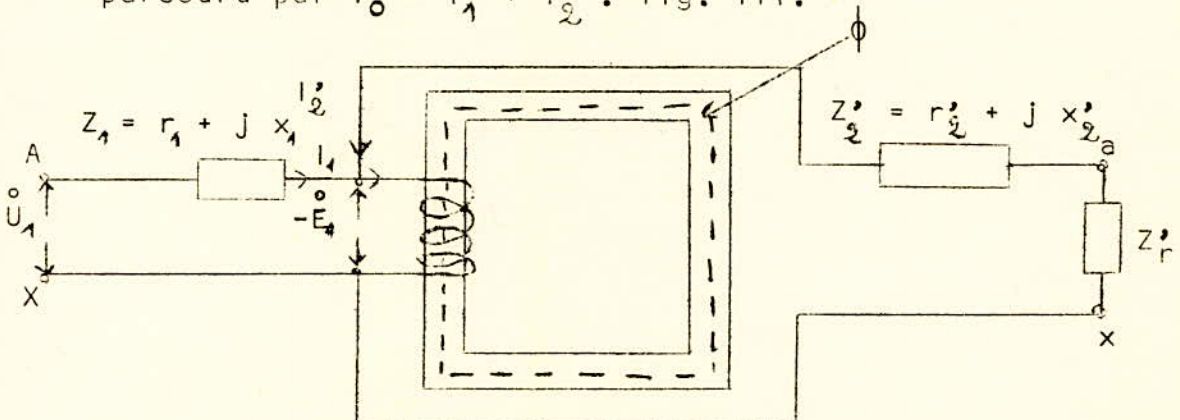
VI - SCHEMA EQUIVALENT D'UN TRANSFORMATEUR REDUIT.

Il existe différents schémas vérifiant les équations (14) et (15). Pour les transformateurs on utilise le schéma en T. Conformément aux équations ci-dessus le schéma équivalent est le suivant : fig. II.



(fig. II)

Comme dans un transformateur réduit $n_2 = n_1$ on peut faire coïncider les deux enroulements en un seul parcouru par $\overset{\circ}{i}_0 = \overset{\circ}{i}_1 + \overset{\circ}{i}'_2$. fig. III.



(fig. III)

.../...

Dans ce cas la relation entre $\overset{\circ}{-E}_1$ et $\overset{\circ}{i}_0$ peut s'exprimer sous forme :

$$\overset{\circ}{-E}_1 = \overset{\circ}{i}_0 Z_m = \overset{\circ}{i}_0 (r_m + jx_m)$$

$$-\frac{\overset{\circ}{E}_1}{Z_m} = \overset{\circ}{i}_0$$

Au secondaire on a :

$$\overset{\circ}{U}_2' = \overset{\circ}{i}_2' Z_R'$$

Or $\overset{\circ}{E}_2' = \overset{\circ}{E}_1 = \overset{\circ}{i}_2' Z_2' + \overset{\circ}{U}_2'$

$$\overset{\circ}{E}_2' = \overset{\circ}{i}_2' Z_2' + \overset{\circ}{i}_2' Z_R' = \overset{\circ}{i}_2' \left[Z_2' + Z_R' \right]$$

$$\overset{\circ}{i}_2' = \frac{\overset{\circ}{E}_2'}{Z_2' + Z_R'} = \frac{\overset{\circ}{E}_1}{Z_2' + Z_R'}$$

Comme $\overset{\circ}{i}_1 = -\overset{\circ}{i}_2' + \overset{\circ}{i}_0 \longrightarrow \overset{\circ}{i}_1 = \frac{-\overset{\circ}{E}_1}{Z_2' + Z_R'} + \frac{-\overset{\circ}{E}_1}{Z_m}$

$$\overset{\circ}{-E}_1 = \overset{\circ}{i}_1 \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_R' + Z_2'}}$$

Comme $\overset{\circ}{U}_1 = -\overset{\circ}{E}_1 + \overset{\circ}{i}_1 Z_1$ équation des F.E.M
paragraphe V en remplaçant $\overset{\circ}{E}_1$ on obtient :

$$\overset{\circ}{i}_1 = \overset{\circ}{U}_1 \frac{1}{Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_R' + Z_2'}}} = \frac{\overset{\circ}{U}_1}{Z_{ea}}$$

Fig. A.

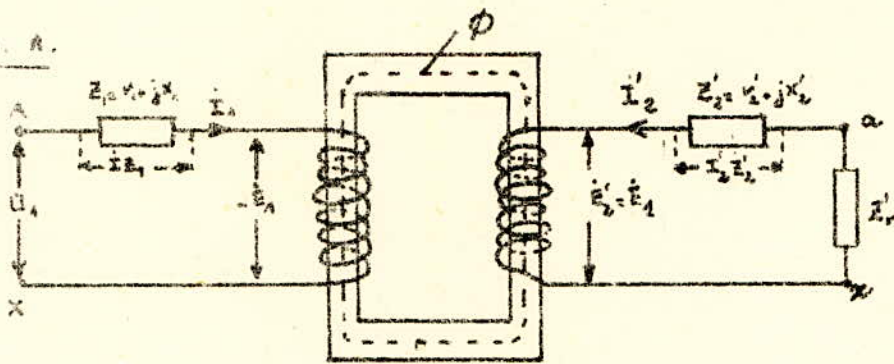
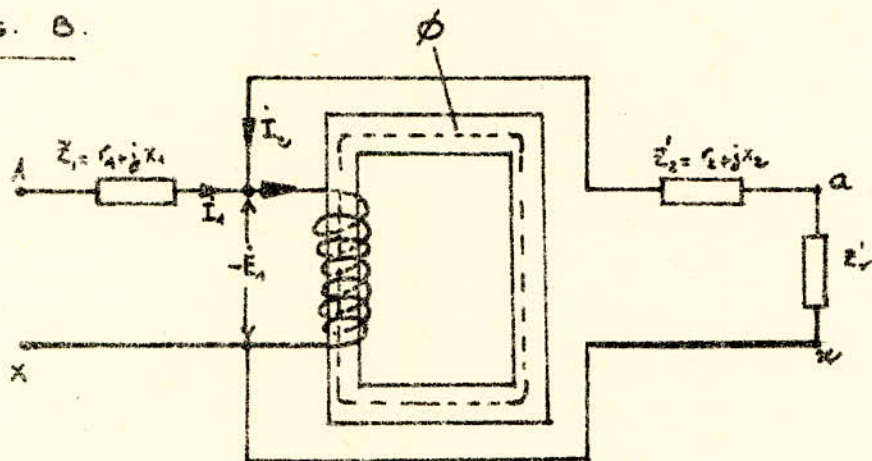
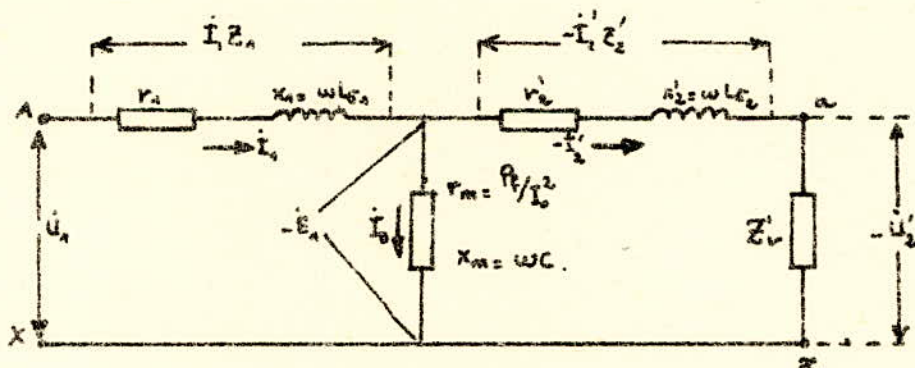


Fig. B.



SCHEMAS D'UN TRANSFORMATEUR RÉDUIT.



SCHEMA EQUIVALENT EN T D'UN TRANSFORMATEUR

$$Z_{eq} = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_2' + Z_R'}}$$

Impédance équivalente du schéma en T

fig. IV.

3 branches :

- 1) Primaire à impédance Z_1 et à $c^+ \cdot i_A$
- 2) Branche magnétisante à impédance Z_m et i_0
- 3) Branche secondaire à impédance $Z_2' + Z_R'$ et à $-i_2$

Les branches 2 et 3 sont en II.

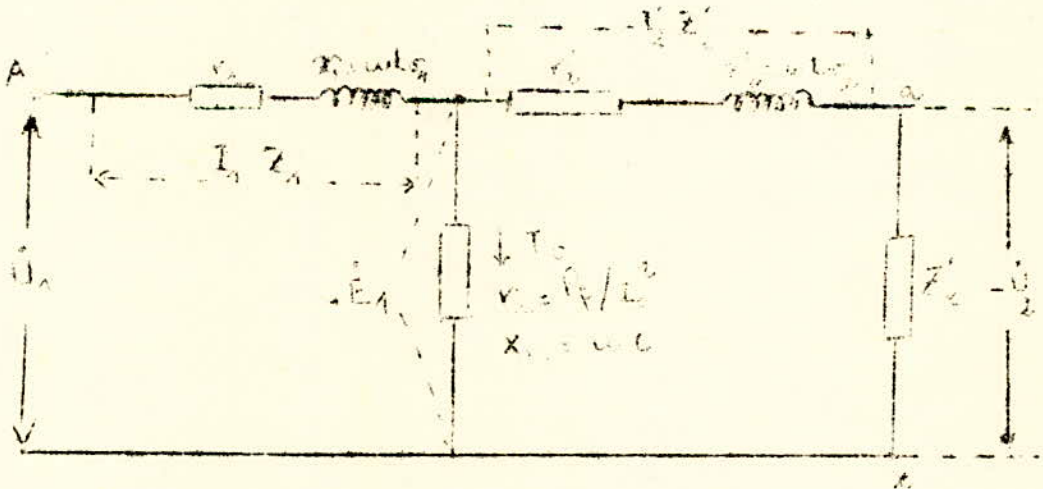


Fig IV

- CHAPITRE III -

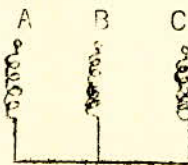
MODES DE COUPLAGE DES ENROULEMENTS
DES TRANSFORMATEURS TRIPHASES

Il existe trois modes de couplage des enroulements primaire et secondaire :

- a) Couplage étoile
- b) Triangle
- c) Zig-Zag.

On peut avoir aussi différentes combinaisons considérons le cas du couplage étoile-étoile.

Pour faire une telle connexion d'un enroulement, on réunit en un point neutre commun soit les 3 commencements soit les 3 fins des enroulements de phase.



Dans le cas général les F.F.M e_A , e_B et e_C ne sont pas sinusoïdales.

En supposant que seuls les harmoniques impairs soient présents et en admettant que la phase initiale $\psi = 0$ on a :

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

Pour B : $e_B = E_{m1} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{m3} \sin 3(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{m5} \sin 5(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \dots$

.../...

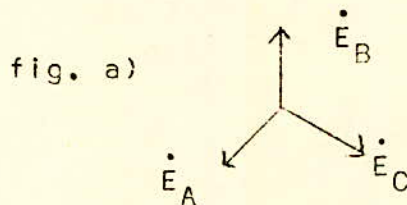
$$e_B = E_{m1} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{m3} \sin 3\omega t + E_{m5} \sin(5\omega t - \frac{4\pi}{3}) + E_{m7} \sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \dots$$

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

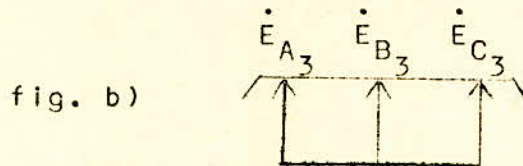
$$e_A = E_{m1} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + E_{m3} \sin 3\omega t + E_{m5} \sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) + E_{m7} \sin(7\omega t - \frac{4\pi}{3}) + \dots$$

Ces équations montrent que :

a) Les premiers harmoniques des F.E.M dans les phases A, B, C, forment une étoile symétrique à 3 branches avec l'ordre : E_{A1}, E_{B1}, E_{C1} fig. a.

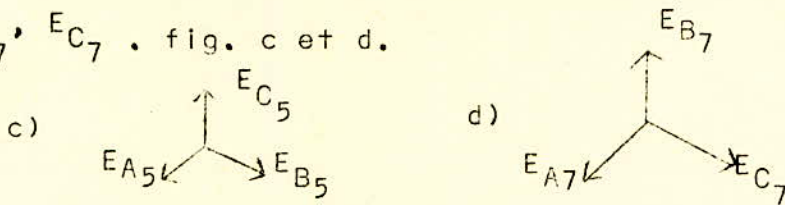


b) Les harmoniques d'ordre 3 et leurs multiples sont en phase (fig. b) et sont dirigés dans un enroulement de phase soit du début vers la fin soit inversement.

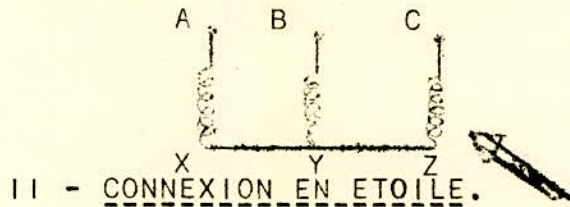


c) Le 5ème et le 7ème harmonique des F.E.M forment des étoiles symétriques à 3 branches. Le 5ème a un ordre de phases inverse au 1er E_{A5}, E_{C5}, E_{B5} .

Par contre le 7ème a le même ordre que le 1er E_{A7}, E_{B7}, E_{C7} . fig. c et d.



Dans le cas général les harmoniques d'ordre $3C+1$ (c pair) ont même ordre de phase que le 1er (c=0) et les harmoniques d'ordre $3C-1$ ont un ordre inverse.



En parcourant un des trois circuits formés par l'étoile, on change de sens en passant d'un enroulement à un autre. Dans ce cas on a :

$$e_{AB} = e_A - e_B$$

$$e_{BC} = e_B - e_C$$

$$e_{CA} = e_C - e_A$$

En introduisant les expressions de e_A, e_B, e_C dans e_{AB}, e_{BC}, e_{CA} et en développant on obtient :

$$e_{AB} = e_A - e_B = \sqrt{3}E_{m_1} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \sqrt{3}E_{m_5} \sin\left(5\omega t - \frac{\pi}{6}\right) + \sqrt{3}E_{m_7} \sin\left(7\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \dots$$

$$e_{BC} = e_B - e_C = \sqrt{3}E_{m_1} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{3}E_{m_5} \sin\left(5\omega t - \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{3}E_{m_7} \sin\left(7\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots$$

.../...

$$e_{C_A} = e_C - e_A = \sqrt{3}E_{m_1} \sin(\omega t - \frac{\pi}{6} - \frac{4\pi}{3}) + \sqrt{3}E_{m_5} \sin(5\omega t - \frac{\pi}{6} + \frac{4\pi}{3}) + \sqrt{3}E_{m_7} \sin(7\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{4\pi}{3}) + \dots$$

Il en résulte pour une connexion en étoile :

a) Les harmoniques multiples de 3 disparaissent dans la tension composée fig. a) (dans chacun des 2 circuits qui forment l'étoile, ces harmoniques sont opposés).

b) Les tensions composées de tous les harmoniques d'ordre $3c+1$ représentent des systèmes triphasés symétriques des tensions directes et à $\psi = +\frac{\pi}{6}$ (fig. b et d) et ceux de $3c-1$, des systèmes triphasés symétriques à ordre de phase inverse et à phase initiale $\psi = -\frac{\pi}{6}$ (fig. c).

c) L'amplitude de la tension composée d'un harmonique d'ordre $3c+1$ est $\sqrt{3}$ fois plus grande que l'amplitude de la tension simple de l'harmonique correspondant c'est à dire que :

$$E_{m_{V_C}} = \sqrt{3} E_{m_{V_S}} \quad v=3c+1$$

En passant aux valeurs efficaces des F.E.M simples et composées on a :

$$E_S = \sqrt{\frac{1}{2} (E_{m_1}^2 + E_{m_3}^2 + E_{m_5}^2 + E_{m_7}^2 \dots)}$$

$$E_C = \sqrt{\frac{3}{2} (E_{m_1}^2 + E_{m_5}^2 + E_{m_7}^2) + \dots}$$

Il en résulte :

$$E_C = E_S \sqrt{3 \frac{1 + K_{e5}^2 + K_{e7}^2 + \dots}{1 + K_{e3}^2 + K_{e5}^2 + K_{e7}^2 + \dots}} \quad K_{CV} = \frac{E_{mV}}{E_{m_1}} = \frac{E_V}{E_1}$$

Pour les courants dans une connexion en étoile on a : $I_C = I_S$ (les courants simples partent directement vers la ligne).

FIG. A

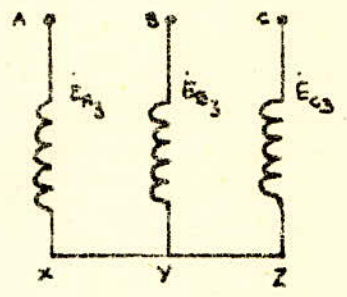


FIG. B

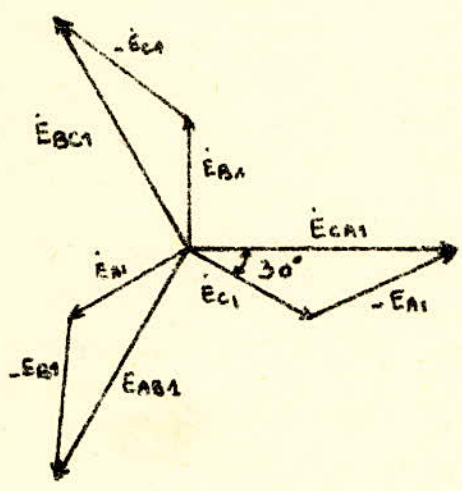


FIG. C.

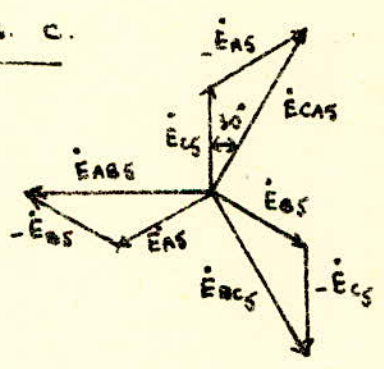
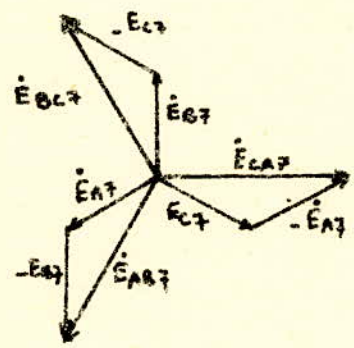


FIG. D



Diagrammes vectoriels des F.E.M. des du couplage en étoile
d'un enroulement triphasé.

- CHAPITRE IV -

MARCHE A VIDE D'UN
TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Pour un transformateur monophasé, les courbes de la F.E.M primaire et du flux principal résultantes de l'application d'une tension sinusoidale, sont sinusoidales et la courbe de courant contient en plus du fondamental l'harmonique 3.

Si on groupe 3 transformateurs monophasés identiques, en Y/Yo leur fonctionnement à vide diffère de celui d'un transformateur monophasé. En effet le groupe ne comporte plus de troisièmes harmoniques du courant :

$$i_{oA3} = I_{o3m} \sin 3\omega t.$$

$$i_{oB3} = I_{o3m} \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = I_{o3m} \sin 3\omega t.$$

$$i_{oC3} = I_{o3m} \sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = I_{o3m} \sin 3\omega t.$$

Ainsi les 3èmes harmoniques du courant comme ceux de la F.E.M sont en phase dans le temps et par conséquent sont dirigés à un instant quelconque, soit du début à la fin de l'enroulement, soit en sens inverse. Il en résulte que les courants du 3ème harmonique disparaissent de la courbe à vide puisque ils vont vers le point neutre ou en partent de là. Les courants du 5ème harmonique continuent d'exister avec un ordre de phase inverse.

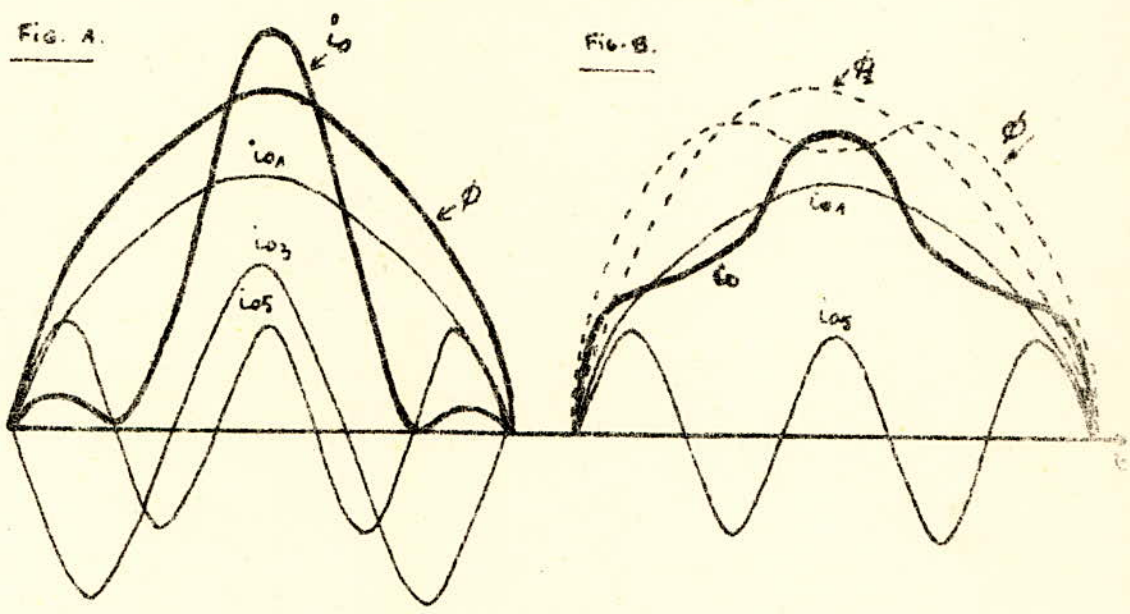
L'absence du troisième harmonique dans la courbe du courant à vide déforme la courbe du flux comme le montrent les fig. I et II.

Dans le cas d'un transformateur à trois colonnes, les flux des troisièmes harmoniques dans toutes les trois phases coïncident dans le temps. Il en est de même pour les courants. Cela signifie que les flux des troisièmes harmoniques à chaque instant sont égaux en grandeur et dans les colonnes sont dirigés dans le même sens.

Les lignes de flux du troisième harmonique se ferment par l'air, quittent le noyau allant d'une culasse à l'autre fig. III ce qui présente une grande reluctance.

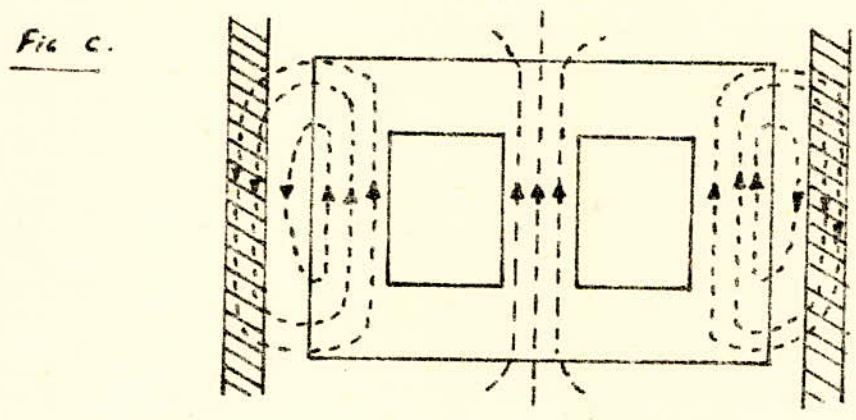
Pour cela les flux du troisième harmonique sont faibles et les tensions simples restent pratiquement sinusoïdales.

Ces flux en se refermant par l'air, font naître des courants de Foucault dans les parois du bac, les boulons de serrage etc... Ces courants sont nuisibles puisqu'ils abaissent le rendement du transformateur.



COURBES DE i_0 ET DE Φ .

- a) en présence du 3^e harmonique dans la courbe de i_0
- b) en l'absence de cet harmonique dans la courbe de i_0 .



Troisièmes harmoniques du flux dans un transformateur à trois colonnes.

- CHAPITRE V -

REGIME DE COURT-CIRCUIT
DANS LES TRANSFORMATEURS

Le court-circuit d'un transformateur est un régime de fonctionnement limité où l'enroulement secondaire est fermé sur lui même $\longrightarrow U_2 = 0$.

Si on court-circuite un transformateur en appliquant une tension primaire nominale, il apparait des courants, dans les enroulements, dont les valeurs atteignent 10 à 20 fois les valeurs nominales car les résistances des enroulements sont faibles.

Le court-circuit présente un grand danger par suite des grandes contraintes mécaniques qui apparaissent aussi que par suite de la surélévation de la température qui peut être excessive.

Afin de parer à ceci on définit une tension dite de court-circuit.

1 - TENSION DE COURT-CIRCUIT.

C'est la tension à appliquer au primaire, quand le secondaire est en court-circuit, pour avoir les courants nominaux dans les enroulements. Elle s'exprime en pour cent.

$$U_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_n} 100$$

II - PERTES DE COURT-CIRCUIT.

Lors d'un court-circuit le flux principal ϕ est très petit on peut négliger les P_{fe} du noyau et admettre que la puissance de court-circuit P_{cc} est dépensée pour compenser les pertes cuivre p_{e_1} et p_{e_2} :

$$P_{cc} = P_{c_1} + P_{c_2}$$

Les pertes cuivre comprennent :

a) Les pertes principales p_{co} déterminées par les résistances r_{10} et r_{20} en courant continu.

b) Les pertes supplémentaires dues au courant de Foucault, aux pertes provoquées par les flux de dispersion dans les parois du bac etc...

Les pertes principales dans le cuivre les plus importantes sont :

$$P_{co} = I_1^2 r_{10} + I_2^2 r_{20}$$

Les pertes supplémentaires sont introduites par des coefficients Kr_1 et Kr_2 qui augmentent les résistances r_{10} et r_{20} jusqu'aux valeurs :

$$r_1 = K_1 r_{10}$$

$$r_2 = K_2 r_{20}$$

On a ainsi :

$$P_{cc} = P_{c_1} + P_{c_2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_{cc}$$

Les pertes supplémentaires dépendent du type d'enroulements, de la forme du conducteur, de l'agencement de l'enroulement etc...

.../...

III - EFFORTS MECANQUES PENDANT UN COURT-CIRCUIT.

Entres les conducteurs dans lesquels circule le courant, il apparait des efforts mécaniques F_1 et F_2 .

Ces efforts peuvent être décomposer en composantes radiales F_{x_1} et F_{x_2} et axiales F_{y_1} et F_{y_2} .

Les premières tendent à écarter l'enroulement extérieur, les secondes tendent à déplacer les enroulements dans le sens axial.

Ces forces F_1 et F_2 sont proportionnelles à I_{cc}^2 et varient périodiquement. En plus des efforts F_x et F_y , entre les Spires d'un même enroulement agissent les efforts F_i qui tendent à comprimer l'enroulement dans le sens de la hauteur.

Ces efforts se produisent aussi pendant le fonctionnement normal mais ils sont petits et ne représentent pas de danger. Pendant le court-circuit ils augmentent très dangeureusement et peuvent provoquer l'avarie du transformateur.

- CHAPITRE VI -

FONCTIONNEMENT DES TRANSFORMATEURS

EN CHARGE

I - REMARQUES PRELIMINAIRES.

D'après la méthode de superposition, on montre qu'un régime en charge quelconque peut être obtenu par la superposition de deux régimes : marche à vide ; marche en court-circuit.

II - FONCTIONNEMENT EN CHARGE D'UN TRANSFORMATEUR REEL.

L'analyse d'un tel fonctionnement est basée sur les équations des F.E.M et de la F.M.M. Les paramètres secondaires étant réduits, on a :

$$\begin{aligned} 1^\circ) \quad \overset{\circ}{U}_1 &= -\overset{\circ}{E}_1 + Z_1 \overset{\circ}{I}_1 \\ 2^\circ) \quad \overset{\circ}{E}'_1 - \overset{\circ}{I}'_2 Z'_2 &= \overset{\circ}{U}'_2 \\ 3^\circ) \quad \overset{\circ}{E}'_2 &= \overset{\circ}{U}'_2 + Z'_2 \overset{\circ}{I}'_2 \\ 4^\circ) \quad \overset{\circ}{I}_1 &= -\overset{\circ}{I}'_2 + \overset{\circ}{I}_0 \end{aligned}$$

Conformément à ces équations on construit les diagrammes vectoriels du transformateur en charge.

a) Diagramme pour une charge inductive prédominante.

ϕ_m (origine) des abscisses. Pour avoir ϕ_m il faut I_0 légèrement en avance sur ϕ_m . Les F.E.M E_1 et E'_2 créées par ϕ_m sont en retard sur lui de $\frac{\pi}{2}$.

I'_2 est en retard de ψ_2 sur E'_2 . ψ_2 dépend de la charge. Pour construire $\overset{\circ}{U}'_2$ on compose E'_2 et $Z'_2 I'_2$ équation (II) ψ_2 est déterminé par le genre de charge : on peut aussi utiliser (III) fig. b. $\overset{\circ}{U}_1$ est construit d'après (I).

.../...

Fig. A

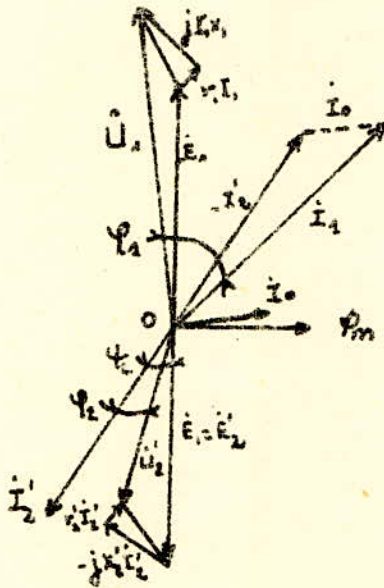


Diagramme vectoriel d'un transformateur débitant
sur une charge inductive.

Fig. B.

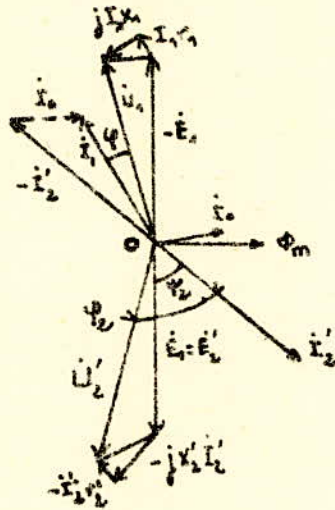


Diagramme vectoriel d'un transformateur débitant
sur une charge capacitive.

ϕ_1 déphasage entre $\overset{\circ}{U}_1$ et $\overset{\circ}{I}_1$ détermine la puissance active $U_1 I_1 \cos \phi_1$ que le transformateur reçoit du réseau.

Dans le cas d'une charge capacitive on a le diagramme c) construit sur le même principe que précédent.

III - VARIATION DE LA TENSION SECONDAIRE REDUITE EN FONCTION DE $\cos \psi_2$ DE LA CHARGE.

Supposons donné le triangle de C.C. $OB'C'$ dont les cotés sont respectivement :

$$B'C' = \overset{\circ}{I}_1 (r_1 + r_2') = \overset{\circ}{I}_1 r_{cc}$$

$$OB' = j \overset{\circ}{I}_1 (x_1 + x_2') = j \overset{\circ}{I}_1 x_{cc}$$

$$OC' = Z_{cc} \overset{\circ}{I}_1$$

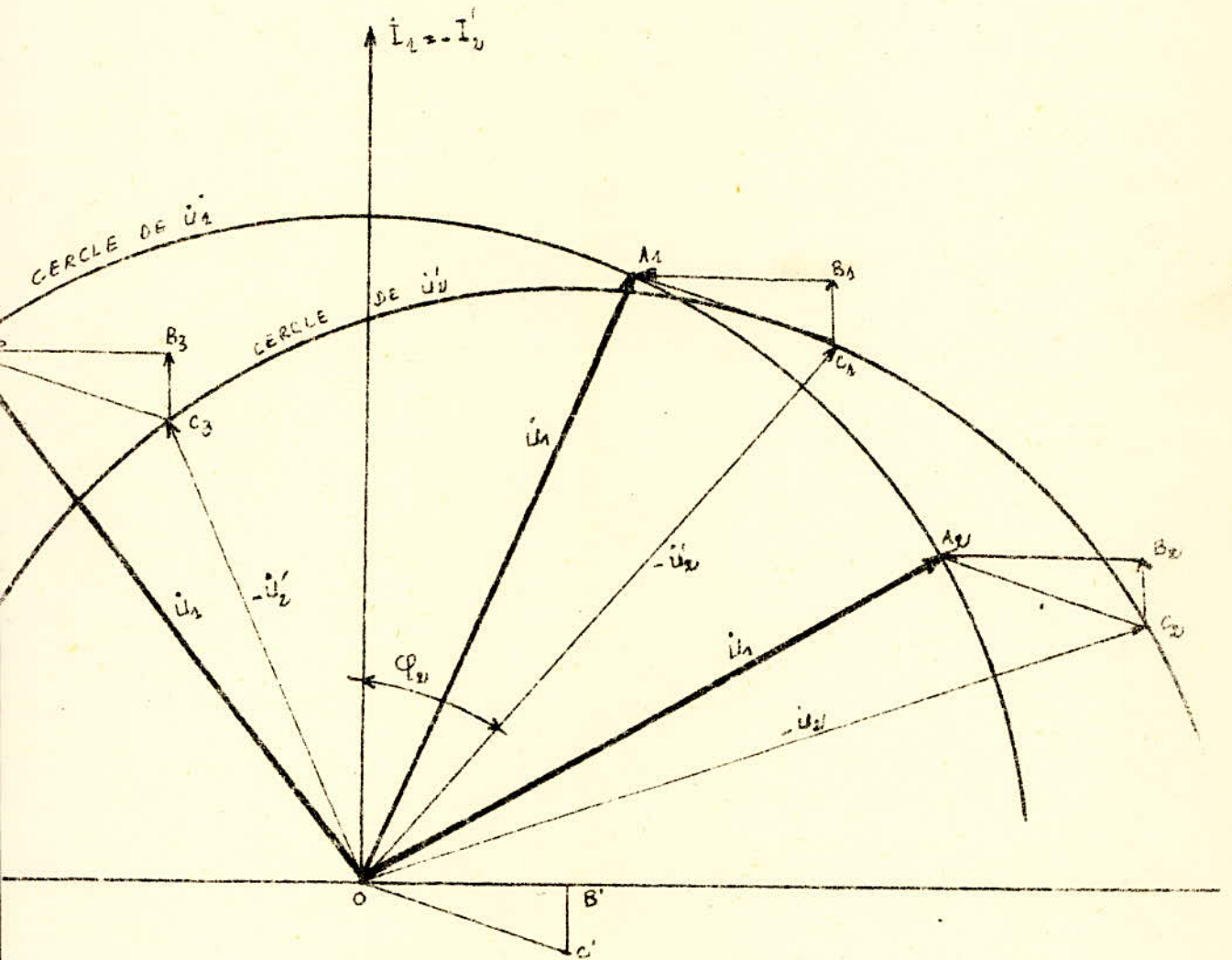
De O on trace une droite formant ψ_2 avec $O\overset{\circ}{I}_1$.

De C' on trace un arc de cercle de rayon $C'C = U_1 \longrightarrow CO = -\overset{\circ}{U}_2$.

Si U_1 et I_1 sont donnés et restent constantes mais ψ_2 varie on détermine U_2' ainsi; de O on trace un cercle de rayon $OA = U_1 \longrightarrow$ lieu des extrémités de U_1 ; De C' on trace un autre cercle de rayon égal à $U_1 \longrightarrow$ lieu géométrique des extrémités du vecteur de la tension secondaire.

Pour différentes valeurs de ψ_2 on obtient les valeurs de U_2' correspondantes. Quand la charge est capacitive U_2' peut devenir plus grande que U_1 .

VARIATION DE LA TENSION SECONDAIRE REDUITE \dot{U}'_2 EN
FONCTION DU $\cos \varphi_2$ DE LA CHARGE.



IV - RENDEMENT D'UN TRANSFORMATEUR.

C'est par définition, pour toute machine électrique, le rapport entre la puissance P_2 fournie par le transformateur. (en Kw ou en W) et la puissance amenée P_1 exprimée dans les mêmes unités que P_2 .

De cette façon :

$$\eta = P_2 / P_1$$

ou

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \text{ (en \%)}.$$

Ce rendement est souvent élevé. Pour sa détermination on utilise la méthode indirecte où chaque puissance est exprimée par l'autre et les pertes.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_f + P_c} 100 = \left[1 - \frac{P_f + P_c}{P_2 + P_f + P_c} \right] 100 \%$$

P_2 est la puissance théorique et est égale à $P_2 = P_n \cos \psi_2 K_{ch}$. K_{ch} coefficient de charge.

Généralement les pertes fer varient peu. On admet que $P_f = P_0 = C^2$. On admet aussi que les courants dans les enroulements varient dans le même degré, alors la variation de la température n'intervient pas.

On a alors :

$$P_c = K_{ch}^2 P_{cc}$$

P_{cc} : puissance de C.C.

Le rendement est alors :

$$\eta = \left[1 - \frac{P_0 + K_{ch}^2 P_{cc}}{K_{ch} P_n \cos \psi_2 + P_0 + K_{ch}^2 P_{cc}} \right] 100$$

En prenant la dérivée de η par rapport à K_{ch} et en l'annulant on obtient : η_{\max} pour $K_{ch} \approx 0,57$.

.../...

V - CONDITIONS DE MARCHE EN PARALLELE
DES TRANSFORMATEURS.

Si pour des raisons techniques ou économiques on préfère fractionner la puissance totale des transformateurs, on les couple en parallèle.

Les transformateurs ainsi couplés travaillent dans des conditions optima, quand on observe ces conditions :

1°) Les tensions primaires nominales et secondaires, nominales doivent être égales.

$$\begin{aligned}
 U_{11} &= U_{12} \dots\dots\dots = U_{1n} \\
 U_{21} &= U_{22} \dots\dots\dots = U_{2n} \\
 \text{Soit } K_1 &= K_2 = K_3 = \dots = K_n = \text{ rapport de transfor-} \\
 & \hspace{15em} \text{mation.}
 \end{aligned}$$

2°) Les transformateurs doivent appartenir à un même groupe.

3°) Les composantes actives et inductives de la tension de C.C de tous les transformateurs doivent être égales :

$$\begin{aligned}
 U_{cca1} &= U_{cca2} = \dots\dots\dots = U_{ccan} \\
 U_{ccr1} &= U_{ccr2} = \dots\dots\dots = U_{ccrn}
 \end{aligned}$$

Cette 3e condition revient à dire que l'on doit avoir toutes les tensions de C.C égales :

$$U_{cc1} = U_{cc2} \dots\dots\dots = U_{ccn}$$

Pratiquement seule la 2e condition doit être assurée rigoureusement. Pour la 1ère et la 3e on admet une certaine tolérance.

- CHAPITRE VII -
ECHAUFFEMENT - REFROIDISSEMENT
DES TRANSFORMATEURS

Les pertes qui se dégagent dans le noyau et dans les enroulements lors du fonctionnement sont transformées en énergie thermique et provoquent l'échauffement des parties correspondantes.

Depuis l'endroit où elle est dégagée la chaleur est dirigée sous l'action des gradients thermiques vers les endroits où elle peut être transférée à l'agent réfrigérant c'est à dire à l'air ou à l'eau selon le mode de refroidissement. La dispersion de la chaleur a lieu par rayonnement et par convection.

I - MODES DE REFROIDISSEMENT DES TRANS-
FORMATEURS DANS L'HUILE.

Divers modes :

- a) Refroidissement naturel par l'huile.
- b) Refroidissement par l'air à circulation forcée.
- c) A circulation forcée de l'huile et refroidissement de celle-ci par des réfrigérants à eau ou à air.

Il faut noter que pour l'huile le coefficient de transfert de la chaleur par convection est :

$$\alpha_{ch} = 40,3 \sqrt{\delta/4}$$

avec δ : différence de température de la surface et de l'huile en °C. H: hauteur de la surface de dissipation de la chaleur en m. /

Pour $\varrho = 20^{\circ}\text{C}$ et $H = 0,5$ à 1m

$$\lambda_{\text{ch}} = 80 \text{ à } 100 \text{ W/}^{\circ}\text{m}^2$$

Il est d'environ 10 fois supérieur au coefficient de convection dans l'air, d'où le rôle positif de l'huile comme milieu conducteur de chaleur.

II - ROLE DE L'HUILE ET DE LA CUVE DANS LE REFROIDISSEMENT DU TRANSFORMATEUR

En régime permanent toute la chaleur Σp qui se dégage dans le noyau et dans les enroulements est évacuée par la convection d'huile par l'intermédiaire de la surface extérieure de la cuve dans l'air. Plus la surface de la cuve S_c est petite, plus la charge thermique spécifique de la cuve $q_c = \frac{\Sigma p}{S_c}$ sera grande et plus la surélévation de la température d'huile par rapport à l'air sera grande.

Selon la norme soviétique la surélévation maximale admissible de la température d'huile par rapport à celle de l'air est de 60°C .

III - CONSTANTES DE TEMPS D'ECHAUFFEMENT.

Pour un corps solide homogène, sa constante de temps d'échauffement est donnée par :

$$T = \frac{G C \vartheta_m}{Q}$$

G : poids (Kg)

C : capacité thermique $\frac{\text{J}}{\text{Kg}}$ degré.

ϑ_m : surélévation de température.

Q : chaleur ; p_f pour le fer ; p_c pour le cuivre ; $p_f + p_c$ pour l'huile.

.../...

Etant donné que le transformateur se compose d'un noyau, d'un enroulement, de l'huile de poids, de capacité thermique différente il faut utiliser des constantes de temps d'échauffement T_n ; T_{en} ; T_h ; différentes et correspondant au noyau à l'enroulement et à l'huile.

IV - CAPACITE DE CHARGE D'UN TRANSFORMATEUR.

Pour les conditions de température nominale du milieu réfrigérant le transformateur peut supporter de façon continue une charge nominale constante pendant toute la durée normale de service.

Cependant lors de l'exploitation la charge peut varier. Elle peut être soit en dessus soit en dessous de la charge nominale.

En dessous de la charge nominale le transformateur est mal utilisé. En dessus on est limité. La surcharge admissible est déterminée par $K_s = \frac{I_{max}}{I_{nom}} > 1$ avec I_{max} : valeur maximale du courant pour lequel le transformateur peut fonctionner n heures par jour.

I_{nom} : valeur nominale du courant. IL existe des courbes donnant le nombre d'heures n de surcharge en fonction de K_s pour un coefficient de remplissage K_r donné.

V - CONTROLE DE LA TEMPERATURE ET PROTECTION THERMIQUE DES TRANSFORMATEURS.

Selon la norme soviétique les transformateurs doivent être munis d'un dispositif de mesure de la température des couches supérieures de l'huile.

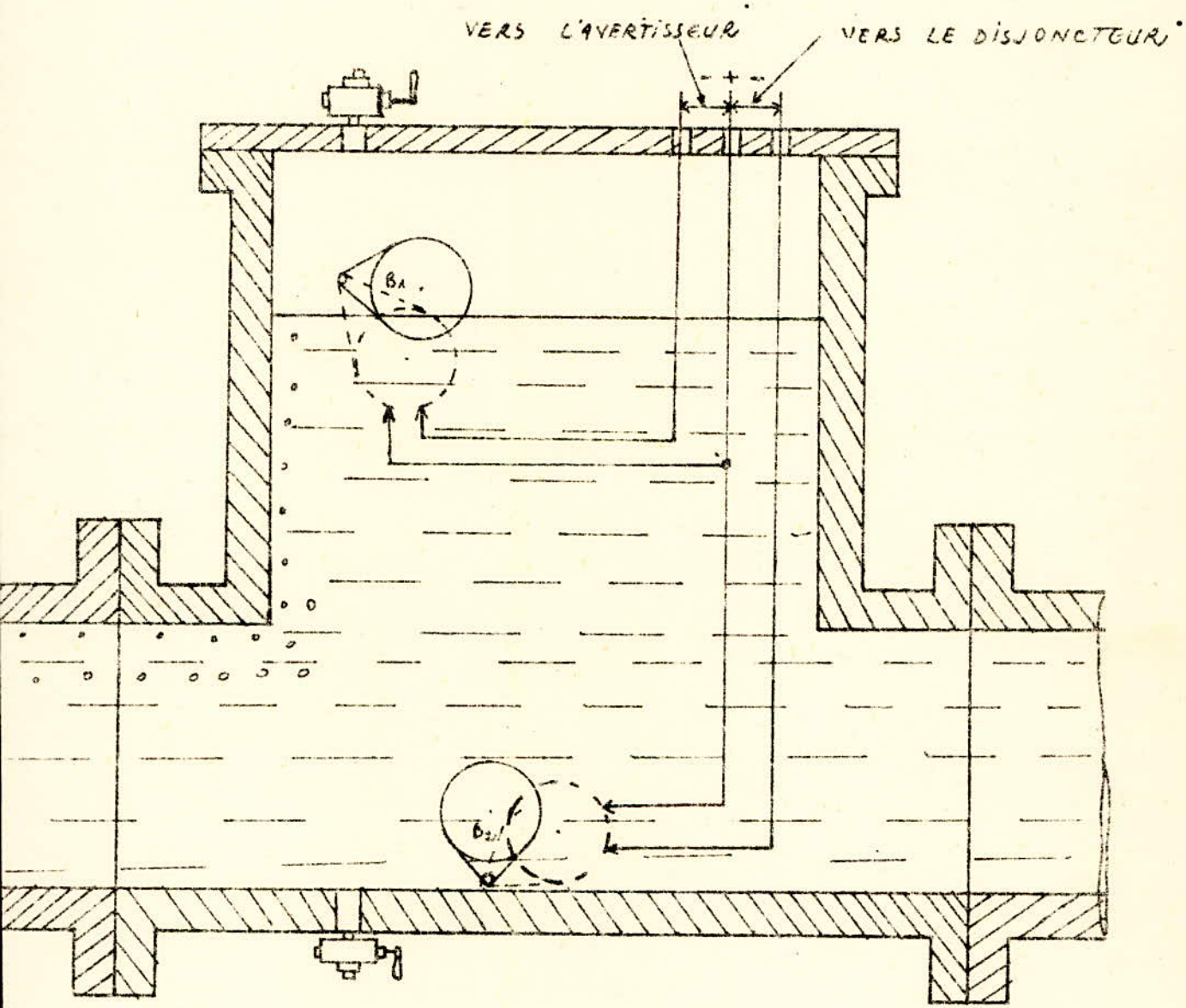
Les transformateurs à puissance S inférieure à 750 KVA sont dotés de thermomètres à mercure du type courant ou à contacts de signalisation. Ceux de 1000 KVA et plus sont dotés d'une sonde thermométrique fixée sur la partie latérale de la cuve.

Les transformateurs de 7500 KVA et plus doivent avoir un mesureur à distance. Dans les transformateurs de grande puissance on prévoit parfois le contrôle de la température de l'enroulement soit à l'aide de résistances incorporées soit à l'aide de modèles thermiques des enroulements. Ceci complique la construction du transformateur.

La protection thermique est réalisée à l'aide de relais thermiques pour les petites puissances, et de relais à gaz (relais BUCHHOLZ) pour les moyennes et les grandes puissances, le relais à gaz le plus employé est basé sur le fait que toute surchauffe dans le transformateur détruit l'isolation de la partie où elle a lieu : il en résulte l'apparition de produits de décomposition gazeux qui se dégagent plus ou moins vite.

Le gaz dégagé est évacué dans l'air par le réservoir d'huile. Le relais est installé sur le trajet du gaz entre le couvercle de la cuve et le réservoir d'huile. A l'état normal il est rempli d'huile.

Quand le gaz se dégage il s'accumule dans la partie supérieure du réservoir et fait baisser le niveau d'huile. Ce qui fait baisser un flotteur B_1 , qui à un certain moment ferme le circuit avec dispositif de signalisation. La couleur du gaz a une grande importance, elle donne l'idée de la détérioration. Au cas où le dégagement du gaz est intense le flux de gaz atteint avec une certaine force le flotteur B_2 qui incliné ferme le circuit de commande du disjoncteur dans l'huile. Ainsi le relais signale l'avarie imminente et met le transformateur hors circuit si cette avarie a lieu de façon brusque.



RELAIS BUCHHOLZ.

I) Il existe des courbes donnant la valeur des pertes fer et des pertes cuivre pour un transformateur de puissance donnée. Se lon ces courbes on a dans notre cas :

$$P_{cu} = 1,52 \times 4 \cdot 10^5 / 100 = 6,08 \cdot 10^3 \text{ W.}$$

$$P_{fe} = 0,46 \times 4 \cdot 10^5 / 100 = 1,84 \cdot 10^3 \text{ W.}$$

En faisant le rapport de ces pertes on obtient α_f

$$\alpha_f = 6,08 / 1,84 = 3,304$$

PERTES SPECIFIQUES DANS LE CUIVRE.

On suppose la densité de courant J égale dans les deux enroulements. Cette densité peut être prise égale à $2,8 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$.

Les pertes cuivre sont données par :

$$RI^2 = I^2 K_f L_{co} / S_{co}$$

$K = 1,11$ facteur tenant compte des pertes supplémentaires provenant de l'effet pelliculaire du courant.

L_{co} = longueur du cuivre

$\rho = 0,0216 \cdot 10^{-6} \text{ ohm.m}$ résistivité du cuivre.

ρ_{cu} = densité du cuivre = $8,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

La masse du cuivre est :

$$M_{cu} = \rho_{cu} L_{cotot} \cdot S_{co}$$

De ces deux expressions on tire les pertes spécifiques du cuivre :

$$p_{cu} = \frac{I^2 K_f \cdot L_{cotot}}{S_{co}} \times \frac{1}{\rho_{cu} L_{cotot} S_{co}} = \frac{J^2 K_f}{\rho_{cu}}$$

Pour un premier calcul on peut poser :

$$p_{cu} = 2,7 \cdot 10^{-12} J^2 \text{ W/kg}$$

soit $p_{cu} = 2,7 \cdot 10^{-12} \cdot 2,8^2 \cdot 10^{12} = 21,2 \text{ W/kg}$

Les pertes fer sont données par l'équation :

$$p_{fe} = K_{us} p'_{fe} B^2 \text{ W/kg}$$

p'_{fe} désigne le "chiffre" de perte et dépend de l'épaisseur des tôles.

Pour $e = 0,35 \text{ mm}$ on a $p'_{fe} = 1,3 \text{ W/kg}$

Pour $e = 0,5 \text{ mm}$ on a $p'_{fe} = 1,5 \text{ à } 1,6 \text{ W/kg}$

Dans notre cas on choisit pour épaisseur des tôles $0,35 \text{ mm}$ donc

$$p'_{fe} = 1,3 \text{ W/kg}$$

K_{us} : c'est un facteur qui tient compte de l'augmentation des pertes du fer dues à l'usinage. Il est égal à $1,15$ pour les transformateurs de grande puissance et à $1,20$ pour ceux de faible puissance. Dans ce cas on a : avec $B = 1,4 \text{ T}$

$$p_{fe} = 1,3 \cdot 1,15 \cdot 1,4^2 = 2,93 \text{ W/kg}$$

2) SECTION ACTIVE DU NOYAU.

La section est donnée par la formule empirique :

$$S_{fe} = c \left\{ \frac{P_s \cdot p_{cu} / p_{fe}}{f \cdot p \cdot J ; B} \cdot 10^{-1} \right\}^{1/2}$$

"c" est une constante donnée. Pour les transformateurs triphasés à noyau avec bobine rectangulaire $c = 45$

"f" la fréquence = 50 Hz; "B" l'induction; "J" la densité de courant;

p_{cu} et p_{fe} les pertes calculées plus haut; P_s puissance en kva

A.N.

$$S_{fe} = 45 \left[\frac{400 \cdot 21,2 / 2,93 \cdot 10^{-1}}{50 \cdot 3,3 \cdot 2,8 \cdot 10^6 \cdot 1,4} \right]^{1/2} = 45 \frac{289,419}{646,8 \cdot 10^6}^{1/2}$$

$$S_{fe} = 0,0301 \text{ m}^2$$

Comme les tôles ont une épaisseur de 0,35 mm le coefficient de remplissage est $K_f = 0,87$.

La section totale du noyau est :

$$S'_{fe} = S_{fe} / K_f = 0,0301 / 0,87 = 0,03459 \text{ m}^2$$

La section du noyau peut avoir plusieurs formes. Nous la prendrons comme le montre la figure.

La section étant connue on peut calculer le diamètre du cercle circonscrit :

$$S'_{fe} = \pi D^2 / 4 \Rightarrow (4 S'_{fe} / \pi)^{1/2} = D$$

$$D = (4 \cdot 0,03459 / 3,14)^{1/2} = 0,21 \text{ m} = 21 \text{ cm}$$

Par application du théorème de Pythagore on calcule ln_1 ; ln_2 ; ln_3

puisque l'autre côté est donné respectivement par :

$$0,56 D = 0,56 \cdot 0,21 = 0,1176 \text{ m} = 11,76 \text{ cm}$$

$$0,75 D = 0,75 \cdot 0,21 = 0,1575 \text{ m} = 15,75 \text{ cm}$$

$$0,89 D = 0,89 \cdot 0,21 = 0,1869 \text{ m} = 18,69 \text{ cm}$$

$$ln_1 = (D^2 - (0,89 D)^2)^{1/2} = 9,575 \text{ cm}$$

$$ln_2 = \sqrt{D^2 - (0,75 D)^2} = 13,89 \text{ cm}$$

$$ln_3 = \sqrt{D^2 - (0,56 D)^2} = 17,4 \text{ cm}$$

Connaissant ces côtés on déduit le deuxième côté de chaque paquet de tôle

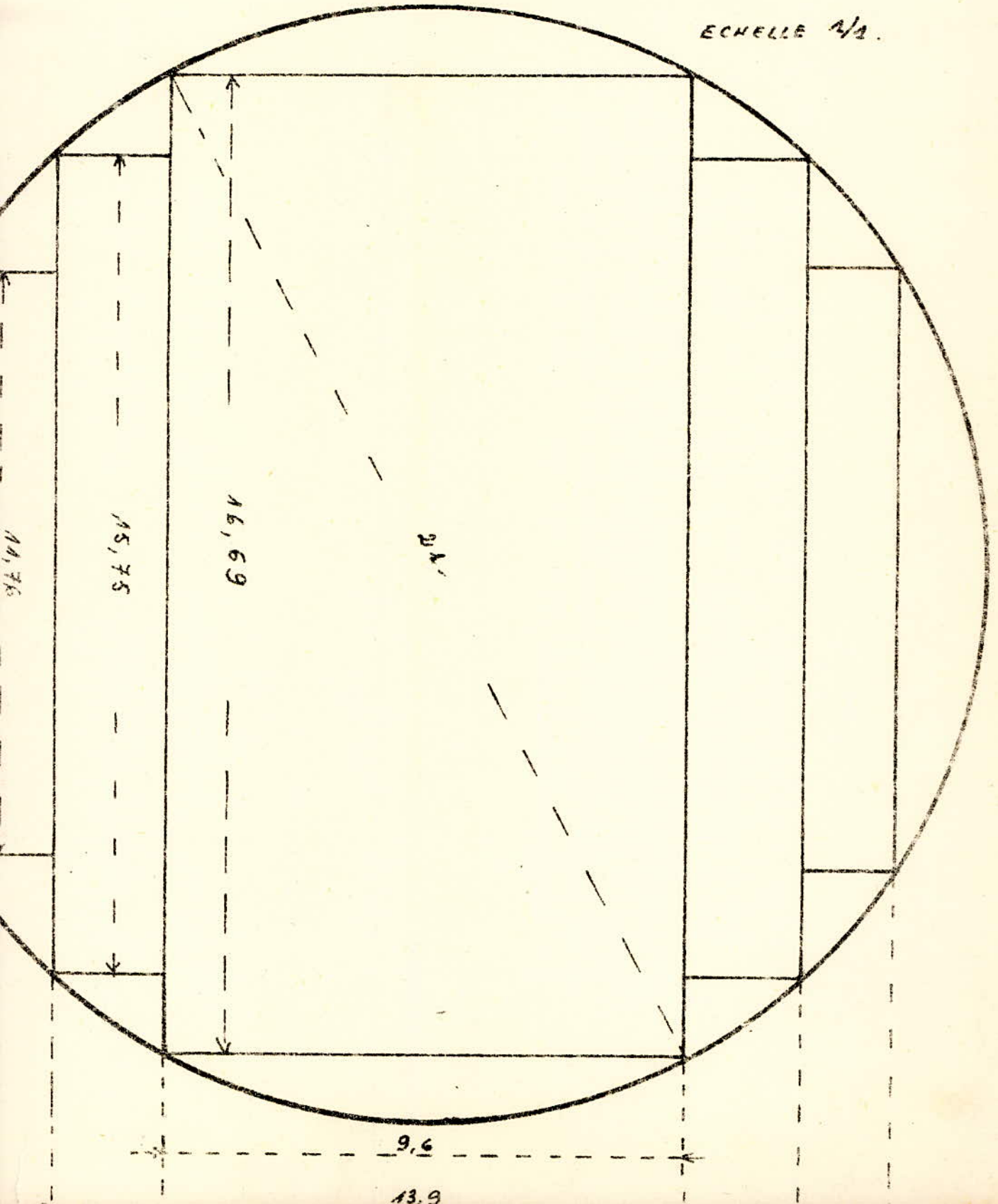
$$l'n_1 = ln_1 = 9,575 \text{ cm}$$

$$l'n_2 = \frac{13,89 - 9,575}{2} = 2,157 \text{ cm}$$

$$l'n_3 = \frac{17,4 - 13,89}{2} = 1,755 \text{ cm}$$

SECTION DU NOYAU. DONNEES EN CM.

ECHELLE 1/2.



3) CALCUL DE LA CULASSE.

La culasse a une forme rectangulaire. Selon la section du noyau un côté est égal à : $B_j = 17,4 \text{ cm}$

En écrivant l'égalité des flux à travers la section du noyau et celle de la culasse on déduit la hauteur de celle-ci :

$$B_n S_n = B_c S_c .$$

$B_n = 1,4 \text{ T}$: induction dans le noyau

$B_c = 1,3 \text{ T}$: induction dans la culasse

$S_n = 0,03459 \text{ m}^2$: section du noyau

S_c : section de la culasse

La section S_n précédente est celle obtenue en tenant compte uniquement des coefficients de replissage . En tenant de l'isolation à l'aide du coefficient $K_1 = 0,9$ on obtient la section des paquets de tôles S_{pt} :

$$S_{pt} = 0,0301 / 0,9 = 0,0334 \text{ m}^2$$

La section de la culasse est donc :

$$S_c = 1,4 \cdot 0,0334 / 1,3 = 0,03596 \text{ m}^2$$

d'où le deuxième côté de la culasse H_j :

$$H_j = S_c / B_j = 0,03596 / 0,174 = 0,2066 \text{ m} = 20,66 \text{ cm}$$

II CALCUL DE L'ENROULEMENT HAUTE TENSION.

A la section $S_{fe} = 0,0301 \text{ m}^2$ et à l'induction $B = 1,4 \text{ T}$ il correspond un flux :

$$\Phi = B \cdot S_{fe} = 0,0301 \cdot 1,4 = 0,042 \text{ Wb}$$

Le nombre de spires de cet enroulement est donné par :

$$N_1 = \frac{V}{4,44 \cdot F \cdot \Phi} = \frac{U_1}{1,732 \cdot 4,44 \cdot F \cdot \Phi}$$

$F = \text{fréquence} = 50 \text{ Hz}$

$$N_1 = \frac{6000}{1,732 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 0,042} = 369 \text{ Spires}$$

A ce nombre on ajoute : $5 \cdot 369 / 100 = 18 \text{ Spires de réglage}$

Le courant dont l'enroulement HT est donné par :

$$I_1 = P / 3 V_1$$

P : puissance nominale en VA V_1 : tension simple primaire

$$I_1 = \frac{400\,000}{1,732 \cdot 6\,000} = 38,49 \text{ A}$$

Conformément aux normes la densité J_1 a pour valeur

$$J_1 = 3,3 \cdot 10^6 \text{ A / m}^2$$

On déduit la section du conducteur primaire nu :

$$S_{co_1} = I_1 / J_1 = 38,49 / 3,3 \cdot 10^6 = 11,66 \text{ mm}^2$$

A cette section correspond un conducteur nu dont les côtés sont :

$$1,67 \text{ et } 6,98 \text{ mm.}$$

Les dimensions, une fois le conducteur isolé deviennent :

$$1,67 + 0,5 = 2,17 \text{ mm}$$

$$6,98 + 0,5 = 7,48 \text{ mm}$$

Le nombre total de spires HT est égal à 387. on les répartit de la façon suivante en bobines :

4 bobines de 9 Spires chacune avec isolation renforcée ; et 27 bobines de 13 Spires chacune, soit un total de 31 bobines

Nous pouvons dès lors dimensionner ces bobines. Pour commodité de calcul, nous prendrons les mêmes dimensions pour les bobines de 9 Spires et celles de 13 Spires. Pour une bobine on a donc :

$$H_{bo_1} = (1,67 + 0,5) \cdot 13 = 28,21 \text{ mm}$$

$$B'_{bo_1} = (6,98 + 0,5) = 7,48 \text{ mm}$$

Les 31 bobines occupent une hauteur de :

$$7,48 \cdot 31 = 231,88 \text{ mm}$$

Des courbes préétablies on tire la densité linéaire de courant A

$$A = 6,4 \cdot 10^4 \text{ A/m}$$

On calcule la hauteur de la fenêtre h_n par la formule :

$$h_n = 2 N_1 \cdot I_1 / A$$

$$h_n = 2 \cdot 369 \cdot 38,49 / 6,4 \cdot 10^4 = 0,444 \text{ m}$$

Avec un facteur de remplissage du cuivre de la fenêtre $K_{rcu} = 0,33$

on tire la largeur de la fenêtre donnée par :

$$b_f = 4 \cdot N_1 \cdot S_{co_1} / K_{rcu} \cdot h_n$$

$$b_f = 4 \cdot 369 \cdot 11,66 \cdot 10^{-6} / 0,33 \cdot 0,444 = 0,1166 \text{ m}$$

Cette largeur est susceptible d'être modifiée selon les besoins .

Connaissant la hauteur h_n et sachant que la distance entre l'enroulement et la culasse est de 20 mm selon les normes, on déduit la hauteur

bb_o à la disposition de l'enroulement :

$$bb_o = h_n - 2d_{jc} \text{ avec } d_{jc} \text{ distance culasse enroulement .}$$

$$bb_o = 444 - 2 \cdot 20 = 404 \text{ mm}$$

On peut alors calculer l'espace entre deux bobines consécutives pour la

$$HT : d_{bo1} = \frac{bb_o - n_b \cdot b'_{bo1}}{n_b - 1}$$

n_b : nombre de bobines :

$$d_{bo1} = 404 - 31 \cdot 7,48 / 30 = 5,73 \text{ mm}$$

2) CALCUL DE L'ENROULEMENT BASSE TENSION (BT).

On a $N_2/V_2 = N_1/V_1$: soit donc $N_2 = N_1 \cdot V_2/V_1$

N_2 : nombre de spires secondaires

V_2 : tension simple secondaire

$$N_2 = 369 \cdot \frac{380}{3} / \frac{6000}{3} = 24 \text{ spires}$$

I_2 se détermine à partir de :

$$P = 3 \cdot V_2 \cdot I_2$$

$$I_2 = P / \sqrt{3} \cdot U_2 = 400 \cdot 10^3 / 1,732 \cdot 380 = 607,75 \text{ A}$$

Selon les normes la densité du courant J_2 au secondaire est :

$$J_2 = 3 \cdot 10^6 \cdot \text{A/m}^2$$

La section du cuivre est donc :

$$S_{co2} = I_2 / J_2 \cdot N$$

Avec $N = 5$ = nombre de conducteurs en parallèle. La section d'un conducteur

est donc $S_{co2} = 607,75 / 5 \cdot 3 = 40,5 \text{ mm}^2$

Cette section correspond un conducteur de dimension : 3,28 mm et 12,5 mm

Le conducteur isolé a pour dimension : 3,28 + 0,5 = 3,78 mm

$$12,5 + 0,5 = 13 \text{ mm}$$

Le nombre de spires secondaires étant égal à 24, on les répartit en 24 bobines d'une spire chacune de dimension :

$$h_{bo2} = 3,78 \cdot 5 = 18,9 \text{ mm}$$

$$b'_{bo2} = 12,5 + 0,5 = 13 \text{ mm}$$

En égard à la dispersion on choisit la même hauteur b_{bo} pour les deux enroulements. Entre les bobines secondaires il restera donc un espace d_{bo2} de :

$$d_{bo2} = b_{bo} - n_{b2} \cdot b'_{bo2} / n_{b2} - 1$$

avec n_{b2} : nombre de bobines secondaires

b'_{bo2} : hauteur d'une bobine secondaire

$$d_{bo2} = 0,404 - 24 \cdot 13 \cdot 10^{-3} / 23 = 0,004 \text{ m} = 4 \text{ mm.}$$

3) TENSION D'ESSAI.

Pour la BT; Conformément aux normes allemandes la tension d'essai est :

$$3,25 U_2 = 3,25 \cdot 380 = 1235 \text{ V}$$

En prenant 1000 KV /m comme contrainte pour le cylindre isolant on trouve pour épaisseur de celui-ci : $1235 / 1000 \cdot 10^3 = 1,235 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ soit 1,3 mm

Pour la HT • La tension d'essai, est :

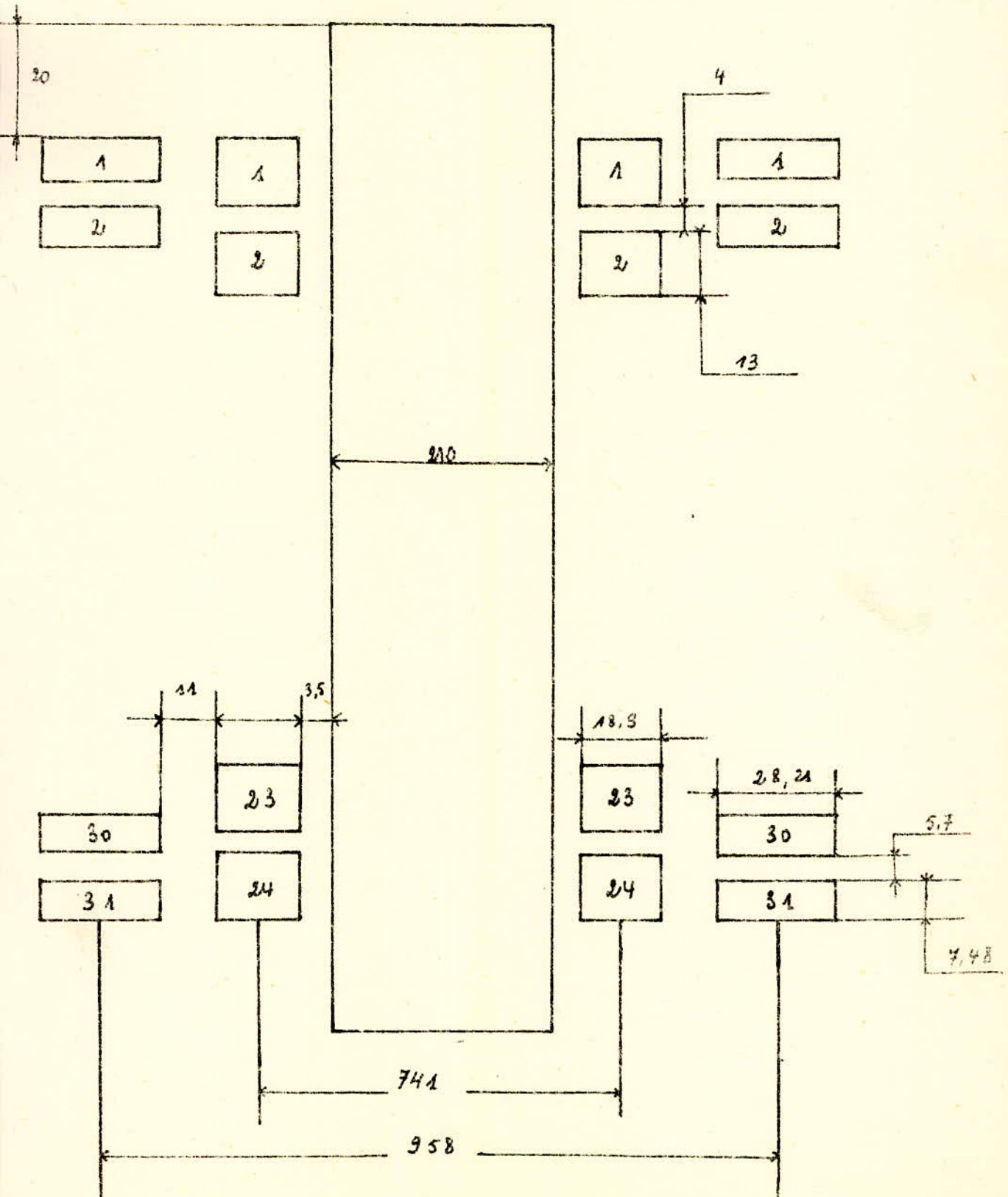
$$1,75 U_1 + U_1 / 2 = 13 500 \text{ V.}$$

En prenant 5 000 KV /m comme contrainte le cylindre aura pour épaisseur :

$$13 500 / 5 000 \cdot 10^3 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2,7 \text{ mm}$$

UTILISATION DE LA FENETRE

DONNEES EN mm.



Connaissant les dimensions des bobines et en prenant 3,5mm, pour distance BT noyau et 11mm, pour distance BT-HT, on peut schématiser le circuit magnétique d'une fenetre, comme le montre le schéma.

4) VERIFICATION DES PERTES.

Comme le montre le schema on a:

Longueur de la spire BT : L_{sp_2} :

$$L_{sp_2} = \pi(210 + 2 \cdot 3,5 + 18,9) \cdot 10^{-3} = 0,741 \text{ m.}$$

Longueur moyenne de la spire HT: L_{sp_1} :

$$L_{sp_1} = \pi(210 + 2(3,5 + 18,9 + 11) + 28,21) \cdot 10^{-3} = 0,958 \text{ m.}$$

Il en résulte les masses du cuivre suivantes:

BT

$$M_{cu_2} = \rho_{cu} \cdot N_2 \cdot a \cdot S_{co_2} \cdot L_{sp_2}$$

a: nombre de conducteur en //.

$$M_{cu_2} = 3 \cdot 8,9 \cdot 10^3 \cdot 24 \cdot 5 \cdot 40,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,741 = 96,15 \text{ Kg.}$$

HT

$$M_{cu_1} = 3 \rho_{cu} \cdot N_1 \cdot a' \cdot S_{co_1} \cdot L_{sp_1}$$

$$M_{cu_1} = 3 \cdot 8,9 \cdot 10^3 \cdot 369 \cdot 11,66 \cdot 10^{-6} \cdot 0,958 = 110,05 \text{ Kg.}$$

5) CALCUL DES RESISTANCES RAPPORTEES A 75°C .

BT

$$R_2 = L_{sp_2} \cdot N_2^2 \cdot \rho_{cu} / a \cdot S_{co_2}$$

$$R_2 = 0,741 \cdot 24 \cdot 0,0216 \cdot 10^{-6} / 5 \cdot 40,5 \cdot 10^{-6} = 0,0019 \text{ ohm/col.}$$

HT

$$R_1 = L_{sp_1} \cdot N_1^2 \cdot \rho_{cu} / a' \cdot S_{co_1}$$

$$R_1 = 0,958 \cdot 369 \cdot 0,0216 \cdot 10^{-6} / 11,66 \cdot 10^{-6} = 6,67 \text{ ohm/col.}$$

Rapportons la resistance secondaire: R_2 au primaire: Soit R'_2 .

$$R'_2 = R_2 \cdot (N_1 / N_2)^2$$

$$R'_2 = 0,0019 \cdot (369 / 24)^2 = 0,449 \text{ ohm/col.}$$

Ces resistances doivent etre augmentées et ce à cause de l'effet pelliculaire. Pour chacune d'elle on calcule le coefficient K_{cs} d'augmentation. Ce coefficient est donné par:

$$K_{cs} = (Z_{cs} - 0,2) \cdot \xi^4 / 9$$

Z_{cs} est donné et est égale à: 10 pour la BT, 15 pour la HT

ξ lui est donné par la formule:

$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot (b_{cu} \cdot f / b_z \cdot 10^7 \cdot f) \cdot h_{co}$$

Ces 2 formules appliquées nous donnent:

BT

$$b_{cu} = 6 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 0,48 \text{ m}$$

$$b_z = 0,442 \text{ m}$$

$$b_z = b_{b02} + 2 \cdot h_{b02} = 0,404 + 2 \cdot 18,9 \cdot 10^{-3}$$

$$h_{co} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

Donc: $\xi_2 = 3.3, 14. (0,48.50/0,442.10^7 \cdot 0,0216.10^{-6})^{1/2} \cdot 3.10^{-3} = 0,3.$
 $K_{cs_2} = (10^2 - 0,2/9) \cdot 0,3^4 = 0,088$
 $K_2 = 1 + K_{cs_2} = 1 + 0,088 = 1,088$

HT On applique les mêmes formules que pour la B T avec les données suivantes:

Zcs=15 $b_{cu} = 0,42m$ $b_z = 0,404 + 2.28,29.10^{-3} = 0,46m$ $h_{co} = 2,8.10^{-3}m.$
 $\xi_1 = 2.3, 14.2,8.10^{-3} (0,42.50/0,46.10^7 \cdot 0,0216.10^{-6})^{1/2} = 0,2566$
 $K_{cs_1} = (15^2 - 0,2) \cdot 0,2566^4 / 9 = 0,107$
 $K_1 = 1 + 0,107 = 1,1$

Connaissant les valeurs des résistances et celles des coefficients tenant compte des pertes supplémentaires, on peut calculer les pertes résultant dans chaque enroulement.

BT $P_{cu_1} = 3 \cdot I_2^2 \cdot K_2 \cdot R_2$
 $P_{cu_2} = 3 \cdot 607,75^2 \cdot 1,088 \cdot 0,0019 = 2290,6w = 2,2906Kw.$

HT $P_{cu_1} = 3 I_1^2 K_1 R_1$
 $P_{cu_1} = 3 \cdot 38,49 \cdot 1,1 \cdot 0,67 = 3275,55w = 3,2755Kw.$

6) TENSION DE C-C CHUTE DE TENSION.

La chute ohmique de tension est donnée par:

$V_f = I_1 (K_1 R_1 + K_2 R'_2)$

Soit: $V_f = 38,49 \cdot (1,1 \cdot 0,67 + 1,088 \cdot 0,449) = 47,8v.$

La tension de dispersion V_σ est:

$V_\sigma = X_\sigma \cdot I_1$

La reactance de fuite X_σ est donnée par:

$X_\sigma = \frac{7,9 \cdot f \cdot L_{co} \cdot N_1^2 \cdot K_{co} \cdot (\epsilon_t + \frac{h_{bo1} + h_{bo2}}{3}) \cdot 10^{-6}}{b_{bo}}$

Avec: $L_{co} = L_{sp1} + \frac{L_{sp2}}{2} = 0,85m$ $\epsilon_t = 20 \cdot 10^{-3} m.$

K_{co} se calcule par:

$K_{co} = 1 - \frac{1}{2 \cdot n} \cdot (2 \cdot \epsilon_t \cdot \frac{h_{bo1} + h_{bo2}}{3} + \frac{h_{bo}^2}{3})$
 $K_{co} = 1 - \frac{1}{6,28} \cdot (40 + 28,21 + 18,9/404) = 0,965.$

D'où: $X_\sigma = \frac{7,9 \cdot 50 \cdot 0,85 \cdot 369^2 \cdot 0,965 \cdot (20 + \frac{28,21 + 18,9}{3}) \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6}}{0,404}$

$X_\sigma = 3,94ohm.$

La tension de dispersion est donc:

$V_\sigma = 38,49 \cdot 3,94 = 151,6v$

De V_σ et V_f , on déduit la tension de court circuit V_{cc} :

$V_{cc} = (V_f^2 + V_\sigma^2)^{1/2}$

$$V_{cc} = \sqrt{47,2^2 + 151,6^2} = 158,8 \text{ v}$$

Soit en % de la tension primaire :

$$V_{cc\%} = 158,8 / 6\ 000 / \sqrt{3} = 4,58 \%$$

7) VERIFICATION DES PERTES FER.

Les calculs préliminaires ont donné pour largeur de la fenêtre $b_f = 117,6 \text{ m}$. Cette largeur est insuffisante vu les dimensions des bobines. En outre, entre les spires HT existe un espace de $19,6 \text{ mm}$. La nouvelle largeur est donc :

$$b_f = 2 (3,5 + 18,9 + 11 + 28,21) + 19,6 = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$$

La hauteur de la fenêtre est de $0,444 \text{ m}$; celle des joints de culasse est de $0,2066 \text{ m}$. La largeur des joints est de $0,174 \text{ m}$. On peut dimensionner le circuit magnétique comme le montre le schéma.

La section des paquets de tôle est $S_{pt} : 0,0334 \text{ m}^2$

Volume des trois noyaux : $V_n :$

$$V_n = 3 \cdot S_{pt} \cdot H_n$$

$$V_n = 3 \cdot 0,0334 \cdot 0,444 = 0,044489 \text{ m}^3 = 44,489 \text{ dm}^3$$

Le poids des trois noyaux est : $P_n :$

$$P_n = d \cdot V_n \quad d = \text{densité} = 7,8 \text{ kg/dm}^3$$

$$P_n = 7,8 \cdot 44,489 = 347,01 \text{ kg}$$

Calculons le volume des deux joints de culasse V_{jc}

$$V_{jc} = 2 \cdot b_j \cdot h_j \cdot l_j$$

$$l_j = 3 \cdot 0,21 + 2 \cdot 0,15 = 0,93 \text{ m}$$

$$V_{jc} = 2 \cdot 0,93 \cdot 0,2066 \cdot 0,174 = 0,06686 \text{ m}^3 = 66,86 \text{ dm}^3$$

Le poids de ces deux joints est :

$$P_{jc} = 7,8 \cdot 66,86 = 521,51 \text{ kg}$$

Les pertes fer nous sont données par :

$$P_{fe} = K_{us} \cdot p'_{fe} \cdot B^2$$

K_{us} : coefficient de correction = $1,15$

$p'_{fe} = 1,3 \text{ W/kg}$ pertes spécifiques

B : induction = $1,3 \text{ T}$ pour la culasse

" = $1,4 \text{ T}$ pour le noyau

D'où les pertes fer :

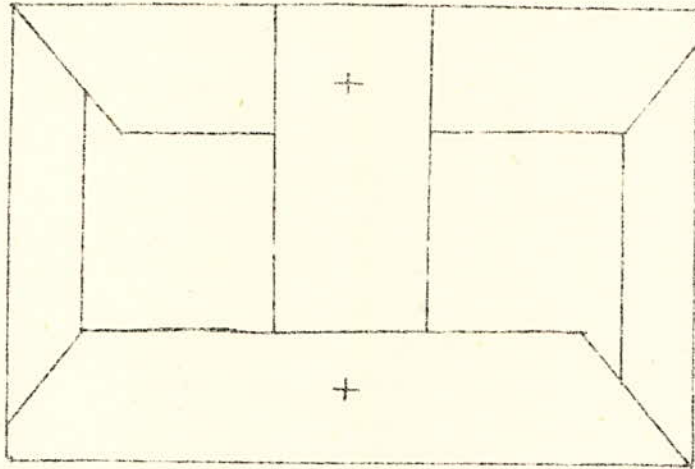
$$P_{fen} = 1,15 \cdot 1,3 \cdot 1,4^2 \cdot 347,01 = 1\ 016,81 \text{ W}$$

$$P_{fejc} = 1,15 \cdot 1,3^3 \cdot 521,51 = 1\ 294,88 \text{ W}$$

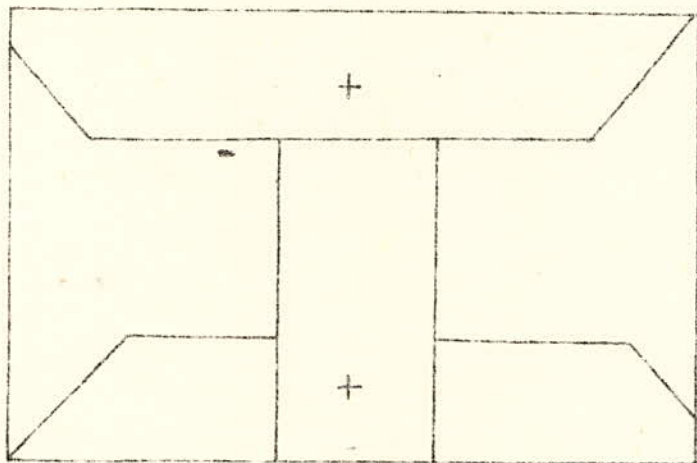
Soit au total : $P_{fe} = 1\ 016,81 + 1\ 294,88 = 2,3 \text{ kW}$

Cette valeur diffère de la valeur admise. On peut donc l'adapter pour la suite des calculs.

ASSEMBLAGE DES TÔLES.



CYCLE I



CYCLE II

HIFI COURANT A VIDE I_o

Le courant à vide d'un transformateur à deux composantes : la composante réactive représentant le courant magnétisant et la composante active correspondant aux pertes dans le transformateur, pertes comprenant essentiellement les pertes dans le fer par Hystérésis et par courant de Foucault. Celles par effet Joule sont insignifiantes à vide. Calculons donc ces deux composantes.

Par définition on a :

$$P_o = P_{fe} = 3 U_f \cdot I_{oa} \quad \text{d'où :}$$

$$I_{oa} = P_{fe} / 3 U_f = 2300 / 3.6000 / \sqrt{3} = 0,2208 \text{ A}$$

Soit en % : $i_{oa} = (P_o / S) \cdot 100$ S : Puissance en VA

$$i_{oa} = 2300 \cdot 10^2 / 4 \cdot 10^5 = 0,574 \%$$

Composante réactive ou courant magnétisant.

Déphasé de $\pi/2$ en arrière sur la tension primaire, le courant magnétisant est le courant nécessaire à la génération du flux ϕ dans le noyau. Ce courant est égal à :

$$I_{or} = Q / 3 U_f$$

Q est la puissance totale de magnétisation. Elle est égale à :

$$Q = q_c \cdot G_c + q_n \cdot G_n + q_\zeta \cdot S_m \cdot n_\zeta$$

avec q_c puissance magnétisante pour la culasse en VAR / cm²

q_n " " " le noyau " " "

q_ζ " " " l'entrefer " " "

G_c ; G_n poids de la culasse et du noyau

n_ζ nombres d'entrefers = 7

S_m section de paquets de tôle = 334 cm²

A l'aide du tableau suivant on fait le choix des différentes puissances dans le cas des tôles laminées à froid .

B (T)	R $\mu\Omega/\text{cm}^2$	Q VAR/cm ²	Q _s VAR/cm ²
1,3	0,82	4,55	0,7
1,4	0,345	6,7	1,11

$$Q = 4,55 \cdot 512,51 + 6,7 \cdot 347,01 + 1,11 \cdot 334 \cdot 7 = 7252 \text{ VAR}$$

d'où : $I_{or} = 7252 / 3 \cdot 6000 / \sqrt{3} = 0,697 \text{ A}$ ou en % : $7252 / 4 \cdot 10^5 = 1,813 \%$

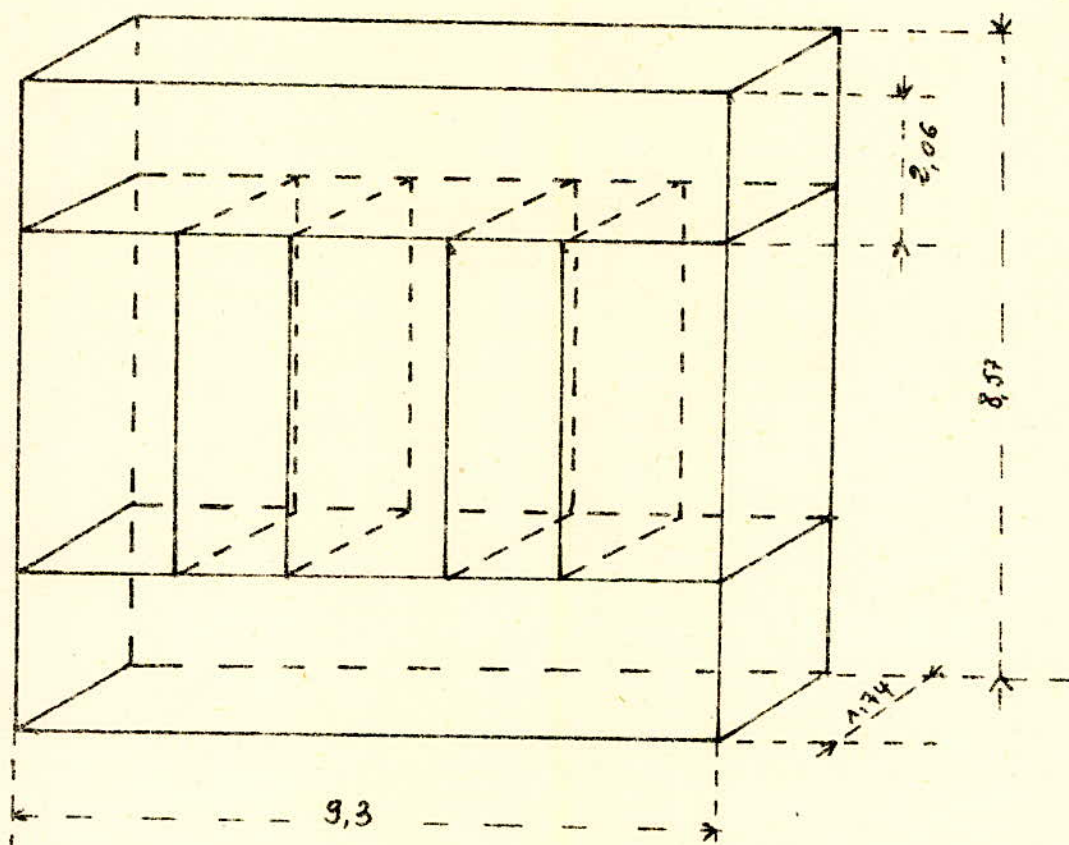
Le courant à vide I_o est donc :

$$I_o = (0,2208^2 + 0,697^2)^{1/2} = 0,731 \text{ A}$$

Soit en % du courant nominal primaire : $I_o \% = 0,731 \cdot 100 / 38,49 = 1,9 \%$

DIMENSIONS DU CIRCUIT MAGNETIQUE.

DONNÉES EN CM. ECHELLE 1/10



IV CALCUL THERMIQUE.

Vu le schéma de la section du noyau, on peut déterminer le périmètre des paquets de tôle Ppt.

$$Ppt = \{ 2 \cdot 117,6 + 2 \cdot 95,75 + 4 \cdot 17,55 + 4 \cdot 21,57 + 2(157,5 - 117,6) + 2(186,9 - 157,5) \} 10^{-3} = 0,722 \text{ m}$$

La surface latérale des trois noyaux est donc :

$$3 \cdot 0,722 \cdot 0,444 = 0,9617 \text{ m}^2 = 9617 \text{ cm}^2$$

Calculons la section des bobines en contact avec l'huile.

1) Section latérale des bobines BT.

Nous avons 24 bobines de dimension 18,9 mm / 13 mm

La longueur moyenne de la spire BT est 0,744 m d'où :

$$Sl_1 = 2(18,9 + 13) 10^{-3} \cdot 0,744 \cdot 24 = 1,1346 \text{ m}^2$$

Surface latérale des huit écarteurs.

$$2 \cdot 18,9 \cdot 20 \cdot 8 = 6048 \text{ mm}^2 = 60,48 \text{ cm}^2$$

Surface latérale des supports des écarteurs.

$$40,4 \cdot 1 \cdot 8 = 323,2 \text{ cm}^2$$

Surface en contact de l'huile pour la basse tension.

$$Ssh_{BT} = 11346 - 60,48 - 323,2 = 10962,32 \text{ cm}^2$$

2) Section latérale des bobines HT.

Nous avons 31 bobines de dimension 7,48 mm / 28,21 mm. La longueur moyenne de la spire est 0,958 m. La surface est donc :

$$Sb_{HT} = 2(7,48 + 28,21) 10^{-3} \cdot 0,958 \cdot 31 = 21120 \text{ cm}^2$$

Surface des écarteurs HT .

$$2 \cdot 28,21 \cdot 20 \cdot 8 = 9027,2 \text{ mm}^2 = 90,27 \text{ cm}^2$$

Surface des supports des écarteurs

$$40,4 \cdot 1 \cdot 8 = 323,2 \text{ cm}^2$$

Surface au contact de l'huile pour la haute tension.

$$Sch_{HT} = 21120 - 90,27 - 323,2 = 20706,53 \text{ cm}^2$$

On peut calculer les pertes par unité de surface :

Pour les trois enroulements BT on a :

$$q_{BT} = 290,6 / 10962,32 = 2089 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2 = 2089 \text{ W/m}^2$$

Pour un enroulement BT on aura :

$$2089 / 3 = 696 \text{ W/m}^2$$

Pour les trois enroulements HT on a :

$$q_{HT} = 3275,53 / 20706,53 = 0,1582 \text{ W/cm}^2 = 1582 \text{ W/m}^2$$

Connaissant t, calculons les temperatures des enroulements :

La temperature est donnée par:

$$t_{cu} = \xi_{cu} + \vartheta + t_{air}$$

t_{air}: temperature de l'air = 35°C. ϑ = 50°C

ξ_{cu}: temperature spécifique = 25°C pour la BT
= 23°C pour la HT.

Ces données étant relatives à q = 1000W/m², repportons les à nos valeurs pour avoir ξ_{cu}.

$$\xi_{cuBT} = 696.25/1000 = 17,4^\circ C$$
$$\xi_{cuHT} = 527.23/1000 = 12,12^\circ C$$

On peut dès lors calculer la température des enroulements :

$$t_{cuBT} = 17,4 + 50 + 35 = 102,4^\circ C$$
$$t_{cuHT} = 12,12 + 50 + 35 = 97,12^\circ C.$$

Ces valeurs sont inférieures aux valeurs maximales admissibles qui sont de l'ordre de 105 à 110°C.

FORCES MECANIQUES.

Le courant de court circuit stabilisé i_{ccs} est donné par:

$$i_{ccs} = I_n \cdot 100 / U_{cc\%}$$

Appliquons cette formule pour laB T et LA HT, on obtient:

$$i_{ccBT} = I_{nBT} \cdot 100 / U_{cc} = 607,75 \cdot 100 / 4,58 = 13\,269,65A.$$

$$i_{ccHT} = I_{nHT} \cdot 100 / U_{cc} = 38,49 \cdot 100 / 4,58 = 840,4A.$$

Calculons le courant de CC maximal correspondant donné par :

$$I_{ccsmax} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{ccs}$$

K_m : coefficient donné par:

$$K_m = 1 + e^{-\pi R_{cc} / X_{cc}}$$

$$R_{cc} = R_1 + R'_2 = 1,119 \text{ ohm.}$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2$$

Déterminons donc X_{cc} : la réactance de fuite .

On a :

$$V_{cc} = Z_{cc} I_{cn} = 158,8 \text{ V}$$

$$Z_{cc} = 158,8 : 38,49 = 4,125 \text{ ohm.}$$

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} =$$

$$X_{cc} = \left(Z_{cc}^2 - R_{cc}^2 \right)^{1/2} = 3,97 \text{ ohm.}$$

D'où K_m

$$K_m = 1 + e^{-\pi \cdot 1,119 / 3,97} = 1 + 0,757 = 1,757$$

Donc:

$$I_{ccsmaxBT} = 1,4142 \cdot 1,757 \cdot 13\,269,65 = 32\,971,75A.$$

$$I_{ccsmaxHT} = 1,4142 \cdot 1,757 \cdot 840,4 = 2\,088,18A.$$

On peut alors calculer les forces radiales données par la formule empirique:

$$F_r = 6,4 \cdot (I_{ccmax} \cdot N)^2 \cdot L_{sp} \cdot K_r \cdot 10^{-8} / H.$$

N : nombre de spires; H : hauteur de l'enroulement.

$$K_r = 1 - \sigma + 0,35 \cdot \sigma^2$$

$$\sigma = a_{12} + a_1 + A_2 / .H.$$

a_{12} : distance HT/BT a_1, a_2 dimensions radiales des bobines

$$\sigma = (11 + 18,9 + 28,2) / 3,14 \cdot 404 = 0,0458$$

$$K_r = 1 - 0,0458 + 0,35 \cdot 0,0458^2 = 0,95$$

On tire:

$$F_{rBT} = 6,4 (32\,971,75 \cdot 24)^2 \cdot 0,741 \cdot 0,95 \cdot 10^{-8} / 0,404 = 69\,830,77 \text{ Kgf}$$

$$F_{rHT} = 6,4 (2\,088,18 \cdot 369)^2 \cdot 0,958 \cdot 0,95 \cdot 10^{-8} / 0,404 = 85\,600,5 \text{ Kgf.}$$

Connaissant ces forces, on peut déduire les résistances σ' admissibles

$$\sigma' = Fr/2.3, 14.N.S.$$

S: section du cuivre = I/J

N : nombre de spires

Calculons la section Scu_{BT} :

$$Scu_{BT} = 607,75/3,3.10^6 = 202,6.10^{-6} m^2 = 2,026 cm^2$$

De même on a : Scu_{HT}

$$Scu_{HT} = 38,49/3,3.10^6 = 11,66.10^{-6} m^2 = 0,116 cm^2 .$$

Donc :

$$\sigma'_{BT} = 69830,77/2.3,14.2.2,026 = 228,68 Kgf/cm^2.$$

$$\sigma'_{HT} = 85600,5./2.3,14.369.0,116 = 318,44 Kgf/cm^2.$$

A partir des forces radiales, on déduit les forces axiales selon:

$$Fax = Fr.a_r./2.H_n$$

H_n : hauteur du noyau;

$$a_r = (a_1 + a_2)/3 + a_{12} = 26,7.10^{-3} m.$$

POUR LA B.T. on aura:

$$F_{axBT} = 69830,77.26,7.10^{-3}/2.0,444 = 2099,64 Kgf.$$

Pour LA H.T. on aura:

$$F_{axHT} = 85600,5.26,7.10^{-3}/2.0,444 = 2573,8 Kgf.$$

Les contraintes σ_{ca} se déduisent à partir de:

$$\sigma_{ca} = Fax/n_d.a.b.$$

n_d : nombre d'écarteurs = 8.

a.b: section de l'écarteur; en appliquant ceci on obtient :

$$\sigma_{caBT} = 2099,64/8.18,9.20.10^{-2} = 69,43 Kgf/cm^2.$$

$$\sigma_{caHT} = 2573,8/8.28,21.20.10^{-2} = 57,02 Kgf/cm^2.$$

Ces contraintes sont largement inférieures aux valeurs maximales admissibles.

1) CALCUL DU RENDEMENT.

Comme signalé dans l'étude théorique le rendement du transformateur est donné par :

$$R\% = \left[1 - \frac{P_o + K^2 \cdot P_{cc}}{K \cdot P_n \cdot \cos \varphi_2 + P_o + K^2 \cdot P_{cc}} \right] 100.$$

$P_n = 400 \text{ KVA}$; $P_o = 2,3 \text{ KW}$; $P_{cc} = 5,566 \text{ KW}$.

K : coefficient de charge.

Pour un coefficient donné, on calcule le rendement dans le cas d'une charge résistive et d'une charge réactive.

$\cos \varphi_2 = 0,8$.

K	P_o	$K^2 \cdot P_{cc}$	$P_2 = K \cdot P_n \cdot \cos \varphi_2$	$P_o + K^2 \cdot P_{cc}$	R%
1/4	2,3	0,3478	80	2,6478	96,8.
1/2	2,3	1,3915	160	3,6915	97,74
3/4	2,3	3,1308	240	5,4308	97,79
1	2,3	5,566	320	7,866	97,60

$\cos \varphi_2 = 1$.

1/4	2,3	0,3478	100	2,6478	97,42
1/2	2,3	1,3915	200	3,6915	98,19
3/4	2,3	3,1308	300	5,4308	98,22
1	2,3	5,566	400	7,866	98,07

Comme on pourrait le remarquer le rendement est assez élevé. Pour de plus grande puissance, il pourrait être de l'ordre de 99,9%.

2) CARACTERISTIQUE EXTERNE $U_2 = f(I_2)$, $\cos \varphi_2$ variable.

Pour établir cette caractéristique on utilise la méthode analytique:

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

On néglige le terme:

$$\frac{\alpha^2}{200} (U_{cc} \cos^2 \varphi_2 - U_{cc} \sin^2 \varphi_2)$$

La tension aux bornes du secondaire est:

$$U_2 = U_1 (1 - \Delta U/100)$$

$$U_1 = N_2 \cdot U_1 / N_1 = 6000 \cdot 24 / 369 = 390 \text{ V}$$

Déterminons les composantes active et réactive : U_{cca} , U_{ccr} .

On sait que: $U_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2}$

Par définition :

$U_{cca} = P_{cc}/10 \cdot P_n$ P_{cc} en W P_n en KVA.

Donc

$U_{cca} = 3275,5 + 2290,6 / 10 \cdot 400 = 1,39\%$

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

$U_{ccr} = \sqrt{4,58^2 - 1,39^2} = 4,36\%$

$\cos \varphi_2 = 1 \implies \sin \varphi_2 = 0 \implies AU\% = U_{cca} = 1,39\%$

$\cos \varphi_2 = 0,8$ inductif $AU\% = (0,8U_{cca} + 0,6 U_{ccr})$.

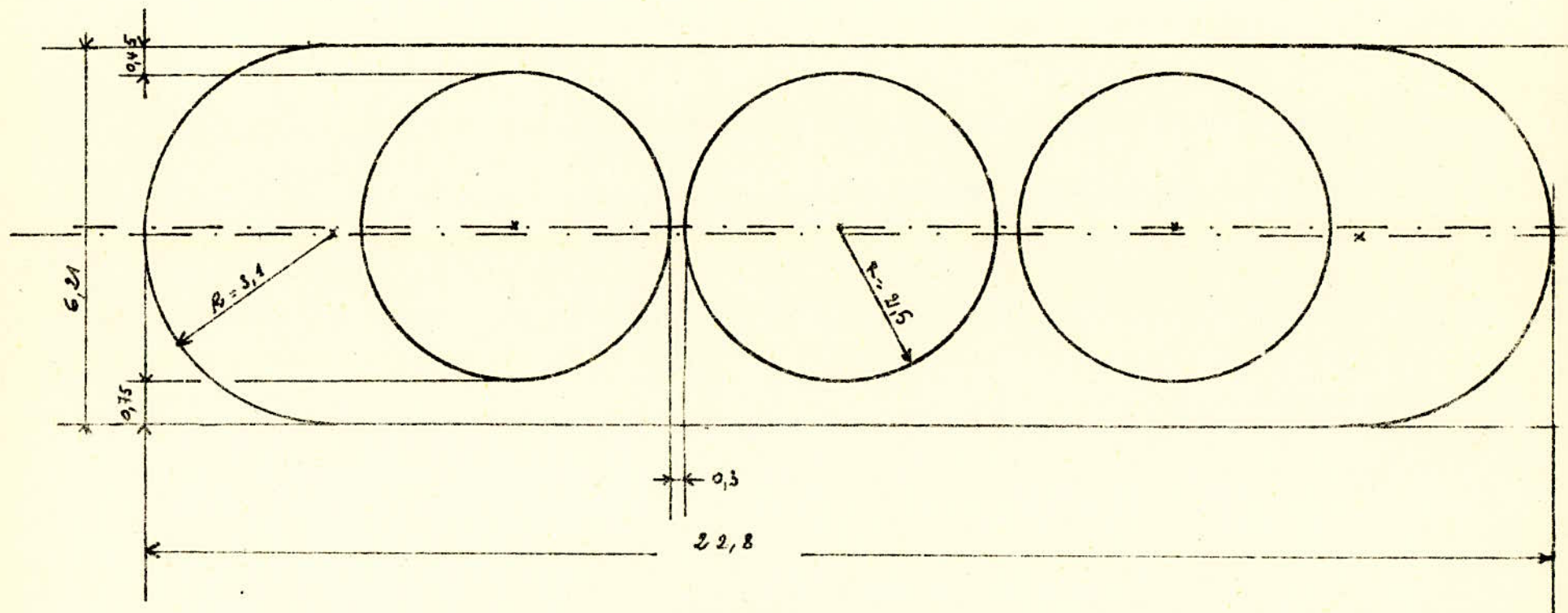
$\cos \varphi_2 = 0,8$ capacitif $AU\% = (0,8U_{cca} - 0,6 U_{ccr})$.

Ainsi on établit le tableau suivant:

$\cos \varphi_2$	$\alpha = I_2/I_n$	AU%	$AU = AU\% \cdot U_1 / 100$	$U_2 = U_1 \cdot [1 - AU/100]$ en volts
1	0,25	0,35	1,36	385
1	0,5	0,69	2,69	379
1	0,75	1,04	4,06	374
1	1	1,39	5,4	369
1	1,25	1,74	6,79	364
0,8 ind.	0,25	0,93	0,36	388,6
"	0,5	1,86	7,25	361,7
"	0,75	2,8	10,9	347,5
"	1	3,73	14,55	333,3
"	1,25	4,66	18,17	319
0,8 capa.	0,25	-0,4	-1,56	396,1
"	0,50	-0,75	-2,93	401,4
"	0,75	-1,13	-4,41	407,2
"	1	-1,5	-5,85	412,8
"	1,25	-1,87	-7,3	418,5

Ce tableau établi on remarque que:

- 1) 1). Dans le cas d'une charge résistive ,la tension secondaire moyenne reste voisine de la tension nominale.
- 2). Dans le cas d'une charge inductive,la moyenne est nettement inférieure à la tension secondaire.
- 3).Par contre avec une charge capacitive la moyenne est supérieure à la tension nominale.



FOND DE LA CUVE.

DONNÉES EN CM.

Ech. $\frac{1}{30}$

VII 1) DIMENSIONNEMENT DE LA CUVE.

Largeur L_1 . $L_1 = d_1 + d_2 + D_{\text{exHT}}$

avec : $d_1 = 30 \text{ mm}$; $d_2 = 50 \text{ mm}$: distances enroulement HT -
parois de la culasse.

D_{exHT} : diamètre extérieur de l'enroulement HT :

$$D_{\text{exHT}} = 210 + 2(3,5 + 18,9 + 11 + 28,21) = 333,22 \text{ mm}$$

$$L_1 = 30 + 50 + 333,22 = 414 \text{ mm}$$

Le rayon R_c de courbure est donné par :

$$R_c = L_1/2 = 207 \text{ mm}$$

Longueur L_2 . $L_2 = 3 D_{\text{exHT}} + 2 D_{\text{HT/HT}} + 2R_c$

avec : $D_{\text{HT/HT}} = \text{distance HT/HT} = 19,6 \text{ mm}$

$$L_2 = 3 \cdot 333,22 + 2 \cdot 19,6 + 414 = 1453 \text{ mm}$$

Hauteur totale du transformateur : H_{tt}

$$H_{\text{tt}} = H_n + 2 H_{\text{jc}} + d'_1 + d'_2$$

$d'_1 = 45 \text{ mm}$; $d'_2 = 350 \text{ mm}$: distances d'isolation

$$H_{\text{tt}} = 444 + 2 \cdot 206,6 + 45 + 350 = 1252,2 \text{ mm}$$

On prendra pour commodité $H_{\text{tt}} = 1260 \text{ mm}$

Surface au contact de l'huile S_{ch} .

Elle est égale à $S_{\text{ch}} = S_{\text{B1}} + S_{\text{cp}} + S_{\text{Lc}}$

avec S_{B1} = surface de base ; S_{cp} : surface du capot

S_{Lc} : surface latérale de la cuve.

$$S_{\text{B1}} = (3 \cdot D_{\text{exHT}} + 2 D_{\text{HT/HT}}) \cdot L_1 + \pi R^2 = 0,1346 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{cp}} = S_{\text{B1}} / 2 = 0,0673 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{Lc}} = (2(3 D_{\text{exHT}} + 2 D_{\text{HT/HT}}) + 2 \pi R) H_{\text{tt}}$$

$$S_{\text{Lc}} = (2(3 \cdot 333,22 + 2 \cdot 19,6) + 2 \cdot 3,14 \cdot 207) \cdot 1260$$

$$S_{\text{Lc}} = 4,2538 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{ch}} = 0,1346 + 0,0673 + 4,2538 = 4,4557 \text{ m}^2$$

Calcul de q par unité de surface et par degré Celsius.

$$q_c = \frac{\Sigma P}{S_{\text{ch}}} \cdot \Delta$$

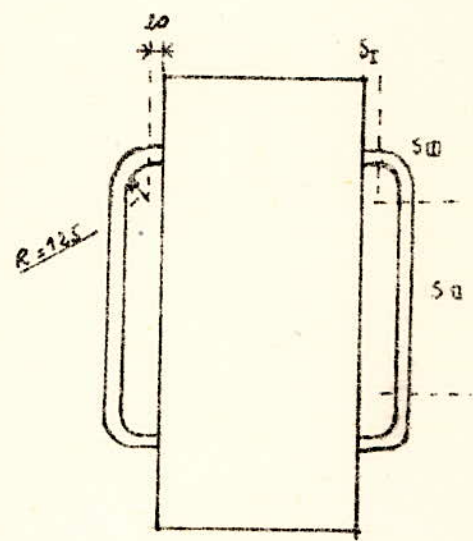
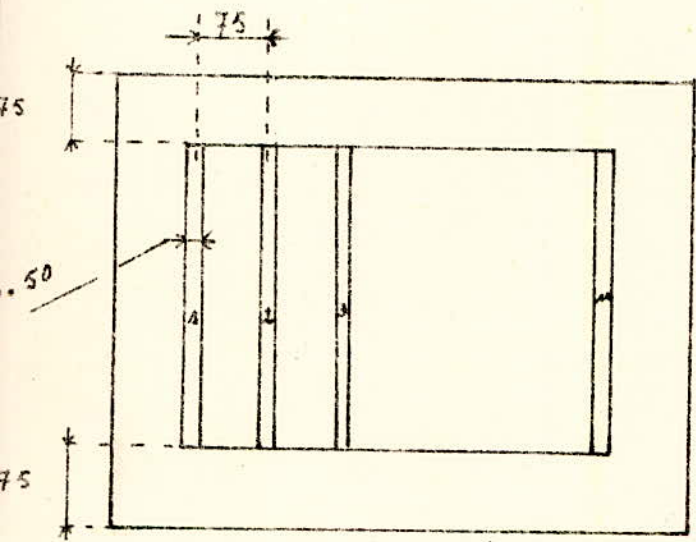
$$\Sigma P = 5566 + 2300 = 7866 \text{ W}$$

$$\Delta = 50^\circ \text{ C}$$

$$q_c = 7866 / 4,4557 \cdot 50 = 35,3 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ D}^\circ \text{ C}$$

Or pour la cuve lisse on a q_c égal environ à $13,5 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ D}^\circ \text{ C}$.

DIMENSIONNEMENT DES CONDUITES



Comme 35,3 est nettement plus grand que 13,5 alors on ajoute des conduites pour circulation d'huile.;

Dimension des conduites (voir schéma).

Conformément aux normes on a

$$\begin{aligned} H_{ex} &= H_{tt} - 2 \cdot 75 ; H_{ex} : \text{hauteur extérieure} \\ &= 1\ 260 - 2 \cdot 75 = 1\ 110 \text{ mm} = 1,11 \text{ m} \end{aligned}$$

Le diamètre d'une conduite est de 50 mm, donc $R = 25 \text{ mm}$

Calculons la section d'une conduite : on divise la section en trois

parties et qu'on calcule :

$$S_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 760 = 238\ 640 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = 4 \cdot 20 \cdot 3,14 \cdot 50 = 12560 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = 3,14 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 3,14 (125 - 25) = 147\ 894 \text{ mm}^2$$

La section de convection d'une conduite est donc :

$$S = 2(238\ 640 + 12\ 560 + 147\ 894) \cdot 10^{-6} = 0,8 \text{ m}^2$$

Nombre de conduites possible à placer sur les parties frontales :

$$(L_2 - L_1) / 75 = 13 \quad \text{Prenons 11 conduites.}$$

Section de ces 11 conduites :

$$0,8 \cdot 11 = 8,8 \text{ m}^2$$

Section totale en contact avec l'huile : S_{tch}

$$\begin{aligned} S_{tch} &= S_{ch} + S_{11} \\ &= 4,4\ 557 + 8,8 = 13,2\ 557 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Les pertes évacuées par unité de surface et par degré Celsius q sont

$$q = 7866 / 13,2\ 557 \cdot 50 = 11,8 \text{ W / m}^2 \text{ D}^\circ\text{C}$$

Cette valeur est inférieure à la limite admise, donc 11 conduites suffiront .

Les 11 conduites ont une capacité de :

$$8,8 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 440 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 440 \text{ dm}^3$$

Le poids de cette huile est :

$$0,9 \cdot 440 = 396 \text{ kg}$$

Le poids du métal des 11 conduites de 6 mm d'épaisseur est donc :

$$8,8 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 412 \text{ kg.}$$

2) CALCUL THERMIQUE DE LA CUVE.

En moyenne la température admissible de l'enroulement à la charge nominale est de 70°C . La température moyenne admissible de l'huile par rapport au milieu environnant est donnée par :

$$\theta_h = 70^{\circ} - T_1^{\circ}\text{C} \quad \text{avec } T_1^{\circ}\text{C} = 26^{\circ}\text{C} \quad \text{donc :}$$

$$\theta_h = 70 - 26 = 44^{\circ}\text{C}$$

La température moyenne des parois de la cuve par rapport au milieu environnant est :

$$\theta_c = \theta_h - \theta_o \quad \text{avec } \theta_o \text{ chute de température} = 5^{\circ}\text{C}$$

donc $\theta_c =$. $\theta_c = 44 - 5 = 39^{\circ}\text{C}$

La valeur de θ_c DOIT VERIFIER :

$$(\theta_c + \theta_o) \cdot \psi \leq 60^{\circ}\text{C}$$

est un coefficient qui tient compte de la répartition de la température. On prend $\psi = 1,2$

$$(\theta_c + \theta_o) \cdot 1,2 \leq 60^{\circ}\text{C}$$

$$(39 + 5) \cdot 1,2 \leq 60^{\circ}\text{C}$$

$$52,8^{\circ}\text{C} \leq 60^{\circ}\text{C}$$

.....

CONSERVATEUR : VOLUME ET POIDS D'HUILE .

De forme cylindrique, le conservateur d'huile est placé le long de la largeur du capot et sert à conserver l'huile dilatée dans la cuve. La communication avec la cuve se fait par une conduite qui entre à l'intérieur du conservateur afin d'avoir un bon écoulement. Une deuxième "conduite" assure la communication de la partie supérieure avec l'extérieur. Le long de cette conduite on dispose un filtre pour sécher l'air. Un indicateur de niveau permet de vérifier le volume d'huile. La capacité du conservateur doit être telle qu'il puisse contenir l'huile dilatée quel que soit le régime de fonctionnement.

Le poids du transformateur sans la cuve est : G_{sc}

$$G_{sd} = 1,2 (P_t + G_t) \quad \text{avec } P_t : \text{ poids total du cu.}$$

$$G_t : \text{ poids total d'acier}$$

On a donc :

$$G_t = 512,51 + 347,01 = 859,52 \text{ kg}$$

$$P_t = 110,05 + 96,15 = 206,2 \text{ kg}$$

donc :

$$G_{sc} = 1,2 (859,52 + 206,2) = 1\,278,86 \text{ kg}$$

Le volume V' correspondant est approximativement :

$$V' = G_{sc} / \gamma \quad \gamma = 5,5 \text{ à } 6 \text{ kg} / \text{dm}^3$$

Prenons $\gamma = 6$ on a :

$$V' = 1\,278,86 / 6 = 213,14 \text{ dm}^3$$

Le volume d'huile V_h est donné par :

$$V_h = V_c - V' \quad V_c : \text{ volume de la cuve}$$

$$V_c = 2 H_c (D_{exHT} + A_{22}) L_1 + \pi (L_1/2)^2 H_c$$

H_c : hauteur de la cuve = 1,26 m

A_{22} : distance HT/HT

$$V_c = 2 \cdot 1,26 \cdot 352,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,414 + 3,14 \cdot 0,414 \cdot 1,26 / 2 = 1,187 \text{ m}^3 \quad \text{d'où}$$

$$V_h = 1,187 - 0,213 = 0,974 \text{ m}^3$$

Le poids d'huile est donc P_h :

$$P_h = 0,9 V_h = 0,9 \cdot 0,974 \cdot 10^3 = 876,6 \text{ kg}$$

Le volume du conservateur est égal à : $(0,07 \text{ à } 0,1) V_h$ Prenons $0,1 V_h$

$$V_{cons} = 0,1 \cdot 974 = 97,4 \text{ dm}^3$$

La longueur du conservateur L_{cons} est telle que : $L_{cons} = L_2$

Prenons $L_{cons} = 1,4 \text{ m}$; on peut déduire le diamètre du conserva-

$$\text{teur } D_{cons} : \quad D_{cons} = \sqrt{4 V_{cons} \cdot 10^3 / L_{cons}}$$

$$D_{cons} = \sqrt{4 \cdot 97,4 \cdot 10^3 / 3,14 \cdot 1,40} = 29,76 \text{ cm}$$

IX - RESISTANCE MECANIQUE DE LA CUVE.

La cuve, une fois construite, doit présenter une bonne résistance mécanique, afin de supporter le poids du transformateur, de l'huile etc;,. Pour l'étudier, on la décompose en trois parties pour lesquelles on fait une étude à part.

I- RESISTANCE MECANIQUE DE LA PARTIE CYLINDRIQUE.

Cette partie doit être stable par rapport à la pression extérieure. On détermine la pression critique qui doit être supérieure de 4 à 5 fois la pression extérieure. Cette pression critique dépend du rapport de l'épaisseur des parois h au rayon r de la partie cylindrique, d'une part, et du rapport de la hauteur l des parties cylindriques au même rayon r , d'autre part. Si la pression critique est quatre fois plus petite que la pression extérieure, on renforcera la partie cylindrique avec des profilés. La pression critique P_{cr} augmente avec h/r et diminue avec l/r . Comme pression extérieure on prend : $0,5 \text{ kg/cm}^2 = P_{ex}$

Pour h , on prendra: 5mm: épaisseur des parois.

Pour r , on a: 20,7cm: moitié de la largeur du capot.

La hauteur propre h_d du transformateur (sans la cuve) est:

$$h_d = d'_1 + 2h_j + H_n.$$

d'_1 : 45mm : distance fond de la cuve -- culasse inférieure.

$$h_d = 4,5 + 2 \cdot 20,66 + 44,4 = 90,22 \text{ cm.}$$

Le rapport h_d/r nous donne :

$$h_d/r = 90,22/20,7 = 4,358$$

Faisons : $100h/r$:

$$100 \cdot 0,5/20,7 = 2,415$$

La pression critique correspondante est: $P_{cr} = 8,1 \text{ Kg/cm}^2$.

Le coefficient de résistance mécanique C est alors :

$$C = P_{cr}/P_{ex} = 8,1/0,5 = 16,2.$$

II)- RESISTANCE MECANIQUE DE LA PARTIE PLANE DE LA CUVE.

On détermine la sollicitation maximale et la flèche de la partie rectangulaire de la cuve .

Calculons L_2/H_{tt} : $L_2/H_{tt} = 1,453/1,26 = 1,15$.

Calculons L' et H' : $b_p = 12 \text{ cm}$ pour isolation .

$$L' = 1/2(L_2 - b_p) = 1/2(145,3 - 12) = 66,65 \text{ cm.}$$

$$H' = 1/2(H_{tt} - b_p) = 1/2(126 - 12) = 57 \text{ cm.}$$

Le rapport de ces deux valeurs doit être inférieur à 3.

$$L'/H' = 66,65 / 57 = 1,17. < 3.$$

La flèche des parois planes est déterminée à partir de:

$$f^3 + \beta t^2 \cdot f = P_{\text{ex}} \cdot L'^4 \gamma / 15 t \cdot 10^6$$

f : flèche ; t = 6 mm : épaisseur des parois de la cuve.

$\beta = 0,476$: dépendent du rapport L'/H'

$\gamma = 0,092$

$$f^3 + 0,476 \cdot 0,6^2 \cdot f = 0,5 \cdot 66,65^4 \cdot 0,092 / 15 \cdot 0,6 \cdot 10^6$$

$$f = 0,15 \text{ cm} : \text{cette flèche est inférieure au double des}$$

parois (épaisseur).

La pression inférieure dans les parois planes ne doit pas excéder $1\ 500 \text{ kg} / \text{cm}^2$. Pour la pression extérieure la flèche des parties planes ne doit pas dépasser le double de l'épaisseur de ces dernières.

La sollicitation dans cette paroi est donnée par :

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_y - 0,35 \sigma_x \\ \sigma_x &= 1,064 \cdot 10^6 (4 H'^2 + L'^2) / L'^2 H'^2 \\ \sigma_x &= 1,064 \cdot 10^6 (4 \cdot 57^2 + 66,65^2 / 57^2 \cdot 66,65^2) \\ \sigma_x &= 1\ 285,5 \text{ kg} / \text{cm}^2 \\ \sigma_y &= 1,064 \cdot 10^6 (4 L'^2 + H'^2) / L'^2 H'^2 \\ \sigma_y &= 1,064 \cdot 10^6 (4 \cdot 66,65^2 + 57^2) / 57^2 \cdot 66,65^2 \\ \sigma_y &= 1\ 549,4 \text{ kg} / \text{cm}^2 \\ \sigma &= 1\ 549,4 - 0,35 \cdot 1\ 285,5 = 1\ 099,4 \text{ kg} / \text{cm}^2 \end{aligned}$$

Par rapport à cette sollicitation intérieure la sollicitation extérieure augmente de 15 %. Soit donc : σ'

$$\sigma' = 1\ 099,4 \cdot 115 / 100 = 1\ 264,3 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

III) - FOND DE LA CUVE.

Le fond supporte non seulement le poids du transformateur proprement dit mais aussi celui de l'huile. Il doit donc présenter une résistance conséquente. Le fond est oval, mais le calcul se fait comme si on avait affaire à une plaque rectangulaire $L_1 \cdot L_2$ la sollicitation est donnée par :

$$\sigma = 0,375 \cdot P \cdot L_1 \cdot L_2 / t^2 (L_1^2 + L_2^2)$$

P : POIDS de la partie dévuable ; t = 10 mm épaisseur des parois du fond de la cuve.

Sous la charge du transformateur le fond de la cuve fléchit et tous les efforts sont transmis aux pointes de soudure du fond de la cuve sur la cuve latérale. Cette sollicitation ne doit pas dépasser $1\ 000 \text{ kg} / \text{cm}^2$.

$$\sigma = 0,375 (1\,278,86 + 876,6) \cdot 41,4 \cdot 145,3 / (41,4^2 + 145,3^2) \cdot 1^2 = 213 \text{ kg/cm}^2$$

La flèche correspondante est :

$$f = 0,036 \cdot P \cdot L_1^2 \cdot L_2^2 / E \cdot t^3 (L_1^2 + L_2^2)$$

$E = 2 \cdot 10^6 / \text{cm}^2$: module d'élasticité.

$$F = 0,036 \cdot 2\,155,46 \cdot 41,4^2 \cdot 145,3^2 / 2 \cdot 10^6 (41,4^2 + 145,3^2) = 0,6 \text{ mm}$$

4) FORCE DE COMPRESSION.

De part et d'autre des colonnes on a deux joints de culasse que l'on fixe à l'aide de vis et d'écrous. Ces vis et ces écrous, une fois fixés, transmettent les forces nécessaires pour le serrage des tôles. La force totale de compression F_c est donnée par :

$$F_c = q h_j \cdot b_j ; \quad q : \text{pression} = 3 \text{ kgf/cm}^2$$

$$F_c = 3 \cdot 17,4 \cdot 20,66 = 1078,45 \text{ kgf}$$

En prenant six éléments on aura pour chacun une force F'_c :

$$F'_c = F_c / 6 = 1\,078,45 / 6 = 179,7 \text{ kgf}$$

Avec $\sigma_a = 1\,000 \text{ kgf/cm}^2$ comme contrainte admissible, on tire la section S_b du boulon.

$$S_b = F'_c / \sigma_a = 179,7 / 1000 = 0,1797 \text{ donc le diamètre est : } d_b = \sqrt{4 \cdot S_b / \pi} = 4,7 \text{ mm}$$

5) P O I D S D U T R A N S F O R M A T E U R .

Le poids du transformateur est la somme totale des différents poids de la partie décuvable, du conservateur, de la cuve etc...

Poids du conservateur.

$$\text{Il est de la forme : } P_{\text{cons}} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L_{\text{cons}} \cdot e \cdot \gamma \cdot 10^{-3}$$

R : rayon de la section du conservateur

$e = 5 \text{ mm}$: épaisseur du conservateur $\gamma = 7,8 \text{ kg/dm}^3 = \text{densité}$

$$P_{\text{cons}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 14,15 \cdot 140 \cdot 0,5 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 48,52 \text{ kg}$$

Poids de la cuve.

$$1^\circ - \text{Poids du fond : } P_n = L_1 \cdot L_2 \cdot \gamma_{\text{fe}} \cdot t = 41,4 \cdot 145,3 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 46,9 \text{ kg}$$

$$2^\circ - \text{Poids surf ace latérale : } P_2 = S_{\text{cl}} \cdot t \cdot \gamma_{\text{fe}} = 42538 \cdot 0,6 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 199,08 \text{ kg}$$

$$3^\circ \text{ Poids du capot : } P_3 = S_{\text{cap}} \cdot t \cdot \gamma_{\text{fe}} = 673 \cdot 1 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 5,25 \text{ kg}$$

$$\text{Poids de la cuve : } 46,9 + 199,08 + 5,25 = 251 \text{ kg}$$

Poids du transformateur :

$$1278,86 + 876,6 + 48,52 + 251 + 396 + 412 = 3\,263 \text{ kg.}$$

.....

B I B L I O G R A P H I E .
=====

I°) M. KOSTENKO & L. PIOTROVSKI :

Machines électriques : Tomes 1&2
Editions Mir Moscou 1969.

II°) M. LIWSCHITZ :

Calcul des machines électriques : Tomes 1&2
Editions Spes LAUSANNE
" Bordas PARIS 1967 1970.

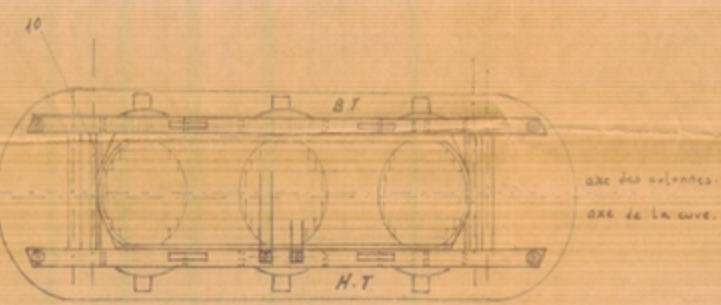
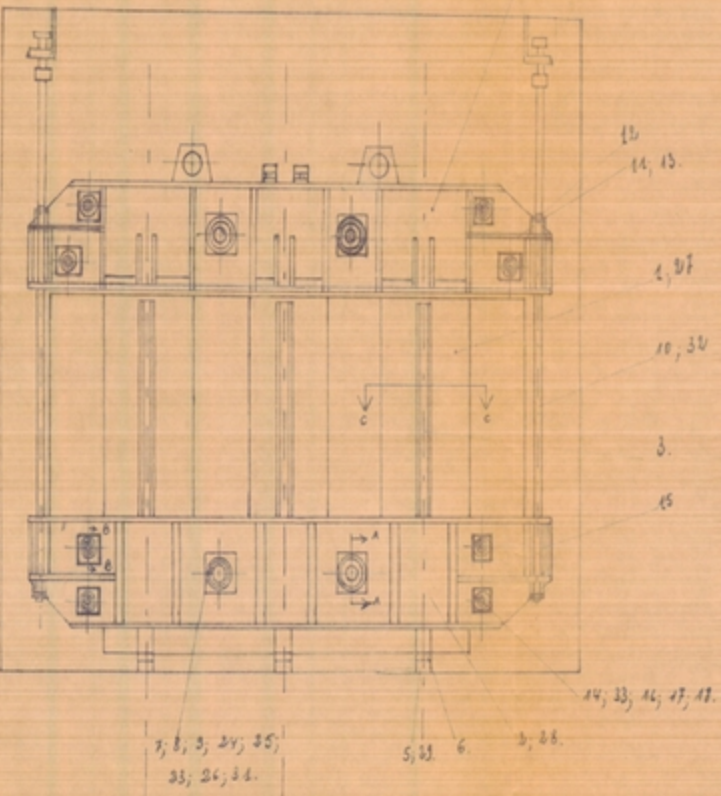
III°) A. CURCHOD & L. VELLARD :

Mémento d'électrotechnique : Tome II
Editions Dunod 1950 .

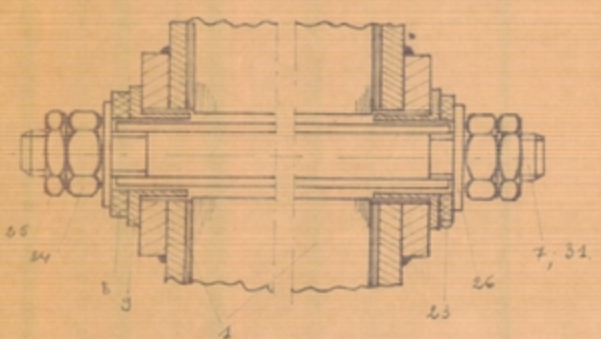
IV°) N.I. BULGACOV :

Calculul Transformatorilor
Editura tehnica BUCURESTI 1951 .

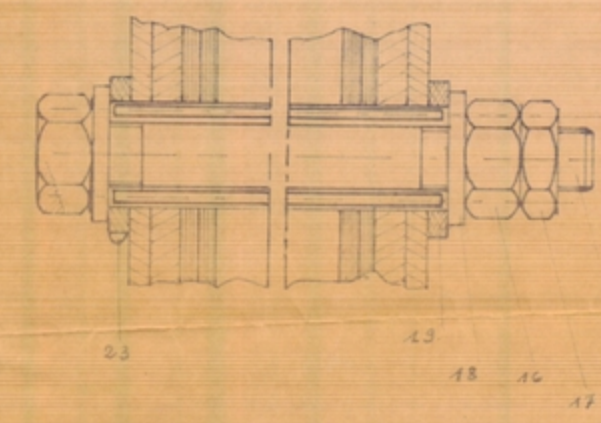
Pièces	Désignation
35	Tige de serrage II
34	" " I
33	Boulon de serrage latéral
32	Tige
31	Boulon de serrage de la culasse.
30	Samelle d'isolation
29	Samelle
28	Ensemble squelette
27	noyau
26	Rondelle brute A. 23.
25	Ecrou Spécial
24	" "
23	Tige pour mise à la masse.
22	Tige de serrage II.
21	" " I
20	Boulon
19	Rondelle isolante.
18	Rondelle brute A. 23.
17	Ecrou A. M. 20
16	" "
15	Tige isolante.
14	Boulon de serrage latéral.
13	Rondelle brute A. 23.
12	Ecrou A. M. 24.
11	" "
10	Tige.
9	Rondelle Spécial
8	" isolante
7	Boulon de serrage de la culasse.
6	Samelle isolante.
5	Samelle
4	Isolation de la culasse supérieure
3	Plaque de serrage de la colonne.
2	Ensemble Squelette.
1	Noyau.



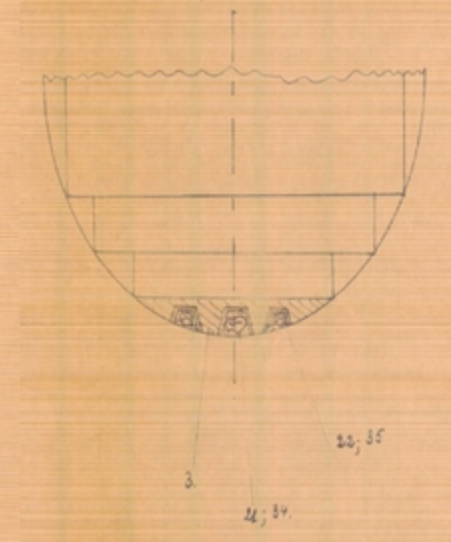
Section A.A. échelle: 1/2.
Serrage de la culasse.



Section B.B. échelle 1/2.
Serrage de la culasse.



Section C.C. échelle: 1/2.
Serrage de la colonne.



Ecole Nationale Polytechnique. *Des Electricité.*
 Juin 1975.
 Dessiné par: A. OUBASSI
 Vérifié par: V. STIRBU
 Echelle: 1/20
 Transformateur: 100 kVA

SQUELETTE DU TRANSFORMATEUR.