

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMARI de TIZI-OUZOU
Faculté du Génie Electrique et d'Informatique
Département d'électrotechnique



Mémoire de fin d'études

*En vue d'obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique*
Option : Machines électriques

Thème

*Calcul et dimensionnement d'un
autotransformateur triphasé à trois
enroulements 32MVA
230KV/121KV/38,5KV*

Proposé et dirigé par :

M^r : BELASSEL

Etudié par :

M^{lle}: AOUD FATMA
M^{lle}: LARABI FAZIA

Promotion 2009

Remerciements

Nous tenons à remercier notre promoteur Docteur BELASSEL (enseignant à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou) d'avoir bien voulu nous encadrer et pour son aide et ces conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer pour l'aboutissement de ce travail, qu'il trouve ici notre profonde gratitude de toute notre connaissance.

De même, nous remercions toutes les personnes ayant contribué de près et de loin pour la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

En fin nous tenons à remercier les membres de jury qui nous feront l'honneur d'examiner notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *Ma chère mère.*
- *Mon cher père.*
- *Mes tantes et mes oncles,*
- *Mes frères : Rabah et Yazid*
- *Mes sœurs : Saïda, ouardia, hassina, nawel et meriema et toute ma famille,*
- *Ma grand-mère à qui je souhaite une longue vie,*
- *A tous mes amis (es), avec qui j'ai passé des moments inoubliables.*

Fatma

Je dédie ce modeste travail à :

- *La mémoire de mon chère père. Malgré son absence.*
- *Ma chère mère.*
- *Mes frères.*
- *Mes sœurs.*
- *Mes neveux et nièces.*
- *A tous mes amis (es), et mes cousins(es).*
- *A tous les étudiants de la faculté qui nous ont aidés pour la réalisation de ce modeste travail.*

Fazia

Sommaire

Introduction Générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs

I.1. Définitions et principe de fonctionnement.....	2
I.1.1.Définition d'un transformateur	2
I.1.2.Définition d'un transformateur triphasé	2
I.1.3.Définition d'un autotransformateur	2
I.1.4.Principe de fonctionnement	2
I.2.Constitution d'un autotransformateur triphasé	3
I.2.1.Partie active	3
I.2.2.Partie constructive.....	5
I.3.Mode de couplage	7
I.4.Avantages et inconvénients d'un autotransformateur.....	7
I.5.L'utilité de l'enroulement tertiaire	8
I.6.Les paramètres industriels d'un transformateur	8
I.6.1.Les Paramètres technique.....	8
I.6.2.Les paramètres d'exploitation.....	9
I.6.3.Protection des transformateurs	10
I.6.3.1. Relais Buchholz.....	10
I.6.3.2.Thermomètre.....	10
I.6.3.3.Les éclateurs.....	10
I.6.3.4 .Renforcement de l'isolation.....	10
I.7.Processus d'échauffement	10
I.8.Mode de refroidissement	11

Chapitre II : Calcul électromagnétique

II.1.Introduction	13
II.2.Calcul préliminaire des dimensions principales	13
II.2.1.Puissance apparente par colonne	14
II.2.2.Courant dans les lignes	14
II.2.3.Courant dans les enroulements	14
II.2.4.Tension de phase	15
II.2.5.Tension des enroulements	15

II.2.6.Tension de court-circuit	15
II.2.7.Diamètre de la colonne.....	16
II.2.8.Diamètre de cancale de fuite	17
II.2.9.Hauteur approximative des enroulements	17
II.2.10.Section de fer.....	18
II.3.Calcul des enroulements	18
II.3.1.Tension de la spire	18
II.3.2.Nombre de spire.....	19
II.3.3.Recalcul de l'induction de crête.....	19
II.3.4.Calcul de la densité moyenne du courant	19
II.3.5.Choix des conducteurs et de type de l'enroulement tertiaire	20
II.3.6.Choix des conducteurs et de type de l'enroulement shunt.....	23
II.3.7.Choix des conducteurs et de type de l'enroulement série.....	25
II.3.8.Hauteur des enroulements série et shunt.....	26
II.3.9.Dimensionnement radial des enroulements.....	28
II.4.Dimensionnement du circuit magnétique	29
II.4.1.La longueur de la fenêtre	29
II.4.2.La hauteur de la fenêtre	29
II.4.3.La hauteur du noyau	29
II.4.4.La longueur entre axes des enroulements.....	29
II.4.5.La longueur de noyau	29
II.4.6.La section de la culasse	29
Résultats numériques	33

Chapitre III : Calcul des pertes et de rendement

III.1.Introduction	36
III.2.Pertes à vide	36
III.2.1.Poids du noyau	36
III.2.2.Poids des coins.....	36
III.2.3.Poids des culasses	36
III.2.4.Poids des colonnes	36
III.2.5.Pertes principale dans le noyau.....	37
III.2.6.Pertes supplémentaires.....	37
III.2.6.1.Pertes supplémentaires dans les coins	37

III.2.6.2. Pertes supplémentaires dans les colonnes et les culasses	37
III.2.6.3. Pertes fer totale	37
III.3. Pertes joules	38
III.3.1. Calcul des résistances des enroulements	38
III.3.1.1. Enroulement tertiaire	38
III.3.1.2. Enroulement shunt	38
III.3.1.3. Enroulement série	39
III.3.2. Pertes joules dans l'enroulement tertiaire	40
III.3.3. Pertes joules dans l'enroulement shunt	41
III.3.4. Pertes joules dans l'enroulement série	43
III.3.5. Pertes dans la cuve	44
III.3.6. Pertes joules totales	45
III.3.7. Erreurs relatives sur les pertes	45
III.4. Calcul des tensions de court-circuit	45
III.4.1. Erreur sur la tension de court-circuit	48
III.4.2. Calcul de rendement	48
Résultats numériques	50
 Chapitre IV : Calcul thermique	
IV.1. Introduction	53
IV.2. Echauffement du circuit magnétique	54
IV.2.1. Calcul des différentes températures longitudinale et transversale ..	54
IV.2.2. Echauffement maximum du circuit magnétique	55
IV.2.3. Échauffement moyen résultant du circuit magnétique	55
IV.3. Echauffement des enroulements	57
IV.3.1. Echauffement moyen de l'enroulement basse tension par rapport à l'huile	57
IV.3.2. Echauffement de l'enroulement série	62
IV.3.3. Echauffement de l'enroulement shunt	63
IV.4. Echauffement de l'huile	64
IV.4.1. Dimensionnement de la cuve	64
IV.5. Calcul du volume de l'huile	68
Résultats numériques	69
 Conclusion Générale	

Cahier des charges

Puissance nominale	$S_n = 32 \text{ MVA}$
Tension primaire	$U_{nHT} = 230 \text{ KV}$
Tension secondaire.....	$U_{nMT} = 121 \text{ KV}$
Tension tertiaire	$U_{nBT} = 38,5 \text{ KV}$
Tension de court-circuit entre primaire et secondaire	$U_{ccHM} = 11 \%$
Tension de court-circuit entre primaire et tertiaire.....	$U_{ccHB} = 34 \%$
Tension de court-circuit entre secondaire et tertiaire	$U_{ccMB} = 21 \%$
Pertes de court-circuit.....	$P_{cc} = 145 \text{ KW}$
Pertes à vide	$P_0 = 32 \text{ KW}$
Courant à vide	$I_0 = 0,6 \%$
Fréquence.....	$F=50 \text{ Hz}$

Introduction Générale

L'énergie emmagasinée dans la nature sous forme d'énergie chimique, nucléaire, de mouvement des fleuves, de vent et d'énergie de rayonnement de soleil est transformée dans le monde moderne en énergie électrique. La distribution de cette dernière fut obtenue par l'invention d'un ingénieux dispositif mis au point à la fin du XIX^{ème} siècle ; ce dispositif est le transformateur.

C'est un constituant essentiel des systèmes électriques modernes dont le rendement est excellent.

Les transformateurs ne servent pas seulement à faciliter le transport de l'électricité, ils interviennent également dans le fonctionnement de nombreux systèmes électriques. Ils varient suivant la puissance distribuée par ceux-ci et leur mode de fonctionnement on peut distinguer plusieurs types :

- les transformateurs de puissance.
- Les transformateurs d'essai.
- les transformateurs spéciaux...etc.

Le travail qui nous a été confié est de calculer un autotransformateur triphasé à trois enroulements de puissance apparente 32MVA à bain d'huile à partir de spécification technique imposée par le cahier des charges.

A cet égard, nous avons utilisé un programme informatique pouvant prendre en charge ces calculs afin d'éviter les calculs longs et fastidieux qu'un travail manuel ne serait réalisé.

La présente étude se divise en quatre chapitres : dans le premier nous avons donné des généralités et des définitions sur les transformateurs, dans le second nous avons effectué le calcul électromagnétique dont les résultats permettent de dimensionner les enroulements avec un calcul définitif et d'établir toutes les caractéristiques géométriques et électromagnétiques, dans le troisième chapitre nous avons calculé les différentes pertes et le rendement, dans le dernier chapitre nous avons effectué le calcul thermique . Et enfin on terminera notre travail par une conclusion générale.

I.1. Définition et principe de fonctionnement

I.1.1. Définition d'un transformateur

Les transformateurs sont des machines entièrement statiques qui transforment une tension et un courant alternatif en autre tension et un autre courant alternatif de même fréquence ; de valeur mieux adaptée au transport ou à la distribution de l'énergie électrique.

I.1.2. Définition d'un transformateur triphasé

Un transformateur triphasé est constitué par trois enroulements de phase formant le primaire et trois enroulements de phase formant le secondaire ; bobinés autour des trois colonnes d'un même circuit magnétique, il existe alors un couplage magnétique entre les enroulements.

I.1.3. Définition d'un autotransformateur

Un autotransformateur est un transformateur dans lequel l'un des enroulements est une fraction de l'autre, et toujours bobiné sur la même carcasse. Les enroulements primaire et secondaire ont plus d'un couplage magnétique ; une liaison électrique. Ces enroulements sont montés en série afin que leurs tensions s'ajoutent.

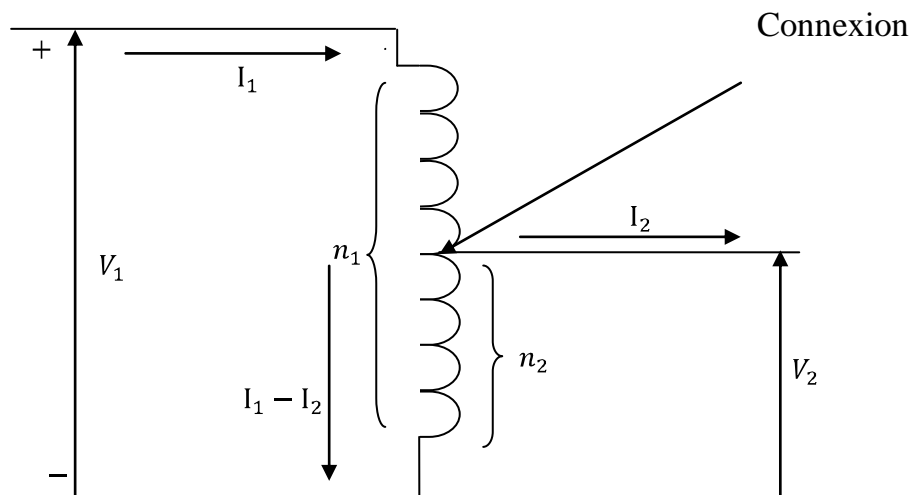


Fig. I.1. Autotransformateur

I.1.4.Principe de fonctionnement

Un transformateur est constitué d'un circuit ferromagnétique fermé portant plusieurs enroulements sans liaison conductrice. L'un des enroulements, nommé primaire est alimenté par une source de tension alternative sinusoïdale, un flux magnétique, forcé par cette alimentation s'établit dans la carcasse magnétique .l'autre enroulement appelé secondaire, embrasse ce flux variable et devient le siège d'une f.é.m. induite. Celle –ci induira un courant alternatif qui alimentera les récepteurs d'énergie électrique. (Voire la figure I.2)

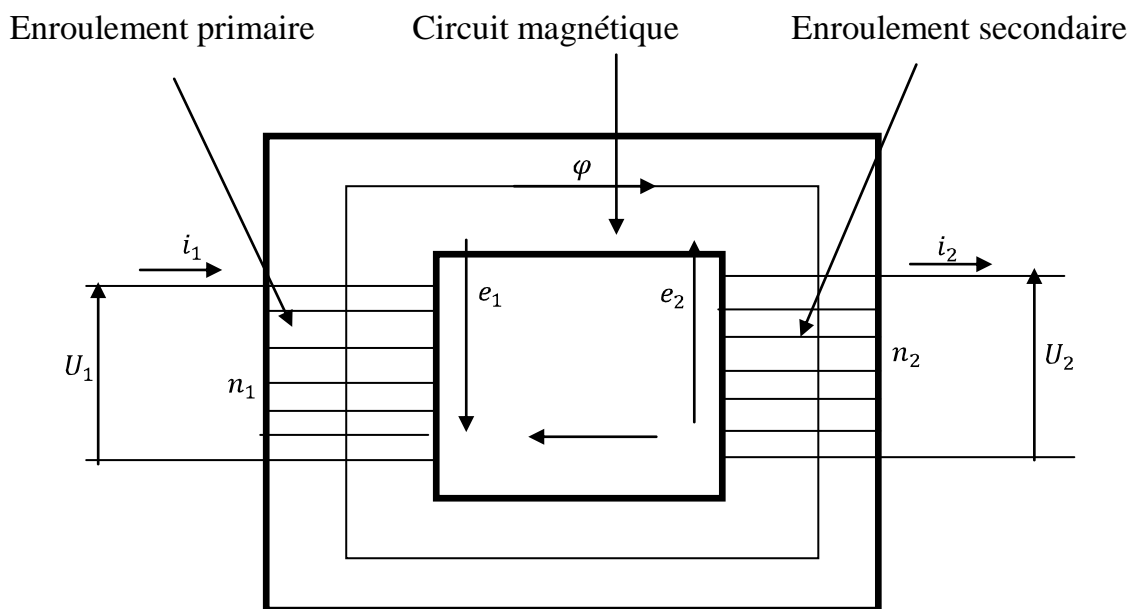


Fig. I.2. Schéma simplifié d'un transformateur

I.2.Constitution d'un autotransformateur triphasé

Tout comme un transformateur ordinaire l'autotransformateur est constitué essentiellement par deux parties :

- partie active
- partie constructive

I.2.1.La partie active

Elle est destinée à assurer la conversion de l'énergie, et Constituée d'un circuit magnétique et de deux enroulements.

I.2.1.a. Circuit magnétique

Les circuits magnétiques sont toujours des assemblages des tôles fines disposées dans un même plan parallèlement et perpendiculairement les unes aux autres. La fonction principale des circuits magnétiques est de canaliser le flux magnétique et de servir comme support aux enroulements.

Pour une meilleure efficacité.

- La tôle de circuit magnétique doit être fabriquée en matériaux ferromagnétiques à haute perméabilité magnétique pour une transformation suffisamment efficace de l'énergie électrique.
- Avoir une haute perméabilité magnétique (éviter la saturation) et une induction ne dépassant pas 1,8T.
- Isoler les tôles d'aciers pour diminuer les courants de Foucault.
- Pour une fréquence de 50HZ, l'épaisseur des tôles est 0,3mm avec une isolation en Carlitte, matière à base de phosphate.
- Sa tôle à grains orientés et laminés à froid dans le sens du laminage.

Notons que les circuits magnétiques sont de deux types principaux à colonnes et à Cuirassé

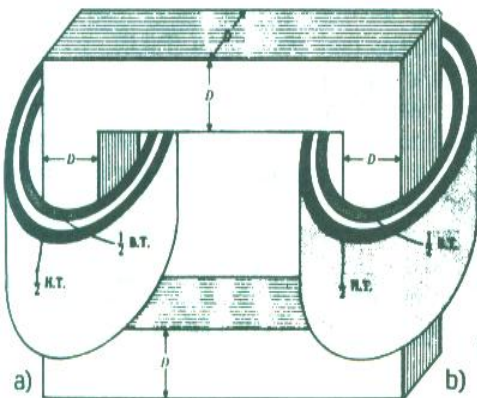


Fig. I.3.a Transformateur de type à colonne

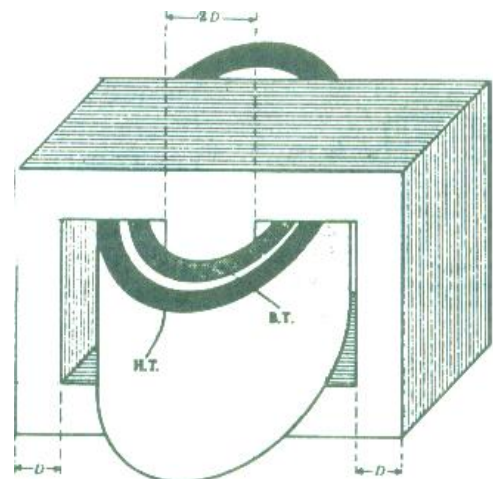


Fig. I.3.b. Transformateur de type à cuirassé

I.2.1.b. Les Enroulements

Les enroulements sont formés d'un matériau bon conducteur, en cuivre ou en aluminium, de section circulaire ou rectangulaire.

Ils sont généralement cylindriques disposés concentriquement sur la même colonne, et ils sont en encoche ou en galette.

Pour des raisons économiques les enroulements doivent satisfaire plusieurs conditions :

- Il faut diminuer les intervalles entre les deux enroulements pour diminuer le champ de dispersion magnétique, ce qui a pour effet de réduire la consommation de la puissance réactive.
- Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles pour réduire les pertes d'énergie qui se dégagent sous forme calorifique.
- Résister à l'élévation de température, les courts circuits et les surtensions lors de fonctionnement de transformateur.
- Emploi d'acier magnétique doux, spécial ayant une petite surface de cycle d'hystérésis.



Fig. I.4. Enroulement triphasé d'un transformateur

I.2.2. Partie constructive

I.2.2.a. La cuve et le couvercle

La cuve est un réservoir à huile pour les transformateurs émergés elle est généralement en tôle pliée pour former des ondulations qui favorisent l'échange thermique avec l'extérieur.

La cuve joue un rôle d'isolation et de protection mécanique à la partie active, elle permet également l'évacuation de la chaleur.

Le couvercle est un élément important de la cuve, il présente la partie supérieure du transformateur sa fonction principale est d'assurer la fermeture de la cuve, par ailleurs il sert de support aux accessoires surtout :

- Les traverses.
- Relais Buchholz.
- Commutateur de réglage.
- Assécheur.



Fig. I.5. Schéma de la cuve

I.2.2.b. Les traversées

Ils sont des tubes isolant en porcelaine fixés sur le couvercle, leurs formes et leurs dimensions sont très variées.

Les traversées ont pour rôle d'assurer à travers le couvercle la liaison électrique entre les extrémités des enroulements d'une part et les lignes d'arrivée, d'autre part ces traversés doivent satisfaire certaines conditions dont les principales sont :

- La résistance aux efforts mécaniques.
- L'isolement de la connexion par rapport au couvercle.
- La bonne répartition du champ électrique.
- La fixation étanchée et robuste sur le couvercle.

I.2.2.c. Le liquide diélectrique

C'est un mélange d'hydrocarbures provenant de la distillation du pétrole brute, après extraction des produits volatiles.

On obtient ainsi l'huile pour transformateur qui est un liquide dans lequel l'émersion de la partie active présente non seulement l'avantage d'une meilleure isolation, mais aussi celui de la facilité de refroidissement par circulation naturelle de huile.

I.3. Mode de couplage des enroulements

Les enroulements primaires et secondaires d'un transformateur triphasé peuvent être connectés en étoile ou en triangle, ou en zigzag.

Choix de couplage se fait en fonction des conditions d'utilisation.

Dans notre cas le cahier de charge exige que les enroulements haute tension et moyenne tension soient couplés en étoile et que l'enroulement basse tension en triangle voir la figure. I.6.

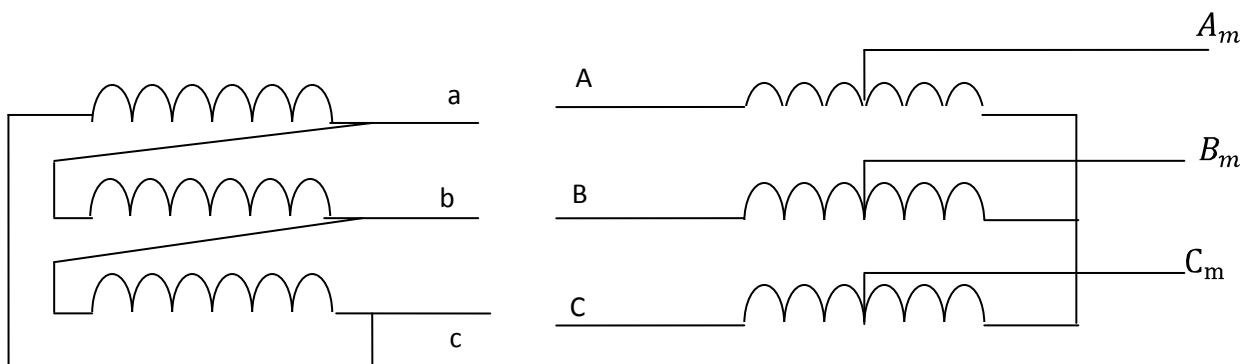


Fig. I.6. Schéma de couplage d'un autotransformateur triphasé à trois enroulements

I.4. Avantages et inconvénients d'un autotransformateur

I.4.1. Avantages

Comparé au transformateur classique, l'autotransformateur a comme avantage :

- d'être moins coûteux (car il utilise moins de cuivre).
- d'avoir un meilleur rendement (car sa chute de tension interne est plus faible).
- moins encombrant.

I.4.2. Inconvénients

Il représente le grave inconvénient de ne pas isoler la basse tension de la haute tension lors de la mise sous tension.

I.5. L'utilité de l'enroulement tertiaire

L'autotransformateur a les inconvénients du double couplage étoile (création d'harmonique et sensibilité aux régimes transitoires) .que l'on réduit en général par adjonction d'un tertiaire couplé en triangle dont le but était multiple.

- Stabilisation des tensions simples en cas de charge déséquilibrée.
- Suppression des harmoniques multiples 3, dus aux courants à vides dans les connexions de terre lorsque le point neutre est à la terre .Ces harmoniques induisent des tensions perturbatrices dans les lignes voisines à basse tension notamment les lignes téléphoniques.
- Alimentation de la réactance destinée à fournir l'énergie réactive du réseau, au prélèvement de puissance pour les auxiliaires d'un poste ou un réseau local.
- Réduction de réactance homopolaire.

I.6. Les paramètres industriels d'un transformateur

I.6.1. Les paramètres techniques

I.6.1.a. Puissance nominale

C'est la valeur conventionnelle de la puissance apparente, elle peut être utilisée lors de fonctionnement du transformateur en régime normal, elle s'exprime en (KVA) ou (MVA).

I.6.1.b. Tension nominale

C'est la valeur de la tension pour laquelle seront définies et garanties les caractéristiques en charge. (Perte due a la charge, U_{cc})

I.6.1.c. Courant nominal

C'est la valeur du courant pour laquelle seront définies et garanties les caractéristiques à vide.

I.6.1.d. Tension de court circuit U_{cc}

C'est la tension réduite qu'il faut appliquer au primaire lorsque le secondaire est en court-circuit pour que le courant nominal circule au primaire.

I.6.1.e. Les pertes à vide

Lors de fonctionnement à vide La puissance absorbée par le transformateur est pratiquement dépensée pour compenser les pertes dans le fer, car ces pertes sont généralement inférieure ou égales à 2% de puissance totale consommée.

➤ **Les pertes dans le fer**

Elles se composent par des pertes hysteresis et par courant de Foucault.

a) Les pertes par courant de FOUCAULT

Le circuit magnétique qui est le siège d'une induction sinusoïdale est parcouru par des courants induits appelés courant de FOUCAULT, Ces courants qui circulent dans les plans perpendiculaires aux lignes d'induction tendent s'enrouler autour de ces lignes, ils produisent un dégagement de chaleur par effet joule.

b) Les pertes par hystérésis

Le phénomène d'hystérésis limite l'efficacité des transformateurs .une aimantation persiste dans les matériaux quand on supprime celui-ci le matériau ne reprend pas sa position initiale.

Dans un transformateur, ce retard provoque une perte d'énergie sous forme de chaleur, à chaque cycle du courant alternatif.

➤ **Les pertes supplémentaires**

Se sont les pertes dans les isolateurs ainsi que les pertes dans les différentes pièces de serrage et joint du circuit magnétique.

I.6.1.f. Les pertes en court circuit

Lors du l'essai en court circuit le flux principal est très petit dans le noyau ; alors les pertes fer sont négligées et seulement les pertes dans le cuivre seront considérées.

I.6.1.g. Le rapport de transformation d'un transformateur

Est le rapport entre la tension secondaire à vide et la tension primaire.

I.6.2. Les paramètres d'exploitation

I.6.2.1. Le rendement

C'est le rapport de la puissance débitée par le secondaire et la puissance absorbée par le primaire. Le rendement est maximal lorsque les pertes dans le cuivre sont égales aux pertes dans le fer.

I.6.2.2. Chute de tension

C'est la différence numérique en complexe des tensions secondaires à vide et en charge. $\Delta U = U_{20} - U_2$. Elle dépend généralement de la valeur et du type de la charge elle est exprimée en volt.

I.6.3. Protection des transformateurs

Le transformateur peut être confronté à des nombreux défauts pouvant affecter son fonctionnement et provoquer la détérioration et le vieillissement de son matériel, donc des mesures de sécurité doivent être mises en place pour assurer le contrôle en prévoyant des éléments de protection interne et externe.

I.6.3.a. Relais Buchholz

Le relais est un appareil sensible aux variations de grandeurs issues du réseau ou de l'élément à protéger. Son rôle est la détection des anomalies (court circuit, mauvais contact dans les connexions, détérioration de l'isolant... etc.).

Dans le cas d'apparition des conditions anormales, un dispositif se charge de transmettre l'ordre aux organes de signalisation et de commande pour l'ouverture ou la fermeture automatique d'un disjoncteur interposé dans le circuit.

I.6.3.b. Thermomètre

Il sert à surveiller l'échauffement d'huile de la cuve pour une température de l'huile qui atteint 75°C, il donne l'alarme et pour 80°C, on aura un déclenchement.

I.6.3.c. Les éclateurs

Ils sont prévus pour protéger les traversées de transformateur, on les dispose entre la ligne du réseau et la terre pour écouler des surtensions vers la terre.

I.6.3.d. Renforcement de l'isolation

En raison des surtensions résultant des différents phénomènes (atmosphérique, commutation) on laisse une distance entre les extrémités des enroulements et la culasse.

I.7. Processus d'échauffement des transformateurs

La conversion de l'énergie dans un transformateur s'accompagne de certaines pertes. La presque totalité des pertes est libérée par effet joule dans les parties actives du transformateur c'est à dire dans son circuit magnétique et dans ces enroulements,

une certaine partie des pertes de puissance se rapporte aussi aux éléments mécaniques du transformateur.

Les pertes dégagées dans le transformateur lors de son fonctionnement sont transformées en énergie thermique et provoquent l'échauffement de cette partie constitutive.

Depuis l'endroit où il est produit, le flux thermique est dirigé sous l'action des gradients thermiques vers les endroits où il peut être transféré à l'agent réfrigérant, c'est-à-dire, à l'air ou à l'eau selon le mode de refroidissement.

La quantité de chaleur dégagée dans un transformateur correspond à une perte d'énergie. L'échauffement de transformateur est donc en fonction de ces pertes.

I.8.Mode de refroidissement des transformateurs

Si l'on veut empêcher qu'un échauffement exagère, détériore les isolants d'un transformateur, il faut en assurer un refroidissement convenable.

D'après le mode de refroidissement on distingue les transformateurs à :

- Refroidissement naturel (ONAN) qu'indique la circulation naturelle de l'huile (ON) et de l'air (AN).
- Refroidissement à l'air par circulation forcée (ONFA).
- circulation forcée de l'huile et refroidissement de celle-ci par des réfrigérants à eau ou air (OFAF).

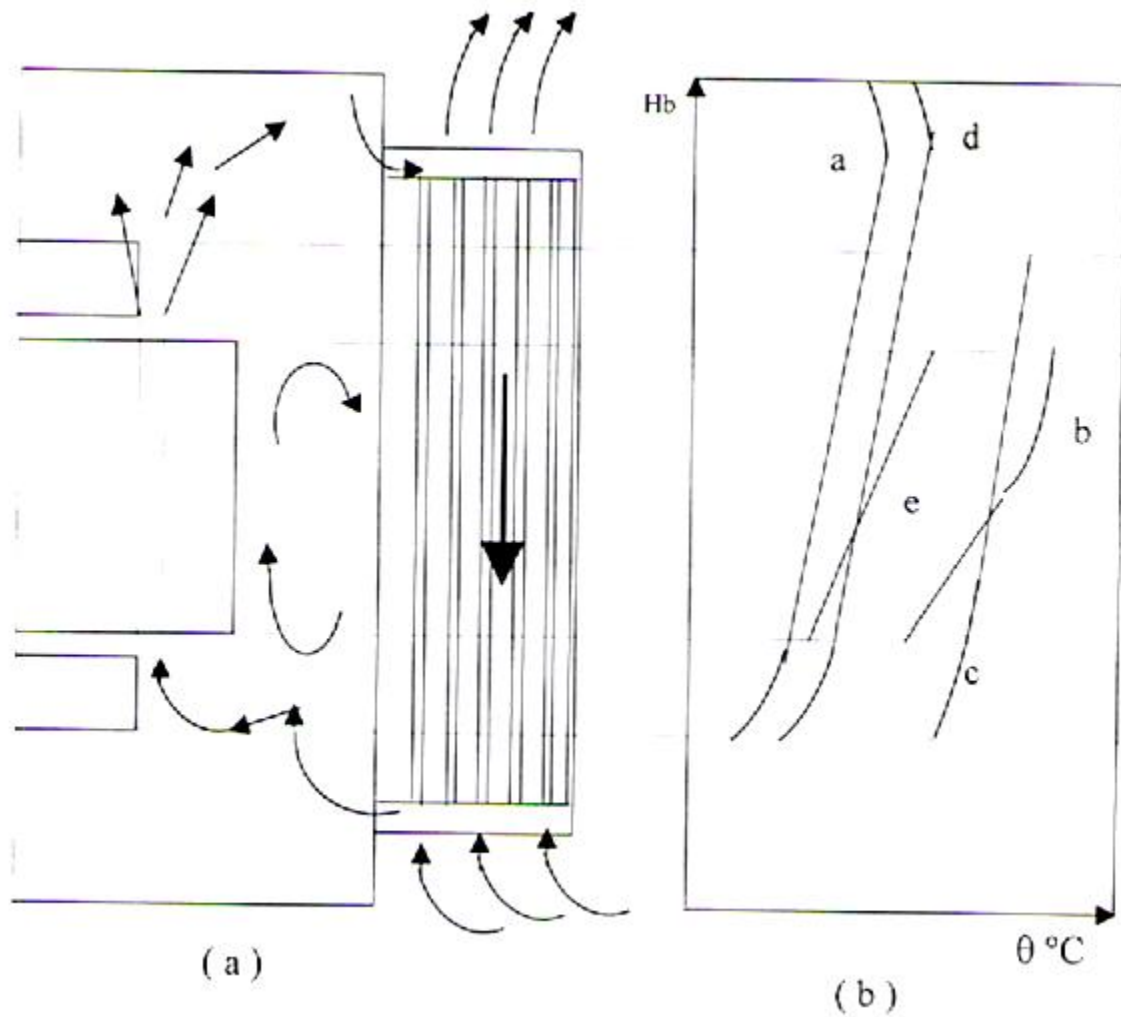


Fig. I.7.

(a). Circulation naturelle de l'huile

(b). Répartition de la température dans le transformateur dans l'huile à refroidissement naturel.

a. Paroi de la cuve

b. Surface de l'enroulement

c. Surface du noyau

d. Huile extérieurement à l'enroulement

e. Huile dans le canal de refroidissement de l'enroulement

II.1. Introduction

Le calcul électromagnétique d'un transformateur nécessite en premier lieu un calcul préliminaire, qui est à partir du cahier des charges et des dimensions principales, puis un calcul définitif qui nous permet de dimensionner les enroulements, d'établir toutes les caractéristiques géométriques électromagnétiques et de les comparer à celles du cahier des charges.

II.2. Calcul préliminaire des dimensions principales

Les dimensions principales d'un autotransformateur sont :

- Le diamètre du canal de fuite D_{12}
- La Hauteur de l'enroulement h_B
- Le diamètre de la colonne D

Le calcul d'un autotransformateur, de puissance apparente S_n et de puissance transformée S_1 se réduit au calcul d'un transformateur ordinaire de puissance apparente S_1 .

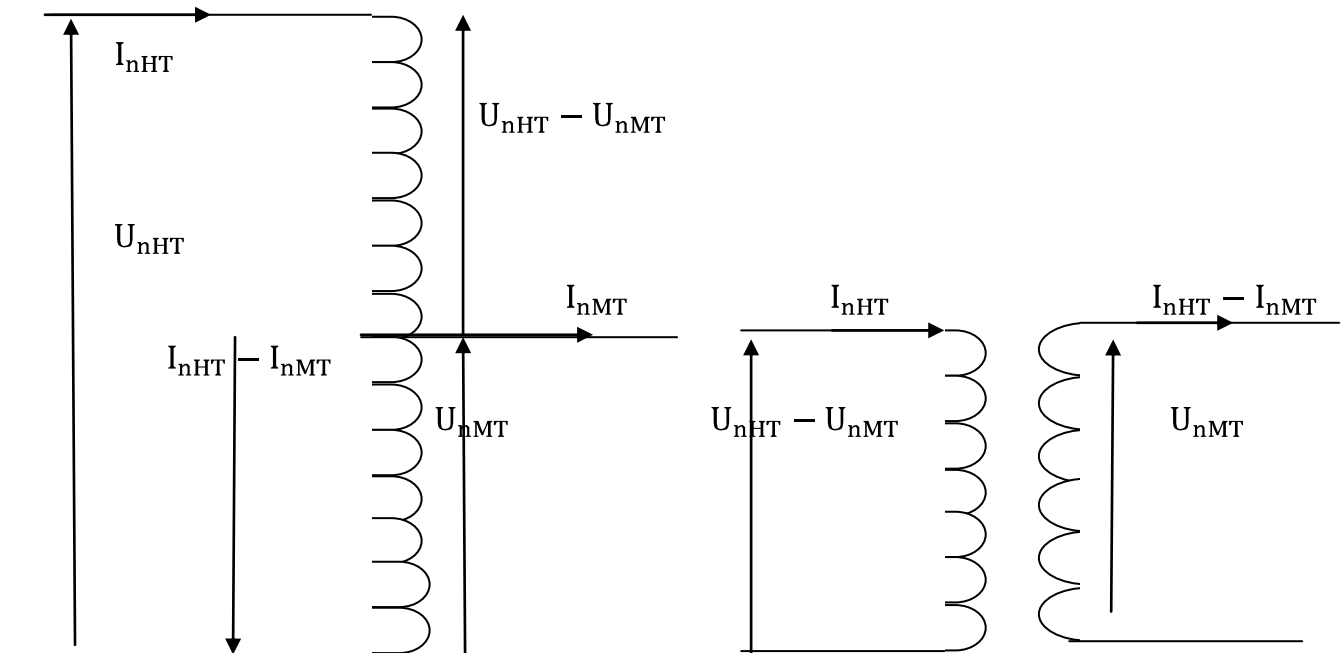


Fig. II.1. Schéma de principe d'un autotransformateur et son transformateur réduit

La puissance totale de l'autotransformateur est donnée par :

$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_{nHT} \cdot I_{nHT} \quad [\text{MVA}] \quad (\text{II.1})$$

où U_{nHT} — Tension nominale au primaire de l'autotransformateur ; I_{nHT} — Courant nominal au primaire de l'autotransformateur.

La puissance transformée de l'autotransformateur est :

$$S_1 = (U_{nHT} - U_{nMT}) \cdot I_{nHT} \quad [\text{MVA}] \quad (\text{II.2})$$

où U_{nMT} — Tension nominale au secondaire de l'autotransformateur.

La détermination de la relation qui relie la puissance transformée de l'autotransformateur et la puissance apparente est donnée par la formule suivante :

$$\frac{S_n}{S_1} = \frac{U_{nHT} \cdot I_{nHT}}{(U_{nHT} - U_{nMT}) \cdot I_{nHT}} \quad \text{d'ou} \quad S_1 = S_n \cdot \frac{U_{nHT} - U_{nMT}}{U_{nHT}}$$

On pose :

$$K_B = \frac{U_{nHT} - U_{nMT}}{U_{nHT}} \quad \text{on aura donc : } S_1 = K_B \cdot S_n \quad [\text{MVA}] \quad (\text{II.3})$$

➤ **Puissance dans l'enroulement tertiaire**

$$S_B = K_{B1} \cdot S_n \quad [\text{KVA}] \quad (\text{II.4})$$

où K_{B1} — Coefficient spécifique de puissance sa valeur varie entre 0.25 et 0.5 dans notre cas il est de 0.5.

II.2.1. Puissance apparente par colonne

Elle est donnée par la formule suivante

$$S_C = \frac{S_1}{C} \quad [\text{MVA}] \quad (\text{II.5})$$

où S_1 — Puissance apparente nominale du transformateur réduit ; C — nombre de colonnes ($C=3$ pour un transformateur triphasé).

II.2.2. Courant dans les lignes

➤ Cote haute tension : $I_{nHT} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{nHT}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.6})$

➤ Cote moyenne tension : $I_{nMT} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{nMT}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.7})$

➤ Cote basse tension : $I_{nBT} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{nBT}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.8})$

II.2.3. Courant dans les enroulements

Ils sont calculés suivant le mode de couplage

➤ Enroulement série (n_1) spires : $I_1 = I_{nHT} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.9})$

➤ Enroulement shunt (n_2) spires : $I_2 = I_{nMT} - I_{nHT}$ [A] (II.10)

➤ Enroulement tertiaire (n_3) spires : $I_3 = \frac{I_{nBT}}{\sqrt{3}}$ [A] (II.11)

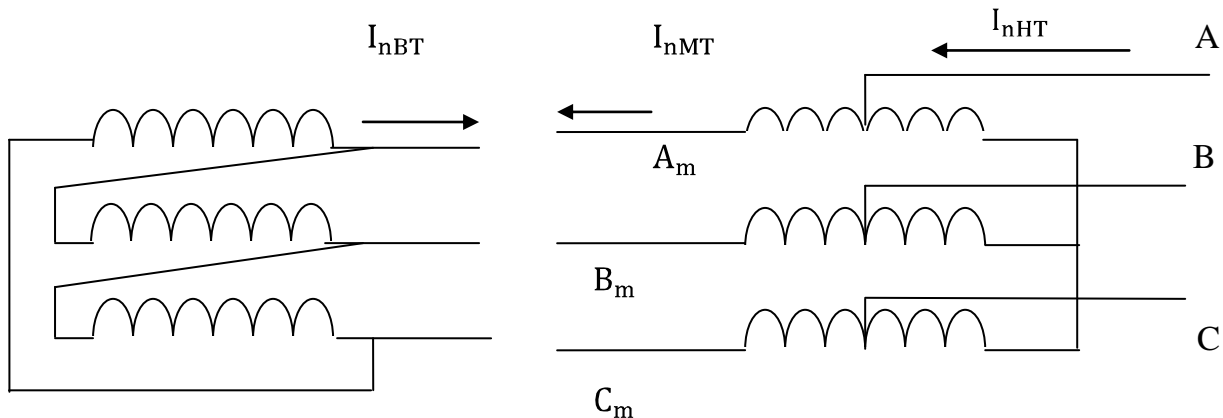


Fig. II.2. Schéma montrant les sens des courants

II.2.4. Tension de phase

La tension de phase dépend du mode de couplage des enroulements.

➤ Cote haute tension : $U_{PHT} = \frac{U_{nHT}}{\sqrt{3}}$ [KV] (II.12)

➤ Cote moyenne tension : $U_{PMT} = \frac{U_{nMT}}{\sqrt{3}}$ [KV] (II.13)

➤ Cote basse tension : $U_{PBT} = U_{nBT}$ [KV] (II.14)

II.2.5. Tension des enroulements

➤ Enroulement Série : $U_1 = U_{nHT} - U_{nMT}$ [KV] (II.15)

➤ Enroulement shunt : $U_2 = U_{nMT}$ [KV] (II.16)

➤ Enroulement tertiaire : $U_3 = U_{nBT}$ [KV] (II.17)

II.2.6. Tension de court-circuit

La tension de court-circuit est déterminée pour chaque paire de l'enroulement. Pour un calcul préliminaire on prend en considération que la tension de court-circuit entre les enroulements hauts tension et moyenne tension.

Elle est déterminée lorsque l'enroulement primaire est alimenté ; et le secondaire en court-circuit et le troisième reste ouvert. la relation de la tension de court circuit de transformateur réduit est :

$$U_{cc12} = \frac{U_{ccHT}}{K_B} \quad [\%] \quad (II.18)$$

II.2.7. Diamètre de la colonne

Le diamètre de la colonne est donné par l'expression suivante

$$D = 16 \cdot \sqrt[4]{\frac{S_c \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R}{f \cdot U_{CCR} \cdot B_c^2 \cdot K_u^2}} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.19})$$

➤ **Épaisseur rapportée du canal de fuite**

$$a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.20})$$

où a_{12} — largeur du canal de fuite principale .elle est choisie en fonction de la tension la plus élevée du transformateur, dans notre cas $a_{12} = 12,5$ Cm ; a_1 — épaisseur de l'enroulement haute tension ; a_2 — épaisseur de l'enroulement moyenne tension ; Le terme $\frac{a_1 + a_2}{3}$ — est donné en fonction de la puissance apparente par colonne du transformateur. Son expression est :

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \cdot \sqrt[4]{S_c} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.21})$$

où K — coefficient dépendant de la puissance par colonne de l'autotransformateur. Sa valeur varié entre 0.58-0.6 pour un calcul préliminaire, on choisit $K=0.58$.

➤ **Coefficient de Svelte**

C'est un coefficient de forme, il est donne par la formule suivante

$$\beta = \pi \cdot \frac{D_{12}}{h_B} \quad (\text{II.22})$$

où D_{12} — Diamètre de canal de fuite ; h_B — Hauteur de la bobine.

D'après son expression on remarque que ce coefficient impose la géométrie du transformateur .suivant sa valeur ce dernier sera svelte ou trapu.

Cette valeur est donnée en fonction de la puissance par colonne, de la tension la plus grande du transformateur et de type du matériau utilise pour le bobinage .pour notre cas, β varie entre 1.5et 3.5.pour un calcul préliminaire ; On prend $\beta = 2,1$.

➤ **Coefficient de Rogowski**

C'est le coefficient de réduction de la hauteur de l'enroulement à la longueur théorique des lignes de champs de dispersion. Pour un calcul préliminaire, on le prend égal à 0.95.

➤ **Facteur d'utilisation de la section de fer**

Ce facteur est donné par cette relation suivante:

$$K_U = K_r \cdot K_g \quad (\text{II.23})$$

où K_r – coefficient de remplissage, il dépend de l'épaisseur de l'isolation et de la déformation des tôles. il varie entre 0.93 et 0.98. pour un calcul préliminaire on le prend égal à 0.95 ; K_g – coefficient géométrique, il dépend du nombre des gradins et de la puissance apparente par colonne. Dans notre cas $K_g=0,927$. (Voire le tableau II.1).

➤ **Induction magnétique de crête**

Son choix se fait à partir de la puissance du transformateur et du type des tôles utilisées pour les tôles laminées à froid et d'épaisseur 0.30 mm, sa valeur varie entre 0.9 et 1.95 Tesla.

Pour un calcul préliminaire $B_c = 1,65\text{T}$

➤ **Fréquence industrielle**

Sa valeur est imposée par le réseau et égale à 50 Hz

II.2.8. Diamètre du canal de fuite

IL est donné par cette expression :

$$D_{12} = a \cdot D \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.24})$$

où D – diamètre de la colonne ; a – facteur qui est donné en fonction de la puissance par colonne et de la tension la plus élevée du transformateur. Dans notre cas, on le prend égale à 1,4.

II.2.9. Hauteur approximative des enroulements

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$H_B = \pi \cdot \frac{D_{12}}{\beta} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.25})$$

Pour éviter toute contraintes pouvant créer les forces électrodynamique axiales et pour faciliter le calage des bobines et des culasses, on choisit les hauteurs des bobines primaire, secondaire et tertiaire les plus proches possibles.

Tableau. II.1. Le diamètre normalisé de la colonne d_n et le coefficient de remplissage K_g en fonction de la puissance apparente.

Puissance apparente S_1 en [KVA]	1000	1600	2500	6300	10000	16000	25000	32000	80000
Diamètre de la colonne normalisée en [Cm]	24-26	28-30	32-34	36-36	40-42	45-50	53-56	60-67	71-75
Nombre de gradins	8	8	9	9	11	14	15	16	16
Coefficient de remplissage k_g	0.925	0.928	0.929	0.913	0.922	0.927	0.927	0.929	0.931

II.2.10. Section de fer

La valeur de la section de fer est donnée par la formule suivante :

$$S_{\text{fer}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot K_u \quad [\text{Cm}^2] \quad (\text{II.26})$$

II.3. Calcul des enroulements

II.3.1. Tension de la spire

Du fait que les enroulements sont embrassés par le même flux magnétique principal canalisé par le circuit magnétique, la tension de spire sera la même.

Elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{\text{sp}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_c \cdot S_{\text{fer}} \quad [\text{V}] \quad (\text{II.27})$$

II.3.2.Nombre de spires

➤ **Enroulement tertiaire (triangle)**

$$n_3 = \frac{U_3}{U_{sp}} \tag{II.28}$$

➤ **Enroulement shunt (étoile)**

$$n_2 = \frac{U_2}{U_{sp \cdot \sqrt{3}}} \tag{II.29}$$

➤ **Enroulement série (étoile)**

$$n_1 = \frac{U_1}{U_{sp \cdot \sqrt{3}}} \tag{II.30}$$

L'arrondissement du nombre de spire influe d'une manière négligeable sur la tension d'une spire néanmoins il faut la recalculée.

II.3.3.Recalculé de l'induction de crête

On recalcule l'induction de crête comme suit

$$B_{cr} = \frac{U_{spr}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{fer}} \quad [T] \tag{II.31}$$

II.3.4.Calcul de la densité moyenne du courant

Elle est donne par la relation suivante

$$J_m = 0.746 \cdot K_c \cdot \frac{P_{cc} U_{spr}}{S_1 \cdot D_{12}} \quad [A/mm^2] \tag{II.32}$$

où P_{cc} — Pertes joule en watt ; U_{spr} — Tension de spire recalculée ; S_1 — Puissance apparente du transformateur en [KVA] ; K_c — Facteur tenant compte des pertes supplémentaires .il est donné en fonction de la puissance apparente du transformateur, sa valeur est prise du tableau (II.2).

Tableau. II.2.Il donne K_c en fonction de la puissance apparente S_1

Puissance apparente S_1 [KVA]	<= 100	160-630	1000- 6300	10000-1600	25000-63000	80000-100000
K_c	0.97	0.96-0.92	0.91- 0.90	0.90- 0.87	0.86- 0.78	0.77- 0.75

II.3.5.Choix des conducteurs et du type de l'enroulement tertiaire

➤ Section du conducteur

La section du conducteur est calculée par la relation suivante :

$$S_{\text{con3}} = \frac{I_3}{J_m} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.33})$$

où J_m —la densité de courant s'exprime en $[\text{A}/\text{mm}^2]$; I_3 —le courant qui circule dans l'enroulement tertiaire s'exprime en $[\text{A}]$

Si la section du conducteur est supérieure à 135 mm^2 , on la devise en conducteurs élémentaires placés en parallèle dont la section n'excède pas 135 mm^2 .

Les conducteurs de l'enroulement tertiaire sont des fils méplats, d'isolation en papier de 0.45ou 0.5suivant la valeur de la section. (Voir la figure II.3).

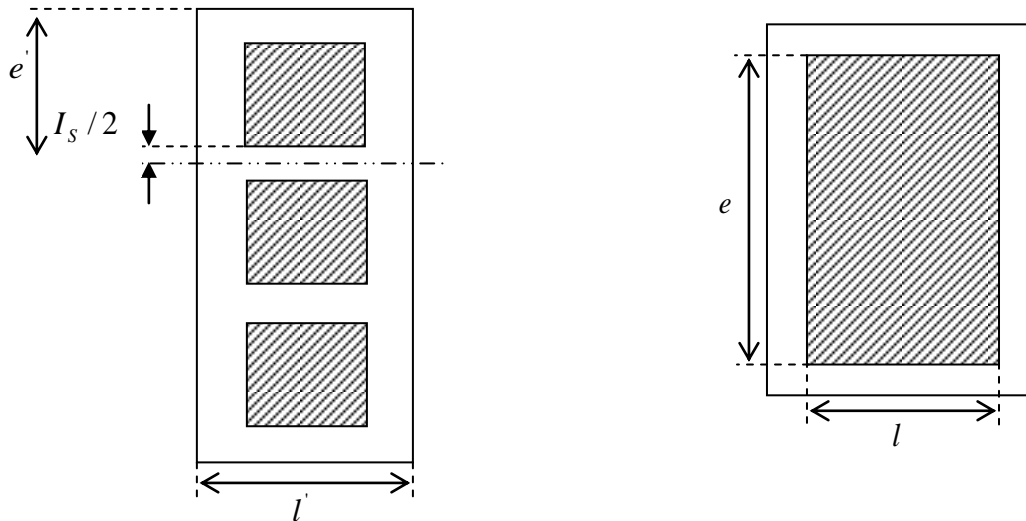


Figure. II. 3.Fil méplat avec une disposition à plat (3 conducteurs élémentaires).

Le Tableau. II.3 nous donne la section normalisée S_{con3} , la largeur L du conducteur, son épaisseur e et l'épaisseur de son isolant I_s .

e : épaisseur du conducteur en mm.

l : largeur du conducteur en mm.

Au dessous du trait fort : prévoir une isolation de 0,5 [mm]

Au dessus du trait fort : prévoir une isolation de 0,45 [mm]

Tableau. II.3. Section et dimensions des conducteurs non isolés. Méplats

$\frac{e}{l}$	4,5	5,0	5,6	6,3	7,1	8,0	9,0	10,0	11,2	11,8	12,5	13,2	14,0	15,0	16,0
1,0			5,4	6,1	6,9										
1,12			6,1	6,8	7,7										
1,25	5,4	6,0	6,8	7,7	8,7										
1,4	6,1	6,8	7,6	8,6	9,7	11,0									
1,6	7,0	7,8	8,7	9,9	11,2	12,6									
1,8	7,7	8,6	9,7	11,0	12,4	14,0	15,8								
2,0	8,6	9,6	10,8	12,2	13,8	15,6	17,6								
2,24	9,7	10,8	12,2	13,8	15,5	17,6	19,8	22,0							
2,5		12,0	13,5	15,2	17,2	19,4	22,0	24,4							
2,8		13,4	15,1	17,1	19,3	21,8	24,6	27,4	30,8						
3,15		15,2	17,1	19,3	21,8	24,6	27,8	31,0	34,7	36,6	38,8				
3,55			19,3	21,8	24,7	27,8	31,4	35,0	39,2	41,3	43,8	46,3	49,2		
4,0				24,3	27,5	31,1	35,1	39,1	43,9	46,3	49,1	51,9	55,1	59,1	63,1
4,5					31,1	35,1	39,6	44,1	49,5	52,2	55,4	58,5	62,1	66,6	71,1
5,0					34,6	39,1	44,1	49,1	55,1	58,1	61,1	65,1	69,1	74,1	79,1
5,6						43,9	49,5	55,1	61,9	65,2	69,1	73,1	77,5	83,1	88,7
6,3						49,1	55,4	61,7	69,2	73,0	77,4	81,8	86,9	93,2	99,5
7,1							62,6	69,7	78,2	82,4	87,4	92,4	98,1	105,0	112,0
8,0									88,3	93,1	98,7	104,0	111,0	119,0	127,0
8,5												105,0		118,0	135,0

➤ **Recalculé de la densité moyenne du courant**

La normalisation de la section du conducteur entraîne une légère variation de la densité du courant, cependant il faut la recalculer en utilisant la relation suivante :

$$J_{mr3} = \frac{I_3}{S_{con3n}} \quad [A / mm^2] \quad (II.34)$$

Après avoir recalculé la densité moyenne du courant, on calculera la valeur de l'erreur relative $\frac{\Delta J_m}{J_m}$ et on vérifie que cette dernière ne dépasse pas l'erreur admissible qui est 5%. dans le cas contraire on recalculera le diamètre de la colonne.

➤ **Calcul de l'espace nécessaire de l'enroulement tertiaire**

Nous adoptons une disposition à plat des conducteurs car elle facilite le travail de bobinage et réduit les pertes supplémentaires. L'enroulement basse tension sera un enroulement concentrique à longue couche, comme le montre la figure .II.4.

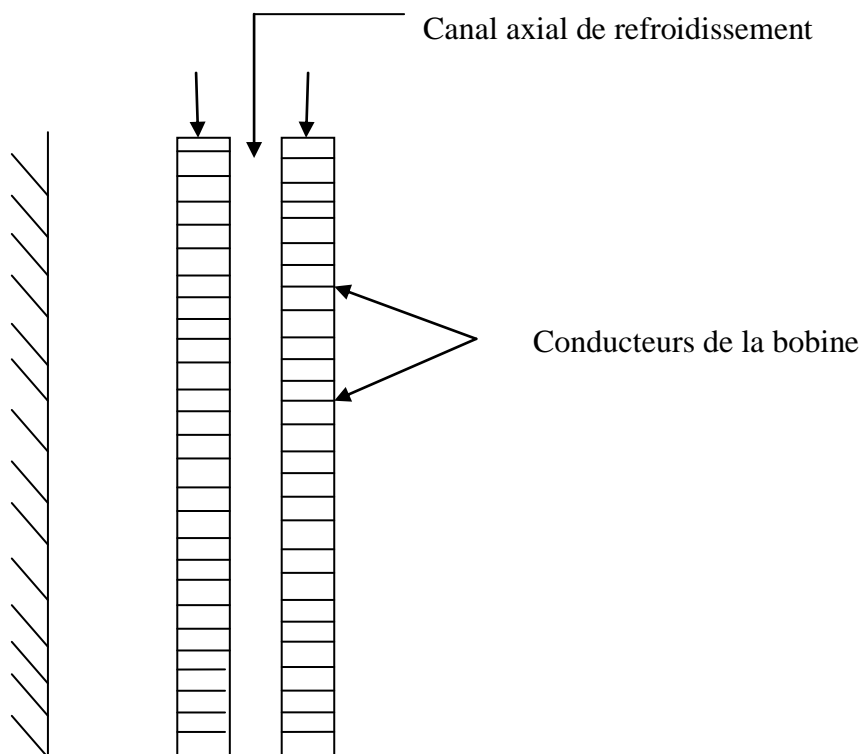


Fig. II.4. Enroulement concentrique en couche

➤ **Calcul du nombre de couche**

Le nombre de couche est donné par la relation suivante :

$$N_c = \frac{n_3}{N_{sc}} \quad (\text{II.35})$$

où n_3 — Nombre de spire de l'enroulement tertiaire ; N_{sc} — Nombre de spires par couche qui est donné par la formule suivante :

$$N_{sc} = \frac{h_b}{n \cdot \epsilon} \quad (\text{II.36})$$

où ϵ — épaisseur du conducteur avec isolation $\epsilon = e + I_s$; n — nombre des conducteurs élémentaires.

➤ **Épaisseur de l'enroulement tertiaire**

L'épaisseur de l'enroulement est donnée par la formule suivante :

$$a_3 = l' \cdot N_c \quad (\text{II.37})$$

où l' — largeur du conducteur avec isolation ; N_c — nombre de conducteurs

➤ **Hauteur définitive de l'enroulement tertiaire**

La hauteur définitive de l'enroulement tertiaire est donnée par

$$h_{B3} = h_m + h_{sp} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.38})$$

où h_{sp} — Hauteur d'une spire ; il est donnée par la formule suivante :

$$h_{sp} = n \cdot \epsilon \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.39})$$

où h_m — Hauteur magnétique de l'enroulement ; il est donnée par la formule suivante :

$$h_m = n \cdot N_{sc} \cdot \epsilon \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.40})$$

II.3.6. Choix des conducteurs et de type de l'enroulement shunt

➤ **Calcul de la section du conducteur**

$$S_{con2} = \frac{I_2}{J_m} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.41})$$

où I_2 — Courant dans l'enroulement shunt ; J_m — Densité moyenne du courant.

On normalisera cette valeur en prenant la valeur la plus proche du tableau II.3.

L'Enroulement shunt sera bobine en galette continues comme la montre les figures.

II.5 et II.6.

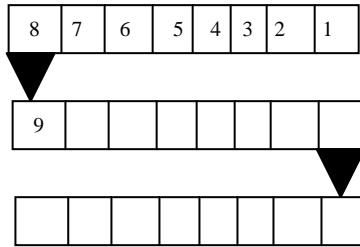


Fig. II.5. Galettes continues

➤ **Recalcul de la densité du courant**

Une fois la section du conducteur est normalisée, on recalcule la valeur de la densité moyenne du courant et on vérifie cette dernière si elle ne dépasse pas 5%. Dans le cas contraire on recalcule le diamètre de la colonne.

➤ **Calcul de nombre de galette**

Le nombre de galettes est donne par la formule suivante (voir la figure II. 6)

$$n_g \epsilon + (n_g - 1) \cdot c = h_m \quad \text{d'où} \quad n_g = \frac{h_m + c}{\epsilon + c} \quad \text{(II.42)}$$

où c — épaisseur des canaux radiaux de refroidissement, sa valeur est donnée en fonction de la tension ; n_g — Nombre de galettes ; ϵ — épaisseur du conducteur isolé.

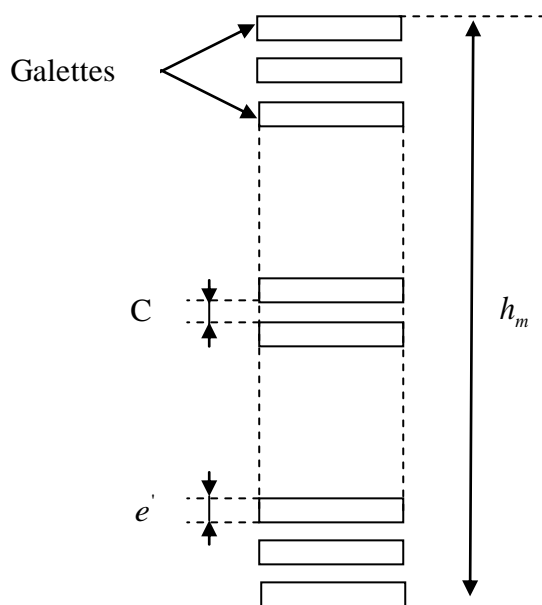


Fig. II.6. Enroulement à galettes.

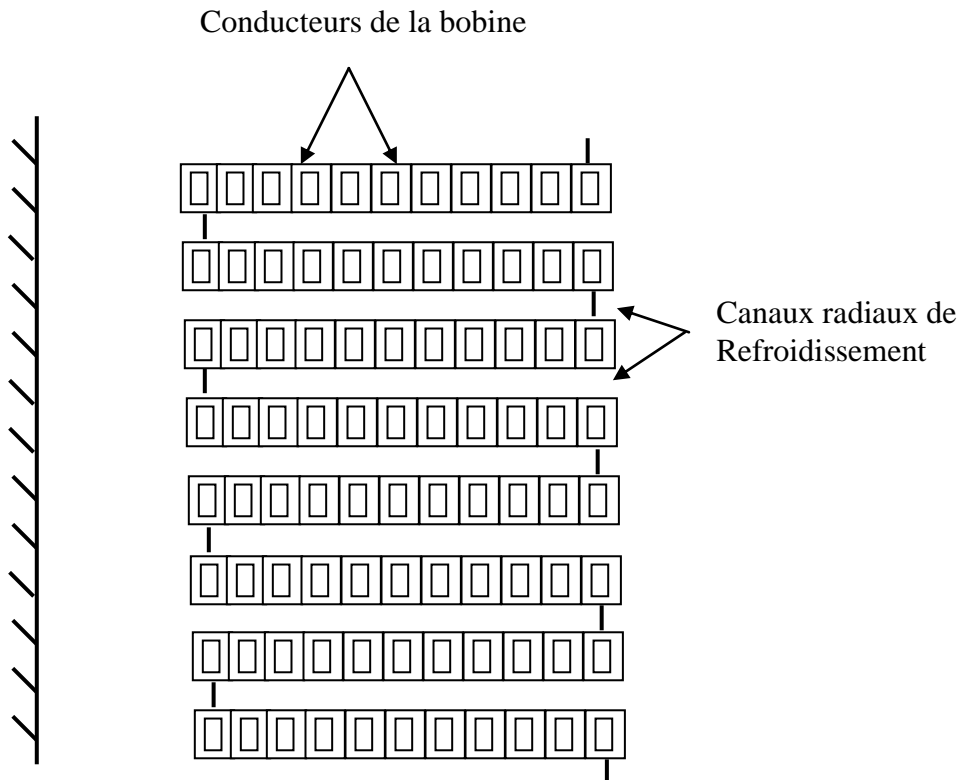


Fig. II.7. Enroulement à galettes continues

➤ **Nombre de spires par galette**

IL est calculé par la relation suivante :

$$N_{sg} = \frac{n_2}{n_g} \quad (\text{II.43})$$

où n_2 — Nombre de spires de l'enroulement shunt ; n_g — Nombre de galettes dans l'enroulement shunt.

➤ **Épaisseur de l'enroulement shunt**

Il est calculé comme suit :

$$a_2 = n_{sg} \cdot I' \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.44})$$

où a_2 — Épaisseur de l'enroulement shunt.

II.3.7. Choix du conducteur et de type de l'enroulement série

➤ **Calcul de la section de conducteur**

Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{con1} = \frac{I_1}{J_m} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.45})$$

où I_1 — courant dans l'enroulement série ; J_m —Densité moyenne du courant.

On normalisera la valeur de la section à partir du tableau .II.3. en prenant la valeur la plus proche S_{con1n} de la valeur calculée S_{con1} .

L'enroulement série sera bobiné en galettes continues comme l'enroulement shunt (voir les figures II.5-II.6-II.7).

➤ **Recalcul de la densité moyenne du courant**

On doit recalculer la valeur de la densité moyenne du courant après avoir arrondi la valeur calculée de la section du conducteur, ensuite on vérifie si elle ne dépasse pas 5%.dans le cas contraire, on recalcule le diamètre de la colonne.

$$J_{mr1} = \frac{I_1}{S_{con1n}} \quad [A/mm^2] \quad (II.46)$$

➤ **Calcul du nombre de galettes**

Le nombre de galettes est donne par la relation suivante (voir la figure II.6)

$$n_g \cdot \epsilon + (n_g - 1) \cdot c = h_m \text{ donc } n_g = \frac{h_m+c}{\epsilon+c} \quad (II.47)$$

où n_g — Nombre de galettes ; ϵ — épaisseur du conducteur isolé ; h_m — Hauteur magnétique de l'enroulement ; C — épaisseur des canaux radiaux de refroidissement ; elle est égale a 6 mm.

➤ **Nombre de spires par galette**

Il est donne par la formule suivante :

$$n_{sg} = \frac{n_1}{n_g} \quad (II.48)$$

où n_1 —Nombre de spire de l'enroulement série.

➤ **Epaisseur de l'enroulement série**

Il est donne par la formule suivante

$$a_1 = n_{sg} \cdot l' \quad [mm] \quad (II.49)$$

où a_1 — épaisseur de l'enroulement série ; l' — largeur du conducteur isolé

n_{sg} —Nombre de spires par galette.

II.3.8.Hauteur des enroulements série et shunt

Les hauteurs des enroulements série et chunt seront égales a leurs hauteur magnétique et elles doivent être au maximum égales a la hauteur magnétique de l'enroulement tertiaire.

➤ **Enroulement shunt**

$$h_{B2} = h_{m2} = n_g \cdot \epsilon \cdot (n_g - 1) \cdot c \quad [\text{mm}] \quad (\text{II}.50)$$

où n_g — Nombre de galette de l'enroulement shunt ; ϵ — épaisseur du conducteur isolé ; c — épaisseur des canaux radiaux ; h_{m2} — Hauteur magnétique de l'enroulement shunt ; Fig. (II.8).

➤ **Enroulement série**

$$h_{B1} = h_{m1} = n_g \cdot \epsilon + (n_g - 1) \cdot c \quad [\text{mm}] \quad (\text{II}.51)$$

où n_g — Nombre de galette de l'enroulement série ; ϵ — épaisseur du conducteur isolé ; C — épaisseur des canaux radiaux ; h_{m1} — Hauteur magnétique de l'enroulement série.

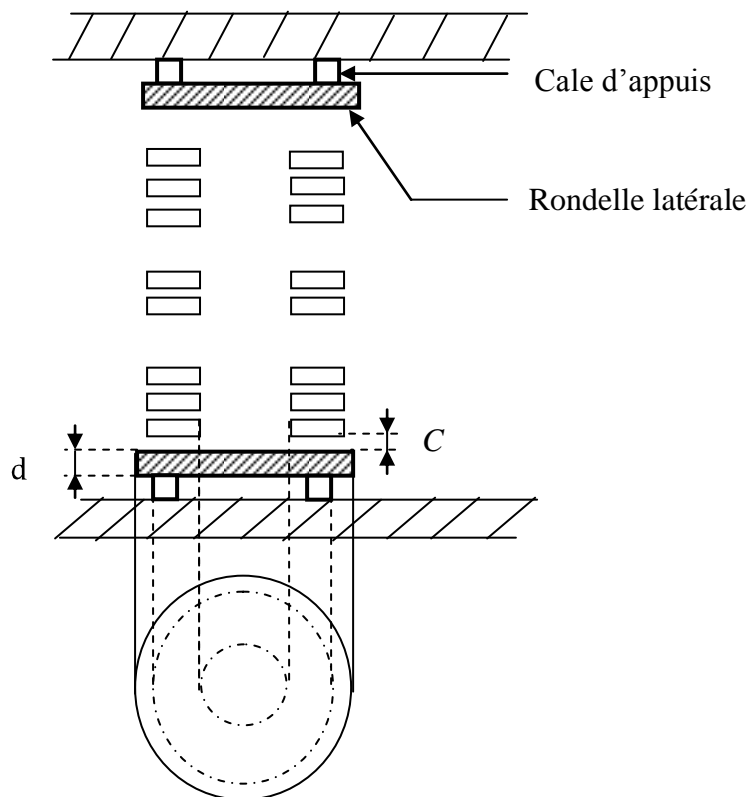


Fig. II .8.Emplacement de l'enroulement primaire sur le circuit.

➤ **Hauteur du montage des bobines**

Les Hauteurs du montage des bobines série, shunt et tertiaire sont égales sachant que leurs hauteurs de bobinages sont différentes. Ces hauteurs de montage est fixée par rapport a la bobine de la plus grande tension.

$$H_M = h_{B1} + 2d + 2C \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.52})$$

d — épaisseur de la rondelle en bois comprimé sa valeur est égale a 6 Cm ; C — épaisseur du canal de refroidissement entre l'enroulement et la rondelle.

➤ **Dimension de la cale de progression**

On utilise une cale de progression a chaque extrémité de l'enroulement tertiaire cette cale est en papier dur (voir la figure II.9)

$$b_1 = \frac{H_M - h_{B3}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.53})$$

$$b = b_1 + n \cdot \epsilon \quad [\text{mm}] \quad (\text{II.54})$$

où n — nombre des conducteurs élémentaires ; ϵ — épaisseur de conducteur.

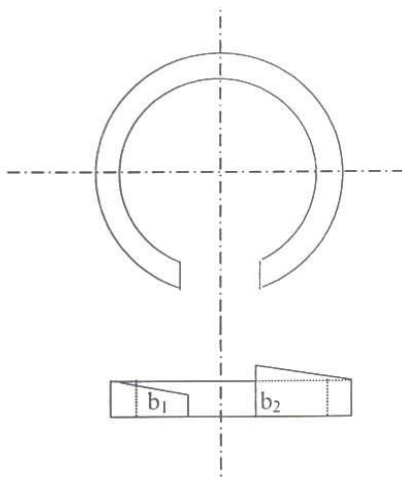


Fig. II.9. Cale de Progression

II.3.9. Dimensionnement radial des enroulements

➤ Diamètre intérieur de l'enroulement tertiaire

$$D_{i3} = D + 2 \cdot a_{03} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.55})$$

➤ Diamètre extérieur de l'enroulement tertiaire

$$D_{ex3} = D_{i3} + 2 \cdot a_3 \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.56})$$

- Diamètre intérieur de l'enroulement shunt

$$D_{i2} = D_{ex3} + 2 \cdot a_{32} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.57})$$

- Diamètre extérieur de l'enroulement shunt

$$D_{ex2} = D_{i2} + 2 \cdot a_2 \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.58})$$

- Diamètre intérieur de l'enroulement série

$$D_{i1} = D_{ex2} + 2 \cdot a_{12} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.59})$$

- Diamètre extérieur de l'enroulement série

$$D_{ex1} = D_{i1} + 2 \cdot a_1 \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.60})$$

II.4. Dimensionnement du circuit magnétique

Le nombre de gradins nécessaire dépend de la puissance apparente du transformateur. Leur nombre est donné par le tableau II.1.

II.4.1. Longueur de la fenêtre

$$l_f = D_{ex1} + a_{11} - B_{s1} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.61})$$

où B_{s1} — Largeur des gradins.

II.4.2. Hauteur de la fenêtre

$$H_c = h_{B1} + L_0 \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.62})$$

où L_0 — La longueur entre l'enroulement haute tension et la culasse. Elle est en fonction de la tension de cet enroulement. Pour notre cas, sa valeur est égale à 13 Cm.

II.4.3. Hauteur du noyau

$$H_n = H_c + 2 \cdot B_{s1} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.63})$$

II.4.4. Longueur entre axes des enroulements

$$L_c = L_f + B_{s1} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.64})$$

II.4.5. Longueur du noyau

$$L_n = L_c + B_{s1} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{II.65})$$

II.4.6. Section de la culasse

Afin de diminuer la dissymétrie magnétique due à la distribution linéaire des colonnes, la culasse doit avoir une section supérieure de 15 à 20 % à celle de la colonne.

$$S_j = 1.17 \cdot S_{fer} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{II.66})$$

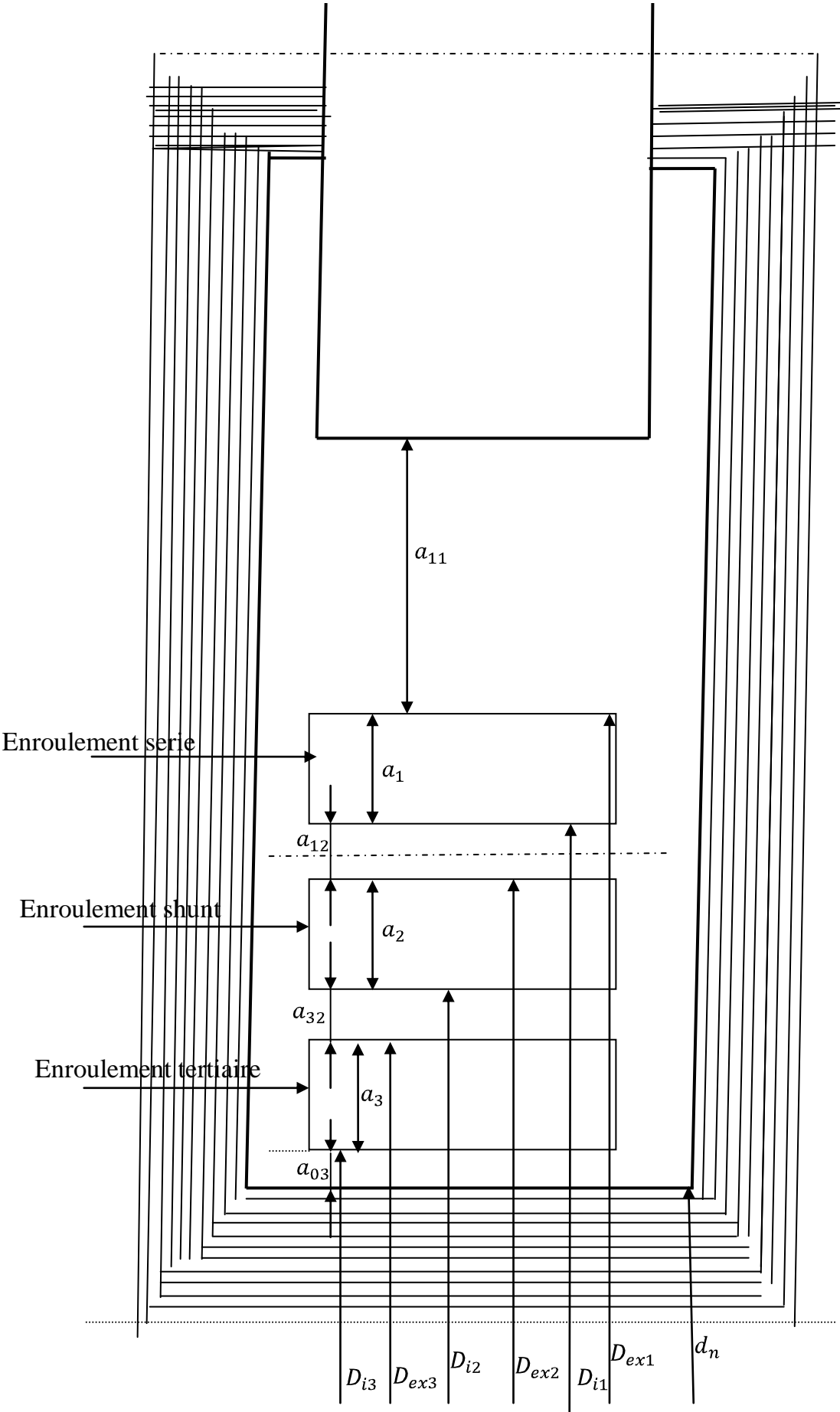
Induction dans la culasse

D'après la loi de conservation du flux, nous aurons

$$B_j \cdot S_j = B_c \cdot S_{fer} \quad \text{D'où} \quad B_j = \frac{S_{fer}}{S_j} B_c \quad [T] \quad (\text{II.67})$$

B_j — Induction dans la culasse ; S_j — Section de la culasse ; B_c — Induction dans la colonne ; S_{fer} — Section des colonnes.

Fig. II.10. l'emplacement des bobines sur le circuit magnétique



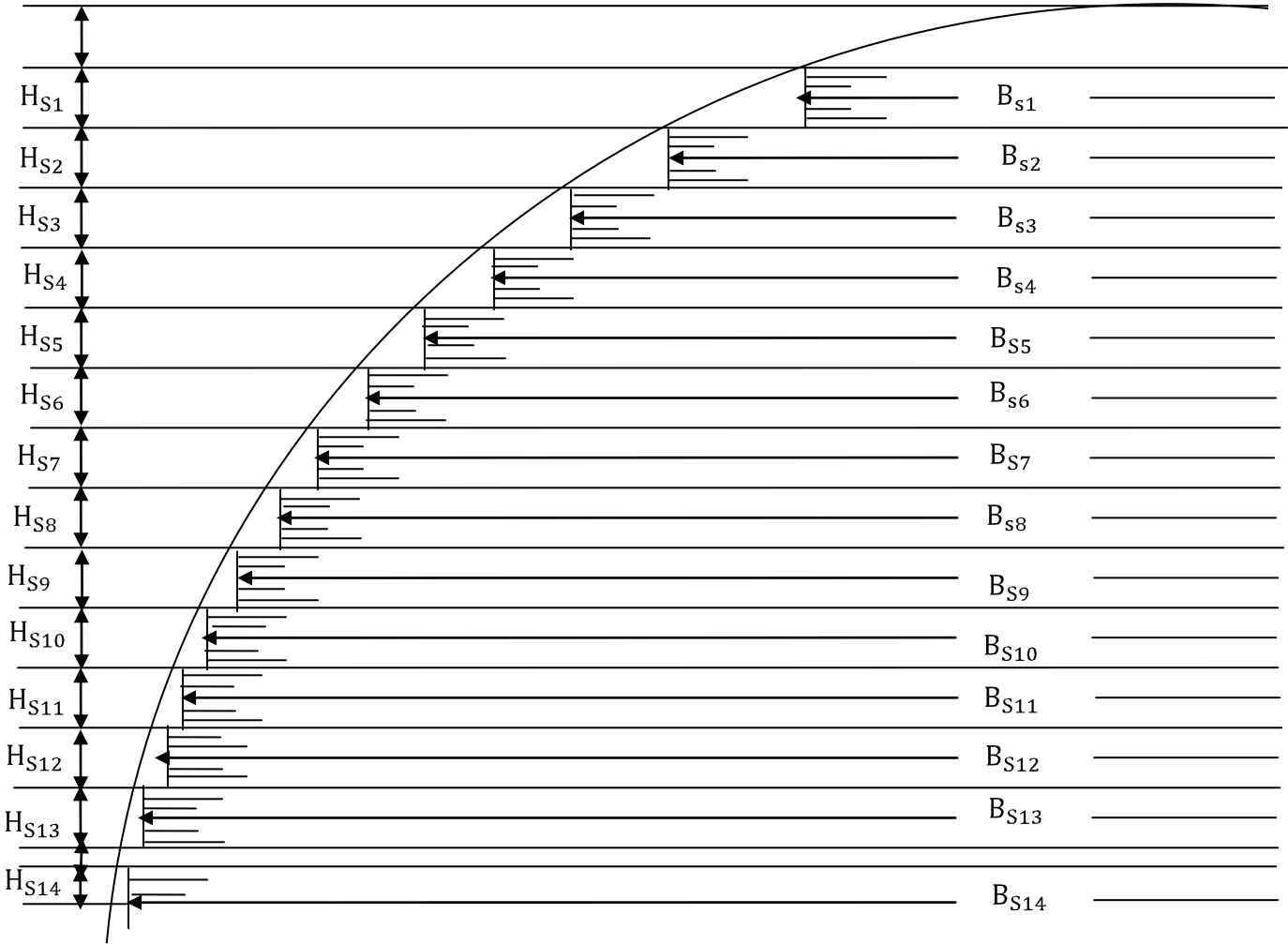


Fig. II.10 .dimensions des gradins

Résultats numériques

Puissance par voie magnétique	$S_1 = 15165,22\text{KVA}$
Puissance par colonne	$S_C = 5,055 \cdot 10^3\text{KVA}$
Puissance apparent de l'enroulement tertiaire	$S_B = 16000\text{KV}$
Courant dans les lignes HT	$I_{HT} = 80,327\text{A}$
Courant dans les lignes MT.....	$I_{MT} = 152,688\text{A}$
Courant dans les lignes BT.....	$I_{BT} = 239,938\text{A}$

Courant dans les enroulements

Courant dans les enroulements série.....	$I_1 = 80,327\text{A}$
Courant dans les enroulements shunt.....	$I_2 = 72,361\text{A}$
Courant dans les enroulements tertiaires.....	$I_3 = 138,528\text{A}$

Tension de phase

Tension de phase coté HT	$U_{PHT} = 69,859\text{KV}$
Tension de phase coté MT.....	$U_{PMT} = 132,191\text{KV}$
Tension de phase coté BT.....	$U_{PBT} = 38,5\text{KV}$
Tension de l'enroulement serie.....	$U_1 = 109\text{KV}$
Tension dans l'enroulement shunt	$U_2 = 121\text{KV}$
Tension dans l'enroulement tertiaire	$U_3 = 38,5\text{KV}$

Tension de court-circuit

Tension de court circuit HT-MT.....	$U_{ccHM} = 11\%$
Tension de court circuit active.....	$U_{cca} = 0,956\%$
Tension de court circuit réactive	$U_{ccr} = 10,958\%$
Coefficient d'utilisation	$K_U = 0,888$
Epaisseur rapporté de canal de fuite	$a_r = 17,391\text{Cm}$
Induction magnétique de crête	$B_c = 1,65\text{T}$
Diamètre de la colonne	$D = 56,082\text{Cm}$
Diamètre de canal de fuite	$D_{12} = 78,515\text{Cm}$
Section de fer	$S_{fer} = 2,18 \cdot 10^3\text{mm}^2$
Tension d'une spire	$U_{sp} = 0,08\text{KV}$
Hauteur approximative des enroulements.....	$h_B = 1,175 \cdot 10^3\text{mm}$

Nombre de spires

Enroulement basse tension	$W_3 = 482\text{spires}$
Enroulement moyenne tension	$W_2 = 874\text{spires}$
Enroulement haute tension.....	$W_1 = 788\text{spires}$
Tension des spires recalculées	$U_{Spr} = 0,08\text{KV}$
Densité moyenne de courant	$J_m = 6,316\text{A/mm}^2$
L'induction recalculée.....	$B_{cr} = 1,65\text{T}$

Calcul des enroulements

Enroulement tertiaire

Section de conducteur de l'enroulement	$S_{con3} = 21,934\text{mm}^2$
Densité de courant recalculée.....	$J_{mr3} = 6,297\text{A/mm}^2$
Erreur relative de la densité de courant.....	$ErrJ_{mr3} = 0,301\%$
Nombre de spires par couche	$N_{3C} = 4$ couches
Epaisseur de l'enroulement tertiaire	$a_3 = 11,53\text{mm}$
Hauteur magnétique de l'enroulement	$h_m = 1,175 \cdot 10^3\text{mm}$
Hauteur d'une spire	$h_{sp} = 10,45\text{mm}$
Hauteur définitive de l'enroulement	$h_{b3} = 1,185 \cdot 10^3\text{mm}$

Enroulement shunt

Section de conducteur de l'enroulement	$S_{con2} = 11,457\text{mm}^2$
Densité de courant recalculée.....	$J_{mr3} = 6,461\text{A/mm}^2$
Erreur relative de la densité de courant.....	$ErrJ_{mr3} = 2,297\%$
Nombre de galettes	$n_{g2} = 87$
Nombre de spires par galettes.....	$n_{sg2} = 10$
Epaisseur de l'enroulement	$a_2 = 20,569\text{mm}$

Enroulement série

Section de conducteur de l'enroulement	$S_{con1} = 12,719\text{mm}^2$
Densité de courant recalculée.....	$J_{mr1} = 6,375\text{A/mm}^2$
Erreur relative de la densité de courant.....	$ErrJ_{mr1} = 0,941\%$
Nombre de galettes	$n_{g1} = 82$
Nombre de spires par galettes.....	$n_{sg1} = 10$
Epaisseur de l'enroulement	$a_1 = 18,735\text{mm}$

Dimensionnement radial des enroulements

Diamètre intérieur de l'enroulement tertiaire.....	$D_{intBT} = 62,082\text{Cm}$
Diamètre extérieur de l'enroulement tertiaire.....	$D_{extBT} = 85,143\text{Cm}$
Diamètre intérieur de l'enroulement shunt.....	$D_{intMT} = 110,143\text{Cm}$
Diamètre extérieur de l'enroulement shunt.....	$D_{extMT} = 114,257\text{Cm}$
Diamètre intérieur de l'enroulement série.....	$D_{intHT} = 139,257\text{Cm}$
Diamètre extérieur de l'enroulement série.....	$D_{extHT} = 143,004\text{Cm}$

Dimensionnement du circuit magnétique

Hauteur de l'enroulement shunt	$H_{B2}=38,089\text{mm}$
Hauteur de l'enroulement série.....	$H_{B1}=30,861\text{mm}$
Hauteur de montage	$H=939\text{mm}$
Epaisseur de la cale de progression.....	$b_1=49,819\text{mm}$

Longueur de la fenêtre.....	$L_f = 105,504\text{Cm}$
Hauteur de la fenêtre.....	$H_c = 1,056 \cdot 10^3\text{mm}$
Hauteur de noyau.....	$H_n = 2,026 \cdot 10^3\text{mm}$
Longueur entre axes des colonnes	$L_c = 154,004\text{Cm}$
Longueur de noyau	$L_n = 356,508\text{Cm}$
Section de la culasse	$S_j = 3,27 \cdot 10^3\text{mm}^2$
L'induction dans la culasse.....	$B_j = 1,1\text{T}$

III.1.Introduction

Un transformateur est constitué en majeure partie de fer et de cuivre .puisque'il est statique, il est le siège de pertes dans le fer et dans le cuivre sans pertes mécaniques. Ces pertes influent directement sur son rendement et provoquent l'échauffement de ces parties constitutives.

Dans ce chapitre nous allons calculer les pertes comme suit :

III.2.Pertes à vide

Malgré que, le circuit magnétique du transformateur soit constitué par un empilage de minces tôles d'acier spécial, il existe des pertes magnétiques ou comme on les appelle les pertes dans le fer comprennent les pertes principales et les pertes supplémentaires.

III.2.1.Le Poids du noyau

Pour calculer le poids du noyau, on le divise en trois parties différentes (colonnes, culasses et coins) voir figure III.1.

$$G_n = G_1 + G_2 + G_3 \quad [\text{Kg}] \quad (\text{III.1})$$

III.2.1.1.Poids des coins

$$G_1 = \gamma_{\text{fer}} \cdot V_1 \quad [\text{Kg}] \quad (\text{III.2})$$

$$V_1 = 6 \cdot B_s \cdot S_{\text{fer}} \quad [\text{dm}^3] \quad (\text{III.3})$$

où γ_{fer} —masse volumique de la tôle utilisée [kg/dm^3] ; V_1 — Volume total des coins en [dm^3].

III.2.1.2.Poids des culasses

$$G_2 = \gamma_{\text{fer}} \cdot V_2 \quad [\text{Kg}] \quad (\text{III.4})$$

$$V_2 = 4 \cdot L_f \cdot S_j \quad [\text{dm}^3] \quad (\text{III.5})$$

où V_2 — Volume total des culasses ; S_j —Section de la culasse.

III.2.1.3. Poids des colonnes

$$G_3 = \gamma_{\text{fer}} \cdot V_3 \quad [\text{Kg}] \quad (\text{III.6})$$

$$V_3 = 3 \cdot H_c \cdot S_{\text{fer}} \quad [\text{dm}^3] \quad (\text{III.7})$$

où V_3 —Volume total des colonnes ; H_c —Hauteur de la colonne.

III.2.2. Pertes principales dans le noyau

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{10} = \sigma_{1,5} \cdot K_{BP} \cdot G_n \quad [W] \quad (III.8)$$

où $\sigma_{1,5}$ —Pertes spécifiques pour une induction de 1.5T, sa valeur est évaluée de 0.97 [W/Kg] ; K_{BP} —Coefficient correcteur des pertes spécifiques pour une induction de 1.5T, sa valeur est donnée par le tableau suivant :

Tableau .III.1.Coefficient correcteur des pertes spécifique K_{BP} en fonction de l'induction B.

B[T]	K_{BP}
$0.5 \leq B_c \leq 1.1$	$K_{BP} = 0.413 \cdot B_c^2$
$1.1 \leq B_c \leq 1.5$	$K_{BP} = 0.0758e^{1.72B_c}$
$1.5 \leq B_c \leq 1.8$	$K_{BP} = 0.0536e^{1.95B_c}$
$1.8 \leq B_c \leq 2$	$K_{BP} = 0.01126e^{2.81B_c}$

III .2.3.Pertes supplémentaires

III.2.3.1.Pertes supplémentaires dans les coins

Elles sont estimées à 50% des pertes principales leur cause est due à la non continuité du circuit magnétique qui présente un entre fer, donc une distorsion des lignes de champ, ces derniers sont déviées par rapport au sens de laminage.

$$P_{S1} = 0.5 \cdot \sigma_{1,5} \cdot K_{BP} \cdot G_1 \quad [W] \quad (III.9)$$

III .2.3.2.Pertes supplémentaires dans les colonnes et dans les culasses

Elles sont évaluées à 15% des pertes principales, elles sont dues à la variation de la structure des tôles lors de leurs usinages et aux accessoires de fixation du noyau.

$$P_{S2} = 0.15\sigma_{1,5} \cdot K_{BP} \cdot (G_2 + G_3) \quad [W] \quad (III.10)$$

III.2.3.3.Pertes fer totales

$$P_{0C} = P_{10} + P_{S1} + P_{S2} \quad [W] \quad (III.11)$$

$P_{0C} < P_{0g}$ Pertes à vide conforme aux données du cahier des charges.

III.3. Pertes Joules

Les pertes joules sont causées par le courant qui circule dans les enroulements. Pour les transformateurs à trois enroulements, ces pertes joules sont calculées pour les trois paires d'enroulement (haute tension moyenne tension, haut tension basse tension et moyenne tension basse tension) de la même manière qu'un transformateur à deux enroulements.

A fin on prendra la plus grande valeur des trois.

III.3.1. Calcul des résistances des enroulements

III.3.1.1. Enroulement tertiaire

➤ **Diamètre moyen d'une spire**

$$D_{m3} = D + 2 \cdot a_{03} + a_3 \quad [m] \quad (III.12)$$

➤ **Longueur moyenne d'une spire**

$$L_{m3} = \pi \cdot D_{m3} \quad [m] \quad (III.13)$$

➤ **Longueur totale de l'enroulement tertiaire**

$$L_{t3} = L_{m3} \cdot n_3 \quad [m] \quad (III.14)$$

où n_3 — nombre de spires de l'enroulement tertiaire.

➤ **Résistance de l'enroulement tertiaire**

$$R_3 = \rho_{75} \cdot \frac{L_{t3}}{S_{con3n}} \quad [\Omega] \quad (III.15)$$

où ρ_{75} — Résistivité du cuivre $\rho_{75} = 0.0215 \quad [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$ à 75°C ;

S_{con3n} — Section de conducteur normalisée.

➤ **Poids de l'enroulement tertiaire**

$$G_{C3} = \delta \cdot L_{t3} \cdot S_{con3n} \quad [\text{Kg}] \quad (III.16)$$

où δ — Poids spécifique du cuivre $\delta = 8.9 \quad [\text{Kg}/\text{dm}^3]$

III.3.1.2. Enroulement shunt

➤ **Diamètre moyen d'une spire**

$$D_{m2} = D + 2 \cdot a_{03} + 2 \cdot a_{12} + a_2 \quad [m] \quad (III.17)$$

➤ **Longueur moyenne d'une spire**

$$L_{m2} = \pi \cdot D_{m2} \quad [m] \quad (III.18)$$

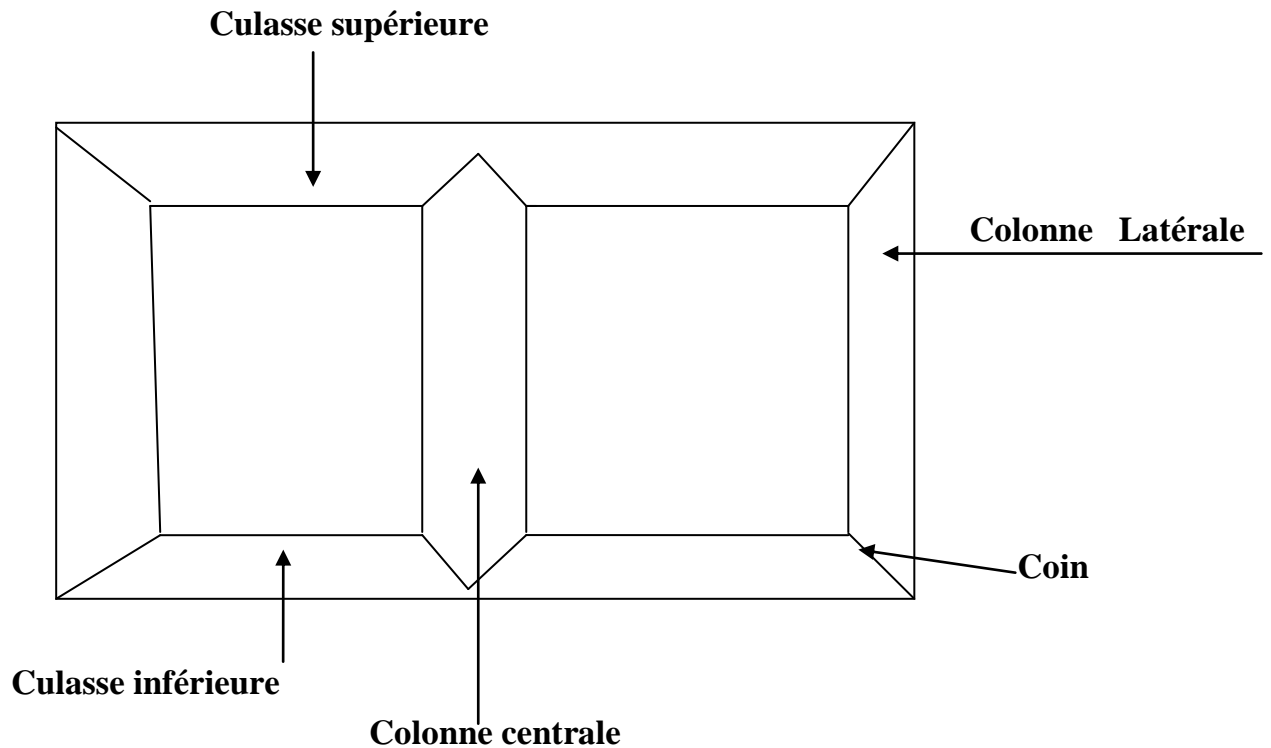


Fig. III.1. Les différentes parties du noyau

➤ **Longueur totale de l'enroulement shunt**

$$L_{t2} = L_{m2} \cdot n_2 \quad [\text{m}] \quad (\text{III.19})$$

où n_2 — Nombre de spires de l'enroulement shunt.

➤ **Resistance de l'enroulement shunt**

$$R_2 = \rho_{75} \cdot \frac{L_{t2}}{S_{\text{con}2n}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.20})$$

où ρ_{75} — Résistivité du cuivre $\rho_{75} = 0.0215 \text{ } [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$ à 75°C ; $S_{\text{con}2n}$ — Section de conducteur normalisée.

➤ **Poids de l'enroulement shunt**

$$G_{C2} = \delta \cdot L_{t2} \cdot S_{\text{con}2n} \quad [\text{Kg}] \quad (\text{III.21})$$

où δ — Poids spécifique du cuivre $\delta = 8.9 \text{ } [\text{Kg}/\text{dm}^3]$

III.3.1.3. Enroulement série

➤ **Diamètre moyen d'une spire**

$$D_{m1} = D + 2 \cdot a_{03} + 2 \cdot a_{23} + 2 \cdot a_2 + a_{12} + a_1 \quad [\text{m}] \quad (\text{III.22})$$

➤ **Longueur moyenne d'une spire**

$$L_{m1} = \pi \cdot D_{m1} \quad [m] \quad (III.23)$$

➤ **Longueur totale de l'enroulement série**

$$L_{t1} = L_{m1} \cdot n_1 \quad [m] \quad (III.24)$$

où n_1 — Nombre de spires de l'enroulement shunt.

➤ **Resistance de l'enroulement série**

$$R_1 = \rho_{75} \cdot \frac{L_{t1}}{S_{con1n}} \quad [\Omega] \quad (III.25)$$

où ρ_{75} — Résistivité du cuivre. $\rho_{75} = 0.0215 \quad [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$ à 75°C ; S_{con2n} — Section de conducteur normalisée.

➤ **Poids de l'enroulement serie**

$$G_{C1} = \delta \cdot L_{t1} \cdot S_{con2n} \quad [\text{Kg}] \quad (III.26)$$

où δ — Poids spécifique du cuivre $\delta = 8.9 \quad [\text{Kg}/\text{dm}^3]$

➤ **Poids total du cuivre**

$$G_{nc} = G_{c1} + G_{c2} + G_{c3} \quad [\text{Kg}] \quad (III.27)$$

III.3.2. Pertes joule dans l'enroulement tertiaire

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{cc3t} = K_{sup3} \cdot P_{cc3} + P_{conx3} \quad [W] \quad (III.28)$$

où P_{cc3} — Pertes principales dans l'enroulement tertiaire ; P_{conx3} — Pertes par connexion se sont des pertes dues a la résistance des fils qui relie les différentes phases du autotransformateur ; K_{sup3} — Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires qui sont dues a l'effet de peau électrique (ou effet pelliculaire).

➤ **Pertes principales dans l'enroulement tertiaire**

$$P_{CC3} = c \cdot K \cdot G_{C3} \cdot J_{mr3}^2 \quad [W] \quad (III.29)$$

où c — Nombre de phase qui est égale a 3 ; J_{mr3} — Densité moyenne de courant dans l'enroulement tertiaire ; K — facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à une température de 75°C . ($K=2.4$ pour le cuivre).

➤ **Calcul du coefficient des pertes supplémentaires dans l'enroulement tertiaire**

$$K_{Sup} = 1 + 0.095 \cdot \beta^2 \cdot l_3^4 \cdot (n_{3C} - 0.2)^2 \quad (III.30)$$

où l_3 — Largeur du conducteur ; n_{C3} — Nombre de couches ; β — Coefficient qui est donné par la relation suivante :

$$\beta = \frac{e_3 \cdot n_{S3C}}{h_{B3}}$$

où e_3 —Épaisseur du conducteur ; n_{S3c} — nombre de spires par couches.

➤ **Pertes par connexion**

Elles sont données par :

$$P_{\text{Conx3}} = K \cdot J_{\text{mr3}}^2 \cdot G_{\text{conx3}} \quad [\text{W}] \quad (\text{III.31})$$

➤ **Longueur du fil de connexion**

Pour une connexion triangle elle est donnée par la relation suivante :

$$L_{\text{conx3}} = 14 \cdot h_{B3} \quad [\text{m}] \quad (\text{III.32})$$

➤ **Section du conducteur de connexion**

$$S_{\text{conx3}} = \sqrt{3} \cdot S_{\text{con3n}} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III.33})$$

➤ **Résistance du fil de connexion**

$$R_{\text{conx3}} = \rho_{75} \cdot \frac{L_{\text{conx}}}{S_{\text{conx}}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.34})$$

➤ **Poids du fil de connexion**

$$G_{\text{conx3}} = \delta \cdot S_{\text{conx3}} \cdot L_{\text{conx}} \quad [Kg] \quad (\text{III.35})$$

III.3.3. Pertes Joules dans l'enroulement Shunt

Les pertes joules dans l'enroulement shunt sont données par la relation suivante :

$$P_{\text{cc2t}} = K_{\text{Sup2}} \cdot P_{\text{CC2}} + P_{\text{Conx2}} + P_{\text{Sup}} \quad [\text{W}] \quad (\text{III.36})$$

où P_{CC2} — Pertes principales dans l'enroulement shunt ; P_{Conx2} — Pertes par connexion.

Se sont des pertes dues à la résistance des fils qui relient les différentes phases du transformateur ; K_{Sup2} — Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires qui sont dues à l'effet de peau électrique (ou effet pelliculaire).

➤ **Pertes principales dans l'enroulement shunt**

$$P_{\text{CC2}} = c \cdot K \cdot G_{\text{C2}} \cdot J_{\text{mr2}}^2 \quad [\text{W}] \quad (\text{III.37})$$

où J_{mr2} —Densité moyenne de courant dans l'enroulement shunt; K —facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à une température de 75° C.

➤ **Calcul du coefficient des pertes supplémentaires dans l'enroulement shunt**

$$K_{\text{Sup2}} = 1 + 0.095 \cdot \beta^2 \cdot l_2^4 \cdot (n_{g2} - 0.2)^2 \quad (\text{III.38})$$

où l_2 — Largeur du conducteur ; β —Coefficient qui est donné par la relation suivante :

$$\beta = \frac{e_2 \cdot n_{sg2}}{h_{B2}}$$

où n_{g2} —Nombre de galettes ; h_{B2} — Épaisseur du conducteur ; n_{sg2} — Nombre de spires par galette.

➤ **Longueur du fil de connexion**

Pour une connexion étoile elle est donnée par la relation suivante :

$$L_{conx2} = 7,5 \cdot h_{B2} \quad [m] \quad (III.39)$$

➤ **Section du conducteur de connexion**

$$S_{conx2} = S_{con2n} \quad [mm^2] \quad (III.40)$$

➤ **Resistance du fil de connexion**

$$R_{conx2} = \rho_{75} \cdot \frac{L_{conx2}}{S_{conx2}} \quad [\Omega] \quad (III.41)$$

➤ **Poids du fil de connexion**

$$G_{conx2} = \delta \cdot S_{conx2} \cdot L_{conx2} \quad [Kg] \quad (III.42)$$

➤ **Pertes supplémentaires dans l'enroulement shunt**

L'enroulement shunt est soumis à une induction constante, car il se trouve au milieu de l'enroulement haute tension et basse tension, ces derniers induisent des courants de Foucault dans l'enroulement shunt (voir la figure III.2.). Ces pertes sont calculées par la relation suivante :

$$P_{sup} = (K_{sup22} - 1) \cdot P_{cc2} \quad [W] \quad (III.43)$$

où K_{sup22} —Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires ; il est donné par la relation suivante :

$$K_{sup22} = 1 + 5.2 \cdot \beta^2 \cdot \left[\frac{f}{\rho_{75} \cdot 10^4} \right]^2 \cdot l^4 \cdot (n_{sg2} - 0.5)^2 \quad (III.45)$$

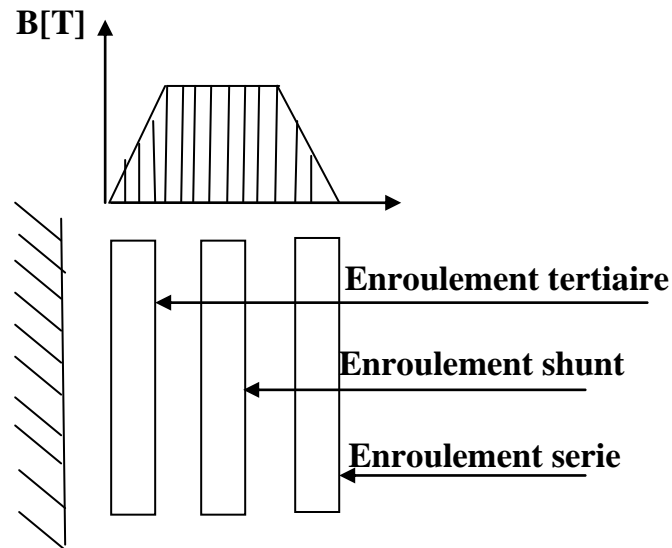


Fig. III.2.L' enroulement shunt soumis à une induction maximale

III.3.4. Pertes Joules dans l'enroulement série

Les pertes joules sont données par la relation suivante :

$$P_{cc1t} = K_{sup} \cdot P_{cc1} + P_{Conx1} \quad [W] \quad (III.46)$$

où P_{CC1} — Pertes Principales dans l'enroulement série ; P_{Conx1} — Pertes par connexion. Se sont des pertes dues à la résistance des fils qui relient les différentes phases du transformateur ; K_{sup} — Coefficient tenant des pertes supplémentaire qui sont dues à l'effet de peau électrique.

➤ Pertes principales dans l'enroulement série

$$P_{cc1} = c \cdot K \cdot G_{c1} \cdot J_{mr1}^2 \quad [W] \quad (III.47)$$

où J_{mr1} — Densité moyenne de courant dans l'enroulement série ; K — facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à une température de 75°C.

➤ Calcul du coefficient des pertes supplémentaire dans l'enroulement série

$$K_{Sup1} = 1 + 0.095 \cdot \beta^4 \cdot l_1^2 \cdot (n_{g1} - 0.2)^2 \quad (III.48)$$

où l_1 — Largeur du conducteur ; n_{g1} — Nombre de galettes ; β — Coefficient qui est donné par la relation suivante :

$$\beta = \frac{e_1 \cdot n_{sg1}}{h_{B1}}$$

où e_1 — Épaisseur du conducteur ; n_{sg1} — Nombre de spires par galette.

➤ **Pertes par connexion**

Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{\text{conx1}} = K \cdot J_{\text{mr1}}^2 \cdot G_{\text{conx1}} \quad [\text{W}] \quad (\text{III.49})$$

➤ **Longueur du fil de connexion**

Pour une connexion étoile ; elle est donnée par la relation suivante :

$$L_{\text{conx1}} = 7.5 \cdot h_{B1} \quad [\text{m}] \quad (\text{III.50})$$

➤ **Section du conducteur de connexion**

$$S_{\text{conx1}} = S_{\text{con1n}} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{III.51})$$

➤ **Résistance du fil de connexion**

$$R_{\text{conx1}} = \rho_{75} \cdot \frac{L_{\text{conx1}}}{S_{\text{conx1}}} \quad [\Omega] \quad (\text{III.52})$$

➤ **Poids du fil de connexion**

$$G_{\text{conx1}} = \delta \cdot S_{\text{conx1}} \cdot L_{\text{conx1}} \quad [\text{Kg}] \quad (\text{III.53})$$

III.3.5.Pertes dans la cuve

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{\text{cuv}} = 10 \cdot K \cdot S_1 \quad [\text{W}] \quad (\text{III.54})$$

où S_1 —Puissance apparente du transformateur ; K —Facteur tenant compte des pertes dans la cuve, il est donné en fonction de la puissance apparente du transformateur, sa valeur est donnée par le tableau suivant :

Tableau.III.2. Tableau donnant K en fonction de S_1

Puissance S_1 en [KVA]	≤ 1000	1000-4000	6300-10000	16000-25000	40000-63000
K	0.01-0.015	0.02-0.03	0.03-0.04	0.04-0.05	0.06-0.07

Dans notre cas K est compris entre [0.04-0.05]

III.3.6. Pertes joules totales

On calculera les pertes joules totales pour chaque paire d'enroulement.

III.3.6.1. Pertes joules totales entre les enroulements série et tertiaire

$$P_{cc13} = P_{cc1t} + P_{cc3t} + P_{Cuv} \quad [W] \quad (III.55)$$

III.3.6.2. Pertes joules entre les enroulements sérié et shunt

$$P_{cc12} = P_{cc1t} + P_{cc2t} + P_{Cuv} \quad [W] \quad (III.56)$$

III.3.6.3. Pertes joules entre les enroulements shunt et tertiaire

$$P_{cc23} = P_{cc2t} + P_{cc3t} + P_{Cuv} \quad [W] \quad (III.57)$$

Après avoir Calculé les pertes joules pour chaque paire d'enroulement, on prendra la valeur maximale. Cette valeur sera prise comme valeur des pertes joules du transformateur.

III.3.7. Erreur relative sur les pertes

$$\frac{\Delta P_{cc}}{P_{cc}} = \frac{|P_{cc} - P_{ccmax}|}{P_{cc}} \cdot 100 \quad [%] \quad (III.58)$$

où P_{cc} — Pertes en charge ; elles sont données par le cahier de charge ; P_{ccmax} —Valeur maximale des pertes joules entre chaque paire d'enroulement.

Cette erreur ne doit pas dépasser 10%, dans le cas contraire ; on choisit d'autres valeurs des dimensions des conducteurs des enroulements, si non on recalcule le diamètre de la colonne.

III.4. Calcul de la tension de court-circuit

On calcul la tension de court-circuit entre chaque paire d'enroulement.

➤ Tension de court-circuit entre les enroulements série et shunt

La tension de court-circuit est donnée par la formule suivante.

$$U_{cca12} = \sqrt{U_{cca12}^2 + U_{ccr12}^2} \quad [%] \quad (III.59)$$

où U_{cca12} —Tension de court-circuit active entre l'enroulement série et shunt ; elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{cca12} = \frac{P_{cc12}}{S_1} \cdot 100 \quad [%] \quad (III.60)$$

où— U_{ccr12} Tension de court-circuit réactive entre l'enroulement série et shunt ; elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{ccr12} = \frac{7.92 \cdot S_1 \cdot f \cdot \beta_{12} \cdot a_{r12} \cdot K_r \cdot 10^{-3}}{U_{spr}^2} \quad [\%] \quad (III.61)$$

où f — fréquence du courant ; S_1 — Puissance par colonne ; K_r —Coefficient de ROGOWSKI ; a_{r12} —Épaisseur de canal de fuite; il est donné par la relation suivante :

$$a_{r12} = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \quad [Cm] \quad (III.62)$$

où β_{12} —Coefficient de sveltesse entre l'enroulement série et l'enroulement shunt.

$$\beta_{12} = \frac{\pi \cdot d_{12}}{h_m} \quad (III.63)$$

où d_{12} —Diamètre du canal de fuite entre l'enroulement série et l'enroulement shunt.

$$d_{12} = D + 2 \cdot a_{03} + 2 \cdot a_3 + 2 \cdot a_{23} + 2 \cdot a_2 + a_1 \quad [Cm] \quad (III.64)$$

➤ **Tension de court-circuit entre l'enroulement série et tertiaire**

La Tension de court-circuit est donnée par la relation suivante :

$$U_{cc13} = \sqrt{U_{cca13}^2 + U_{ccr13}^2} \quad [\%] \quad (III.65)$$

où U_{cca13} —Tension de court-circuit active entre l'enroulement série et tertiaire ; elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{cca13} = \frac{P_{cc13}}{S_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (III.66)$$

où— U_{ccr13} Tension de court-circuit réactive entre l'enroulement série et shunt ; elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{CCr13} = \frac{7.92 \cdot S_1 \cdot f \cdot \beta_{13} \cdot a_{r13} \cdot K_r \cdot 10^{-3}}{U_{spr}^2}$$

où a_{r13} —Épaisseur de canal de fuite; il est donné par la relation suivante :

$$a_{r13} = a_{12} + a_2 + a_{23} + \frac{a_1 + a_3}{3} \quad [Cm] \quad (III.67)$$

où β_{13} — Coefficient de sveltesse entre l'enroulement série et l'enroulement tertiaire.

$$\beta_{13} = \frac{\pi \cdot d_{13}}{h_m} \quad (III.68)$$

où d_{13} —Diamètre du canal de fuite entre l'enroulement série et l'enroulement shunt.

$$d_{12} = D_{cp3} + a_3 + a_{23} + a_2 + a_{12} \quad [Cm] \quad (III.69)$$

➤ **Tension de court-circuit entre l'enroulement shunt et tertiaire**

La Tension de court-circuit est donnée par la relation suivante :

$$U_{cc23} = \sqrt{U_{cca23}^2 + U_{ccr23}^2} \quad [\%] \quad (III.70)$$

où U_{cca23} —Tension de court-circuit active entre l'enroulement série et shunt ; elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{cca23} = \frac{P_{cc23}}{S_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (III.71)$$

où U_{ccr23} —Tension de court-circuit réactive entre l'enroulement série et shunt ; elle est donnée Par la relation suivante :

$$U_{ccr23} = \frac{7.92 \cdot S_1 \cdot f \cdot \beta_{23} \cdot a_{r23} \cdot K_r \cdot 10^{-3}}{U_{spr}^2} \quad [\%] \quad (III.72)$$

où a_{r23} —Épaisseur rapportée de canal de fuite, donné par la formule suivante :

$$a_{r23} = a_{23} + \frac{a_{23} + a_3}{3} \quad [Cm] \quad (III.73)$$

$$d_{23} = 2 \cdot a_{03} + 2 \cdot a_3 + a_{23} \quad [Cm] \quad (III.74)$$

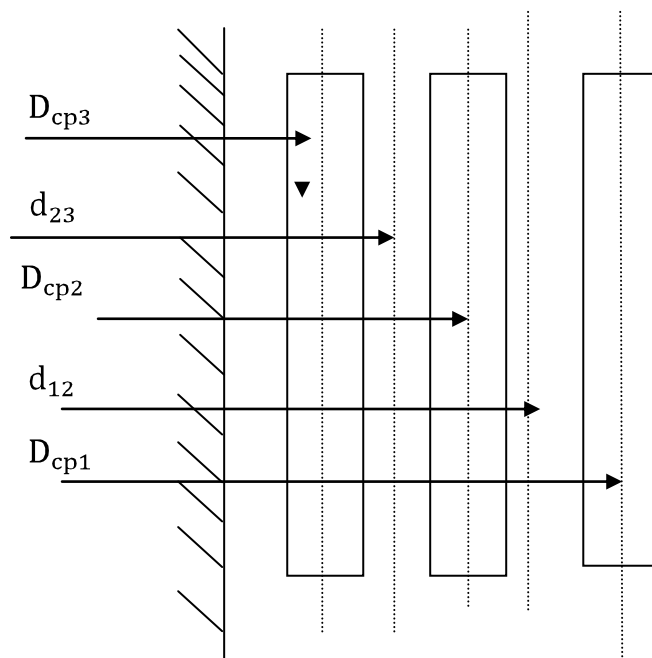


Fig. III.3. Les différents diamètres des canaux de fuite

où D_{cp1} —diamètre moyen de l'enroulement série ; D_{cp2} —Diamètre moyen de l'enroulement shunt ; D_{cp3} —diamètre moyen de l'enroulement tertiaire ;

U_{ccr13} —Tension de court-circuit réactive entre l'enroulement série et tertiaire ; β_{23} — Coefficient de sveltesse entre l'enroulement série et l'enroulement tertiaire.

$$\beta_{23} = \frac{\pi \cdot d_{23}}{h_m} \quad (\text{III.75})$$

où d_{23} — Diamètre du canal de fuite entre l'enroulement shunt et l'enroulement tertiaire.

$$d_{23} = 2 \cdot a_{03} + 2 \cdot a_3 + a_{23} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{III.76})$$

III.4.1. Erreur sur les tensions de court-circuit

➤ Erreur relative sur la tension de court-circuit entre l'enroulement

Série et l'enroulement shunt

$$\frac{\Delta U_{\text{ccHM}}}{U_{\text{ccHM}}} = \frac{|U_{\text{ccHM}} - U_{\text{cc12}}|}{U_{\text{ccHM}}} \quad [\%] \quad (\text{III.78})$$

Cette valeur ne doit pas dépasser 10%, dans le cas contraire on recalcule le diamètre de la colonne.

➤ Erreur relative sur la tension de court-circuit entre l'enroulement

Série et l'enroulement tertiaire

$$\frac{\Delta U_{\text{ccHB}}}{U_{\text{ccHB}}} = \frac{|U_{\text{ccHB}} - U_{\text{cc13}}|}{U_{\text{ccHB}}} \quad [\%] \quad (\text{III.79})$$

L'erreur relative de cette tension ne doit pas dépasser 14.5%, dans le cas contraire on recalcule le diamètre de la colonne.

➤ Erreur relative sur la tension de court-circuit entre l'enroulement

Tertiaire et l'enroulement shunt

$$\frac{\Delta U_{\text{ccMB}}}{U_{\text{ccMB}}} = \frac{|U_{\text{ccMB}} - U_{\text{cc23}}|}{U_{\text{ccMB}}} \quad [\%] \quad (\text{III.80})$$

La valeur de cette erreur relative est fixée par accord entre le client et le fabricant.

III.5. Calcul du rendement

Par définition, le rendement d'un transformateur est égal au rapport entre la puissance active qu'il fournit à la charge et la puissance active que le réseau d'alimentation lui fournit. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\eta = 1 - \frac{P_{10} + r_1 \cdot I_1^2 + r_2 \cdot I_2^2 + r_3 \cdot I_3^2}{P_2 + P_3 + P_{10} + r_1 I_1^2 + r_2 \cdot I_2^2 + r_3 \cdot I_3^2}$$

Résultats numériques

Pertes à vide

Poids total des coins	$G_{c1} = 485,327K_g$
Poids total des culasses.....	$G_{c2} = 1,056 \cdot 10^3 K_g$
Poids total des colonnes.....	$G_{c3} = 6,552 \cdot 10^4 K_g$
Poids total noyau.....	$G_n = 1,76 \cdot 10^4 K_g$
Coefficient correcteur des pertes spécifique.....	$K_{BP} = 1,338$
Pertes dans le noyau.....	$P_{01} = 2,284 \cdot 10^4 W$
Pertes supplémentaires dans les culasses et les colonnes.....	
.....	$P_{S1} = 3,331 \cdot 10^3 W$
Pertes supplémentaires dans les coins	$P_{S2} = 314,98W$
Pertes fer totales	$P_0 = 2,649 \cdot 10^4 W$
Diamètre moyen de la spire de l'enroulement tertiaire	
.....	$D_{m3} = 63,235Cm$
Longueur moyenne de la spire.....	$L_{m3} = 1,987m$
Longueur totale de l'enroulement tertiaire	$L_{t3} = 957,131m$
Resistance de l'enroulement tertiaire	$R_3 = 0,935 \Omega$
Poids de l'enroulement tertiaire.....	$G_{C3} = 187,406K_g$
Diamètre moyen de la spire de l'enroulement shunt.....	$D_{m2} = 91,445Cm$
Longueur moyenne de la spire.....	$L_{m2} = 2,873m$
Longueur totale de l'enroulement shunt.....	$L_{t2} = 2,512 \cdot 10^3 m$
Resistance de l'enroulement shunt.....	$R_2 = 4,821$
Poids de l'enroulement shunt.....	$G_{c2} = 250,349$
Diamètre moyen de la spire de l'enroulement série.....	$D_{m1} = 120,376Cm$
Longueur moyenne de la spire.....	$L_{m1} = 3,782m$
Longueur totale de l'enroulement série	$L_{t1} = 2,978 \cdot 10^3 m$
Resistance de l'enroulement série.....	$R_1 = 5,082\Omega$
Poids de l'enroulement série.....	$G_{C1} = 333,79$
Pertes joule dans l'enroulement tertiaire.....	$P_{cc3} = 1,293 \cdot 10^4 W$
Pertes joule dans l'enroulement shunt.....	$P_{cc2} = 7,524 \cdot 10^4 W$
Pertes joule dans l'enroulement série.....	$P_{cc1} = 2,362 \cdot 10^4 W$
Longueur du fil de connexion des enroulements BT.....	
.....	$L_{conx3} = 16,59Cm$
Section du conducteur de connexion.....	$S_{conx3} = 38,105mm^2$
Résistance du fil de connexion.....	$R_{conx3} = 9,361 \cdot 10^{-3}\Omega$
Pertes par connexion cote enroulement BT.....	$P_{conx3} = 129,387W$
Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires.....	$K_{sup3} = 1$
Longueur du fil de connexion des enroulements MT.....	
.....	$L_{conx2} = 6,907m$
Section du conducteur de connexion.....	$S_{cox2} = 11,2mm^2$
Résistance du fil de connexion.....	$R_{conx2} = 0,013 \Omega$
Pertes par connexion cote enroulement MT.....	$P_{conx2} = 68,978 W$

Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires.....	$K_{sup2} = 1,003$
Longueur du fil de connexion de enroulement HT.....	$L_{t1} = 2,978 \cdot 10^3 \text{ m}$
Section du conducteur de connexion.....	$S_{conx1} = 12,6 \text{ mm}^2$
Résistance du fil de connexion.....	$R_{Conx1} = 0,015$
Pertes par connexion cote enroulement HT.....	$P_{conx1} = 23,287\text{W}$
Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires.....	$K_{sup1} = 1,003es$
Pertes joule totales.....	$P_{cc1t} = 2,37 \cdot 10^4\text{W}$
Pertes joule totales.....	$P_{cc2t} = 7,562 \cdot 10^4\text{W}$
Pertes joule totales.....	$P_{cc3t} = 1,306 \cdot 10^4\text{W}$
Pertes dans la cuve.....	$P_{cuv} = 6,066 \cdot 10^3\text{W}$
Pertes joule entre les enroulements MT et HT	$P_{cc12} = 1,054 \cdot 10^5\text{W}$
Pertes joule entre les enroulements HT et BT.....	$P_{cc13} = 4,282 \cdot 10^4\text{W}$
Pertes joule entre les enroulements MT et BT.....	$P_{cc23} = 9,475 \cdot 10^4\text{W}$
Calcul de la valeur max entre les valeurs P_{cc12} , P_{cc13} et P_{cc23}	$P_{cc12} = 1,054 \cdot 10^5\text{W}$
Erreur relative sur les pertes	$ErreP_{cc} = 0,027\%$

Calcul des tensions de court circuit actives entre chaque paire d'enroulement

Tension de C-C active entre les enroulements HT et BT.....	$U_{cca13} = 0,268\%$
Tension de C-C active entre les enroulements MT et BT.....	$U_{cca23} = 0,595\%$
Diamètre de canal de fuite	$d_{13c} = 535,363\text{mm}$
Coefficient de Svelteesse.....	$\beta_{13} = 1,206$
Diamètre de canal de fuite	$d_{12c} = 106,006\text{Cm}$
Coefficient de Svelteesse	$\beta_{12} = 3,616$
Diamètre de canal de fuite	$d_{23c} = 76.888 \text{ Cm}$
Coefficient de Svelteesse entre les enroulements MT et BT.....	$\beta_{23} = 2,056$
Epaisseur rapport, e du canal de fuite	$a_{rr} = 333,239 \text{ Cm}$
Tension de court-circuit réactive entre MT et BT.....	$U_{ccr23} = 10,599 \%$
Tension de court-circuit réactive entre HT et MT.....	$U_{ccr12} = 11,661 \%$
Tension de court-circuit réactive entre HT et BT	$U_{ccr13} = 7,906 \%$
Tension de court-circuit entre série et shunt.....	$U_{cc12} = 11,82 \%$
Tension de court-circuit entre série et BT.....	$U_{cc13} = 15,82 \%$
Tension de court-circuit entre MT et BT.....	$U_{cc23} = 21,232 \%$

$$\text{Err } U_{ccHM} = 6,195 \%$$

$$\text{Err } U_{ccHB} = 5,469 \%$$

$$\text{Err } U_{ccMB} = 1,104 \%$$

$$\text{Le rendement de l'autotransformateur}\eta = 99,7$$

IV. 1. Introduction

Le transformateur est essentiellement constitué par le circuit magnétique canalisant le flux (fer), le circuit électrique canalisant les courants (cuivre), et les isolants interposés entre les précédents.

Dans tous ces matériaux, une fraction de la puissance active reçue par le transformateur passe sous forme calorifique, dans le fer par hystérésis et courant de Foucault, dans le cuivre par effet joule et dans les isolants par les pertes diélectriques.

Malgré son rendement qui est excellent, le transformateur engendre des pertes. L'évacuation de la chaleur produite par ces pertes doit être assurée pour ne pas causer une élévation dangereuse de la température.

L'évacuation de la chaleur se fait par trois modes différents :

➤ Par conduction

Elle concerne surtout la transmission de la chaleur à l'intérieur des corps solides (cuivre, fer, isolant).

➤ Par convection

Les particules de liquide ou de gaz en contact avec un corps chaud deviennent plus légères et montent en cédant leur place à d'autres particules qui ne sont pas encore chaudes. Ces dernières à leur tour s'échauffent, montent et ainsi de suite.

➤ Par rayonnement

La transmission de chaleur dans ce cas s'effectue par des ondes électromagnétiques toujours d'un corps à haute température, vers un corps à basse température.

IV. 2. Echauffement du circuit magnétique

Pour faciliter le calcul thermique, on assimile la section de la colonne à un rectangle de dimension X et Y :

où

$$X = 0,9 \cdot D_{\text{fer}} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.1})$$

Avec X est la largeur du rectangle

D_{fer} , le diamètre du fer (ou de la colonne).

$$Y = \frac{S_{\text{fer}}}{X} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.2})$$

où Y étant la longueur de rectangle; S_{fer} la section du fer (ou de la colonne).

On admettra que les pertes sont uniquement réparties et que le flux thermique se produit dans le sens transversal et longitudinal entre les couches du circuit magnétique.

IV.2.1. Calcul de l'échauffement maximum par rapport à la surface dans la direction longitudinale

$$\theta_1 = \frac{P \cdot X^2}{8 \cdot \lambda_1} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV.3})$$

où P — Pertes spécifiques par unité de volume.

$$P = P_{\text{sp}} \cdot \gamma \quad [\text{W}/\text{m}^3] \quad (\text{IV.4})$$

$$P_{\text{sp}} = \gamma_{1,5} \cdot K_{\text{BP}} \quad [\text{W}/\text{K}_g] \quad (\text{IV.5})$$

$$\lambda_1 = 20 \quad [\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}]$$

où λ_1 — Coefficient de conduction thermique longitudinale ; γ — Poids spécifique des tôles [K_g/m^3] ; P_{sp} — Pertes spécifique par unité de masse.

IV.2.2. Calcul de la différence de température entre les surfaces du circuit magnétique et l'huile dans la direction longitudinale

$$\theta_2 = \frac{P \cdot X}{2 \cdot \alpha_{\text{con}}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV.6})$$

où α_{con} — Coefficient de convection pour la surface longitudinale, il est compris entre 100 et 110.

On choisit $\alpha_{\text{con}}=100 \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{C}]$

IV.2.3 Calcul de l'échauffement maximum par rapport à la surface dans le sens transversal

$$\lambda_t=3 \quad [\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}]$$

$$\theta'_1 = \frac{P \cdot Y^2}{8 \cdot \lambda_t} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV.7})$$

où λ_t — Coefficient de conduction thermique dans le sens transversal.

IV.2.4. Calcul de la différence de température entre les surfaces du circuit magnétique et l'huile dans la direction longitudinale

$$\theta'_2 = \frac{P \cdot Y}{2 \cdot \alpha_{\text{con}}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.8})$$

IV.2.5. Echauffement maximum du circuit magnétique

➤ Dans le sens longitudinal

$$\theta_L = \theta_1 + \theta_2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.9})$$

➤ Dans le sens transversal

$$\theta_t = \theta'_1 + \theta'_2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.10})$$

IV.2.6. Echauffement moyen résultant du circuit magnétique

$$\theta_{\text{moy/h}} = \frac{\theta_T \cdot (\theta'_2 + 1,5 \cdot \theta'_1)}{\theta_T + \theta'_2 + 1,5 \cdot \theta'_1} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.11})$$

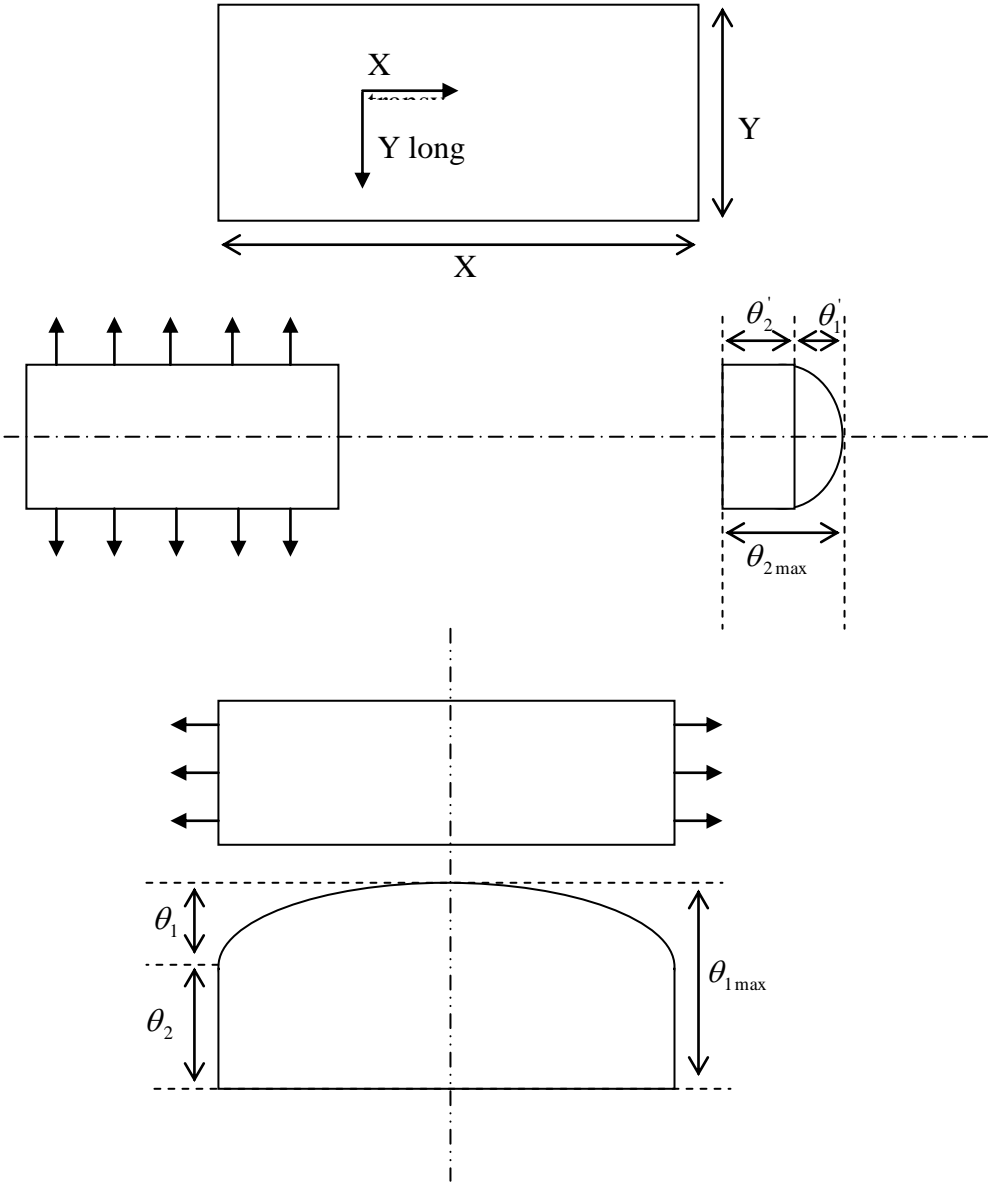


Fig. IV.1. Echauffement du circuit magnétique dans la direction transversale et longitudinale.

IV.3. Echauffement des enroulements

La distribution de la température dans les enroulements est beaucoup plus complexe que dans le noyau et dépend essentiellement du type d'enroulement, du nombre et de l'aménagement des canaux de refroidissement ainsi que du mode de refroidissement.

Vu que la répartition de la température suivant la largeur et la hauteur de l'enroulement n'est pas uniforme, on introduit dans le calcul un échauffement moyen de l'enroulement par rapport à l'huile.

La figure (IV.2), montre la différence des températures intérieure dans l'une des sections droites de l'enroulement qui est plongée entre un canal à l'huile, étroit d'un côté, tandis que de l'autre côté, l'huile circule librement.

IV.3.1. Echauffement moyen de l'enroulement basse tension par rapport à l'huile

L'enroulement basse tension est constitué de quatre bobines de mêmes dimensions séparées par des canaux de refroidissement.

La figure (IV.3), montre une vue générale de l'enroulement basse tension.

IV .3.1.1. Echauffement de la première bobine

➤ Diamètre extérieur de la première bobine

$$D_{ext1} = D_{intBT} + 2(I_3 + I_{S3}) \quad [Cm] \quad (IV.12)$$

Généralement en pratique, on place une cale chaque 45° , d'où $N_{cal} = 8$

➤ La surface intérieure de l'enroulement en contact avec l'huile

• Surface intérieure

$$S'_{int} = \pi \cdot D_{intBT} \cdot H_{b3} \quad [Cm^2] \quad (IV.13)$$

➤ Le coefficient tenant compte de la surface intérieure de l'enroulement occupé par les Cales

$$K_{i1} = \frac{\pi \cdot D_{intBT} - N_{cal} \cdot L_{cal}}{\pi \cdot D_{intBT}}$$

où N_{cal} — Nombre de cales, L_{cal} — Largeur de la cale en [mm].

$$S_{int1} = \pi \cdot K_{i1} \cdot S'_{int1} \quad [Cm^2] \quad (IV.14)$$

➤ Calcul de la surface extérieure de la bobine

$$S'_{ext1} = \pi \cdot D_{ext1} \cdot H_{B1} \quad [Cm^2] \quad (IV.15)$$

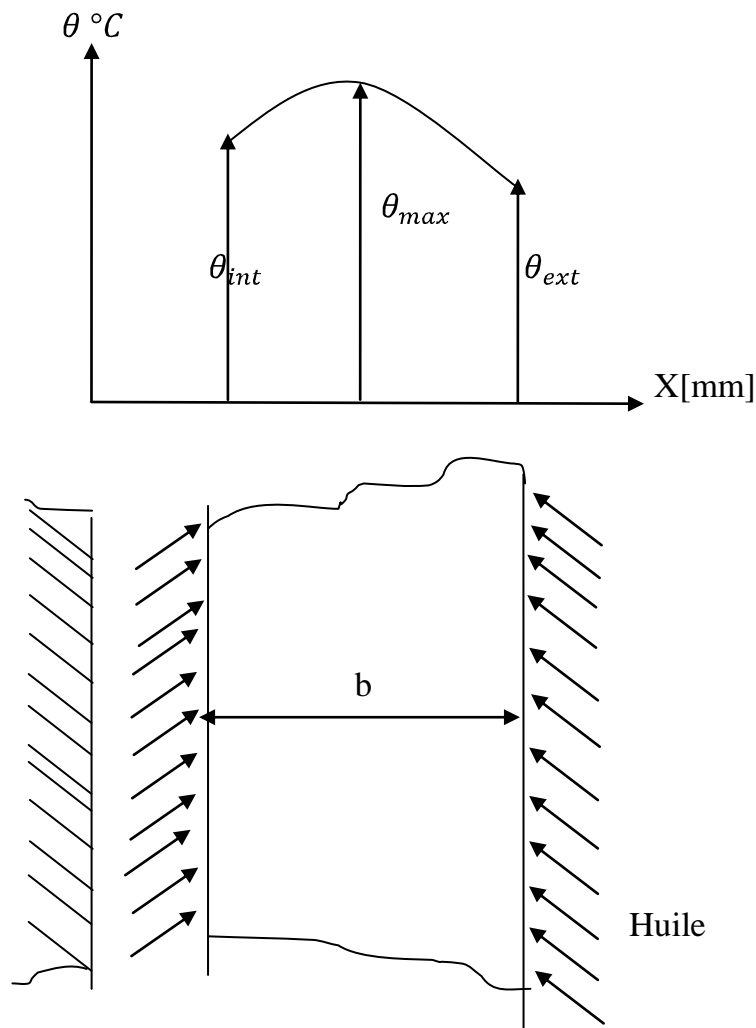


Fig. IV.2. Représentation de la température à l'intérieur de l'enroulement

- **Le coefficient tenant compte de la surface extérieure de l'enroulement occupé par les Cales**

$$K_{el} = \frac{\pi \cdot D_{ext1} - N_{cal} \cdot L_{cal}}{\pi \cdot D_{ext}} \quad (IV.16)$$

d'où $S_{ext1} = S'_{ext1} \cdot K_{el} \quad [Cm^2] \quad (IV.17)$

- **Calcul de la Conductivité thermique résultante de la première bobine**

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_p \cdot l_3}{2 \cdot I_{s3p}} \quad [W/m^{\circ}C] \quad (IV.18)$$

$\lambda_p = 0.2$ [W/m°C] ; Conductivité thermique du papier.

où l_3 – Largeur du conducteur en [mm] ; I_{s3p} – Épaisseur de l'isolation en [mm].

➤ **Calcul des résistances thermique de l'isolation**

- **du coté intérieur de la première bobine**

$$R_{31int} = \frac{I_{s3p}}{\lambda_p \cdot S_{int1}} + \frac{1}{\alpha_{con} \cdot S_{int1}} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}] \quad (\text{II.19})$$

- **du coté extérieur de la première bobine**

$$R_{31ext} = \frac{I_{s3p}}{\lambda_p \cdot S_{ext1}} + \frac{1}{\alpha_{con} \cdot S_{ext1}} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}] \quad (\text{II.20})$$

➤ **Calcul de la distance où la température est maximale**

$$X_{31} = \frac{l_3 \cdot (R_{31ext} \cdot S'_{ext1} + \frac{l_3}{2 \cdot \lambda_{res31}})}{R_{31ext} \cdot S'_{ext1} + R_{31int} \cdot S'_{int1} + \frac{l_3}{\lambda_{res31}}} \quad [\text{m}] \quad (\text{II.21})$$

➤ **Calcul des flux de chaleur**

On pose :

$$i_{31} = \frac{P_{e31}}{P_{i31}}$$

où P_{e31} ; P_{i31} – sont les flux thermique traversant respectivement S_{i1} et S_{e1}

$$i_{31} = \frac{l_3 - X_{31}}{X_{31}} \cdot \frac{S'_{ext1}}{S'_{int1}} \quad (\text{IV.22})$$

- **Le flux de chaleur traversant la surface extérieure de la bobine**

$$P_{e31} = \frac{P_{cc31}}{1 + (\frac{1}{i_{31}})} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.23})$$

où P_{cc31} – représente les pertes joules totales dans la première bobine.

$$P_{cc31} = \frac{P_{cc3t}}{l_2} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.24})$$

- **Le flux de chaleur traversant la surface intérieure de la bobine**

$$P_{i31} = \frac{P_{cc31}}{1 + i_{31}} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.25})$$

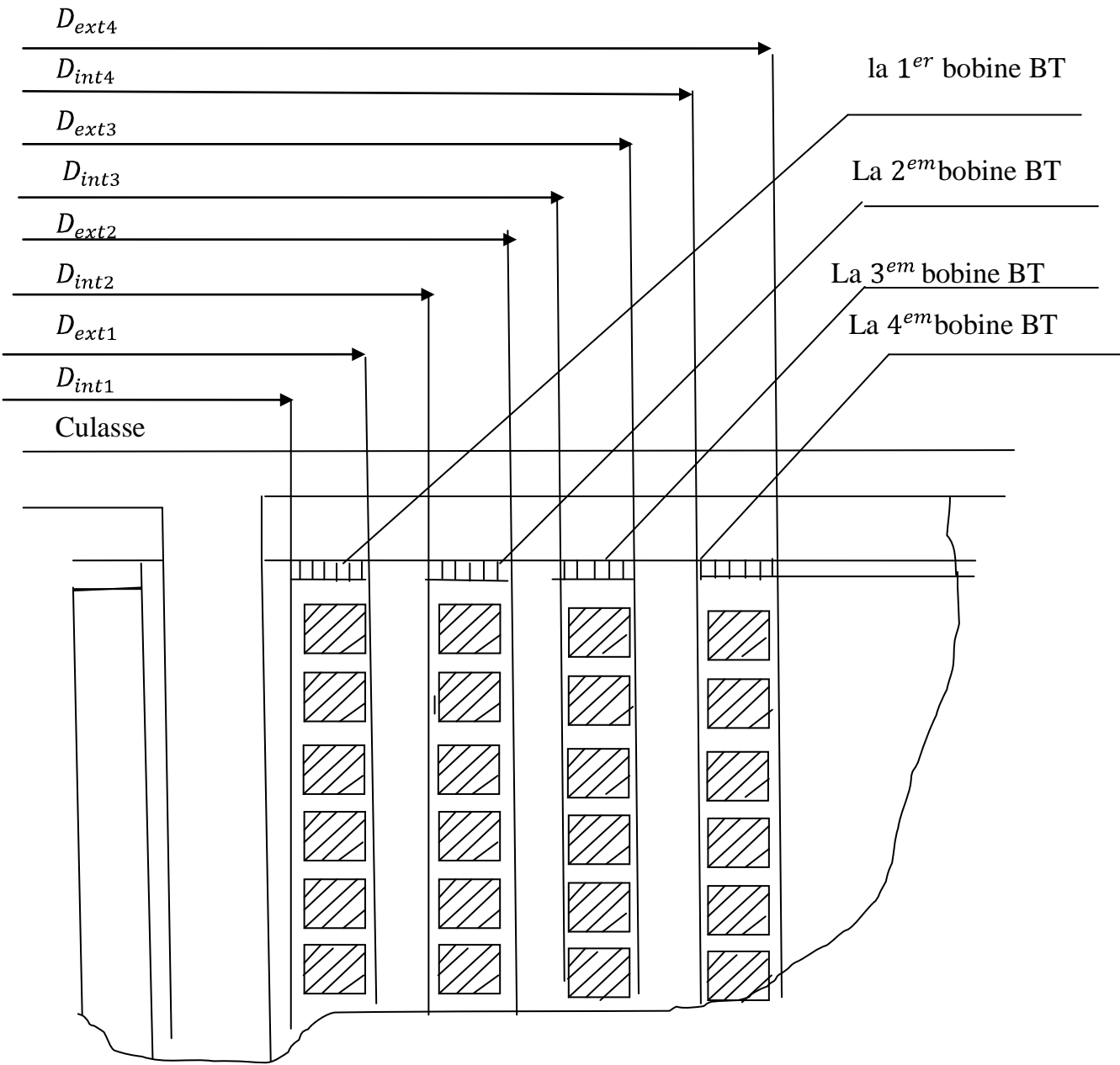


Fig. IV.3. Vue en coupe de l'enroulement basse tension sur une colonne du circuit magnétique.

➤ **Calcul des résistances internes**

- **du côté intérieur de la bobine**

$$R_{i31int1} = \frac{X_{31}}{2 \cdot \lambda_{res31} \cdot S'_{int1}} \quad [^{\circ}\text{C/W}] \quad (\text{IV.26})$$

- **du côté extérieur de la bobine**

$$R_{i31ext1} = \frac{l_3 - X_{31}}{2 \cdot \lambda_{res31} \cdot S'_{int1}} \quad [^{\circ}\text{C/W}] \quad (\text{IV.27})$$

➤ **Calcul des échauffements maximaux dans les conducteurs**

- **du côté intérieur de la bobine**

$$\theta_{i31max} = P_{i31} (R_{31int1} + R_{i31int1}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.28})$$

- **du côté extérieur de la bobine**

$$\theta_{e31max} = P_{e31} (R_{31ext1} + R_{i31ext1}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.29})$$

➤ **Echauffement maximal du conducteur du point le plus chaud par rapport à la surface**

$$\theta_{31max} = \sup(\theta_{i31max}, \theta_{e31max}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.30})$$

➤ **Echauffement moyen du conducteur par rapport à l'huile**

$$\theta_{31moy/h} = \theta_{31max} - \frac{i_{31} \cdot \theta_{31ext} - \theta_{31int}}{3 \cdot (1 + i_{31})} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.31})$$

où θ_{31ext} ; θ_{31int} — sont les échauffements superficiels du conducteur respectivement du côté extérieur et intérieur de la bobine.

$$\theta_{31ext} = P_{e31} \cdot R_{e31ext} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.32})$$

$$\theta_{31int} = P_{i31} \cdot R_{i31int} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.33})$$

IV.3.1.2. Echauffement de la deuxième, troisième et quatrième bobine

➤ **Diamètre intérieur de la deuxième bobine**

$$D_{int2} = D_{ext1} + 2 \cdot L_{cal} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.34})$$

➤ **Diamètre extérieur de la deuxième bobine**

$$D_{ext2} = D_{int2} + 2 \cdot (l_3 + I_{s3}) \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.35})$$

➤ **Diamètre intérieur de la troisième bobine**

$$D_{int3} = D_{ext2} + 2 \cdot L_{cal} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.36})$$

➤ **Diamètre extérieur de la troisième bobine**

$$D_{ext3} = D_{int3} + 2 \cdot (l_3 + I_{s3}) \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.37})$$

➤ **Diamètre intérieur de la quatrième bobine**

$$D_{\text{int4}} = D_{\text{ext3}} + 2 \cdot L_{\text{cal}} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.38})$$

➤ **Diamètre extérieur de la quatrième bobine**

$$D_{\text{ext4}} = D_{\text{int4}} + 2 \cdot (l_3 + I_{s3}) \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.39})$$

La suite du procédé du calcul est le même que pour la première bobine, Le calcul se fait en détail pour chaque bobine dans le programme de calcul.

D'où l'échauffement maximum par rapport à l'huile de l'enroulement basse tension est :

$$\theta_{3\text{max}} = \sup (\theta_{31\text{moy/h}}, \theta_{32\text{moy/h}}, \theta_{33\text{moy/h}}, \theta_{34\text{moy/h}}) \cdot 1,2 \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV.40})$$

IV.3.2. Echauffement de l'enroulement série

Pour les enroulements en galettes avec des canaux de refroidissement entre tous les éléments, les pertes dans un élément de volume de l'enroulement sont données par la formule suivante :

$$P_{1\text{el}} = K \cdot J_{\text{mr1}}^2 \cdot l_1 \cdot e_1 \cdot n_{\text{sg1}} \cdot \delta \cdot K_{1\text{sup}} \cdot 10^{-6} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.41})$$

où l_1 — Largeur du conducteur en [mm] ; e_1 — Épaisseur du conducteur en [mm] ; δ — La masse volumique du cuivre (8,9 Kg/m³) ; n_{sg1} — Nombre de conducteur par galette ; $K_{1\text{sup}}$ — Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires qui sont dues à l'effet de peau électrique ; K — Coefficient du cuivre J_{mr1} — Densité moyenne recalculée du courant en [A/mm²] ; $P_{1\text{el}}$ — Pertes par unité de volume.

➤ **Calcul de la surface d'un élément**

$$S_{1\text{el}} = K_z \cdot 2 \cdot (e'_1 + l'_1 \cdot n_{\text{sg1}}) \cdot 10^{-4} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{IV.42})$$

où e'_1 — Épaisseur du conducteur avec isolation ; l'_1 — La largeur du conducteur avec isolation ; K_z — Coefficient ; on prend : $K_z = 0,7$.

➤ **Calcul du flux thermique par élément**

$$P_1 = 1,07 \cdot \frac{J_{\text{mr1}} \cdot l_1 \cdot n_1 \cdot K_{1\text{sup}}}{K_z \cdot (b'_1 + l'_1 \cdot n_{\text{sg1}})} \quad [\text{W/m}] \quad (\text{IV.43})$$

➤ **Calcul de la chute de température interne de l'enroulement série**

$$\theta_{i1} = \frac{P_1 \cdot \delta \cdot 10^{-4}}{\lambda_p} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV.44})$$

où $\delta = 0.225$ mm ; épaisseur de l'isolation.

➤ **Calcul de la chute de température sur la surface de l'enroulement**

$$\theta_{S1} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_{31} \cdot P_1^{0.6} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.45})$$

où K_1 —Coefficient tenant compte de la température sur la surface de l'enroulement ; K_2 —Coefficient qui prend en considération les difficultés de transfert de chaleur par convection de l'huile dans les canaux intérieur des enroulements (BT et MT, MT et HT) ; K_3 —Coefficient qui prend en considération l'influence de la convection de l'huile par rapport à la hauteur des canaux horizontaux, sa valeur est donnée dans le tableau (IV.1).

où $K_1 = 1$: Dans le cas d'un refroidissement naturel ; $K_1 = 0.7$ à 0.9 Dans le cas d'un refroidissement forcé.

$K_2 = 1$: Quand l'enroulement est situé à l'extérieur

$K_2 = 1.1$: Quand l'enroulement est situé à l'intérieur

Pour une tension de 230 KV, la valeur de C est de 6 mm

Tableau .IV.1.

C/a	0.07.0.08	0.08 0.09	0.11	0.11 0.12	0.13 0.14	0.15 0.19	0.2
K_3	1.1	1.05	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80

Dans le calcul, on prend :

$K_1 = 1$: Puisque il s'agit d'un refroidissement naturel

$K_2 = 1$: Puisque l'enroulement série est situé à l'extérieur

$\frac{C}{a_1} = 0.14$: D'après le tableau (IV.1) : $K_3 = 0.9$

➤ **Calcul de la température moyenne de l'enroulement série par rapport à l'huile**

$$\theta_{1\text{moy/h}} = \theta_{S1} + \theta_{i1} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.46})$$

IV.3.1.3 .Calcul de l'échauffement de l'enroulement shunt

$$P_{2e2} = K \cdot J_{mr2}^2 \cdot l_2 \cdot e_2 \cdot n_{sg2} \cdot \delta \cdot K_{sup2} \cdot 10^{-6} \quad [\text{W}] \quad (\text{IV.47})$$

où l_2 — Largeur du conducteur en [mm] ; e_2 — Épaisseur du conducteur en [mm] ; δ — La masse volumique du cuivre ($8,9 \text{ Kg/dm}^3$) ; n_{sg2} — Nombre de conducteur par galette ; K_{2sup} — Coefficient tenant compte des pertes supplémentaires qui sont dues à l'effet de peau électrique ; K — Coefficient du cuivre ; J_{mr2} — Densité moyenne recalculée du courant en [A/mm^2] ; P_{2e2} — Pertes par unité de volume.

➤ **Calcul de la surface d'un élément**

$$S_{2e2} = Kz \cdot 2 \cdot (e'_2 + l'_2 \cdot n_{sg2}) \cdot 10^{-4} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{IV.48})$$

où e'_2 — Épaisseur du conducteur avec isolation ; l'_2 — Largeur du conducteur avec isolation.

➤ **Calcul de flux thermique par élément de volume**

$$P_2 = 1.07 \cdot \frac{J_{mr2} \cdot l_2 \cdot n_2 \cdot K_{2sup}}{Kz \cdot (b'_2 + l'_2 \cdot n_{sg2})} \quad [\text{W /m}^2] \quad (\text{IV.49})$$

➤ **Calcul de la chute de température interne de l'enroulement shunt**

$$\theta_{i2} = \frac{P_2 \cdot \delta}{\lambda_p} \cdot 10^{-4} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV.50})$$

➤ **Calcul de la chute de température sur la surface de l'enroulement**

$$\theta_{s2} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot P_2^{0.6} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV.51})$$

Dans notre cas :

$K_1 = 1$: Pour un refroidissement naturel

$K_2 = 1.1$: Parce que l'enroulement shunt est situé à l'intérieur

$\frac{c}{a_2} = 0.8$: D'après le tableau.(IV .1).

➤ **Calcul de la température moyenne de l'enroulement shunt par rapport à l'huile**

$$\theta_{2moy/h} = \theta_{i2} + \theta_{s2} \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{IV.52})$$

IV.4.Echauffement de l'huile

IV.4.1.Dimensionnement de la cuve

Pour dimensionner la cuve il faut tenir compte de la classe d'isolement, de l'échauffement admissible et de l'isolement garantissant des distances suffisantes pour qu'il n'y ait pas d'amorçage (arcs).

La forme adoptée pour la cuve est rectangulaire, avec des radiateurs accolés, afin de permettre le refroidissement de l'huile. Voir la figure .IV.4.

➤ **Longueur intérieure de la cuve**

$$L_{\text{Cuv}} = 3 \cdot D_{\text{ext1}} + 2 \cdot a_{11} + 2 \cdot X_{11} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.53})$$

où D_{ext1} — Diamètre extérieur de l'enroulement série ; X_{11} — distance d'isolement dans notre cas ($X_{11} = 57\text{m m}$) pour $U=1040\text{ KV}$; a_{11} — Distance latérale entre deux enroulements voisins en [mm].

➤ **Largeur intérieure de la cuve**

$$L_{\text{cu}} = D_{\text{ext1}} + 2 \cdot Y_{11} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.54})$$

où Y_{11} — distance d'isolement, avec $X_{11} = Y_{11}$

- **Recalcul de l'échauffement de l'huile**
- **l'échauffement de l'huile par rapport à la cuve**

➤ **Hauteur de la cuve**

$$H_{\text{cuv}} = H_n + X_{22} + Y_{22} \quad [\text{Cm}] \quad (\text{IV.56})$$

où H_n — Hauteur du noyau ; X_{22} — Hauteur des tôles d'embases, sa valeur varie de 30 à 50 mm. Dans notre cas $X_{22} = 30\text{mm}$;

Y_{22} — distance entre la tige de serrage et le couvercle.

Pour des tensions très importantes Y_{22} varie de 70 à 75Cm, dans notre cas, on prend : $Y_{22} = 70\text{Cm}$.

➤ **Calcul de la surface totale de la cuve**

$$ST_{\text{cu}} = 2 \cdot (L_{\text{cuv}} + l_{\text{cu}}) \cdot H_{\text{cuv}} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV.57})$$

- **Calcul de la surface du couvercle**

$$ST_{\text{co}} = L_{\text{cuv}} \cdot l_{\text{cu}} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV.58})$$

- **Calcul de la surface de convection du couvercle**

$$SC_{\text{co}} = 0.5 \cdot ST_{\text{co}} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV.59})$$

- **Calcul de la surface de rayonnement du couvercle**

$$SR_{\text{co}} = S_{\text{ryco}} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV.60})$$

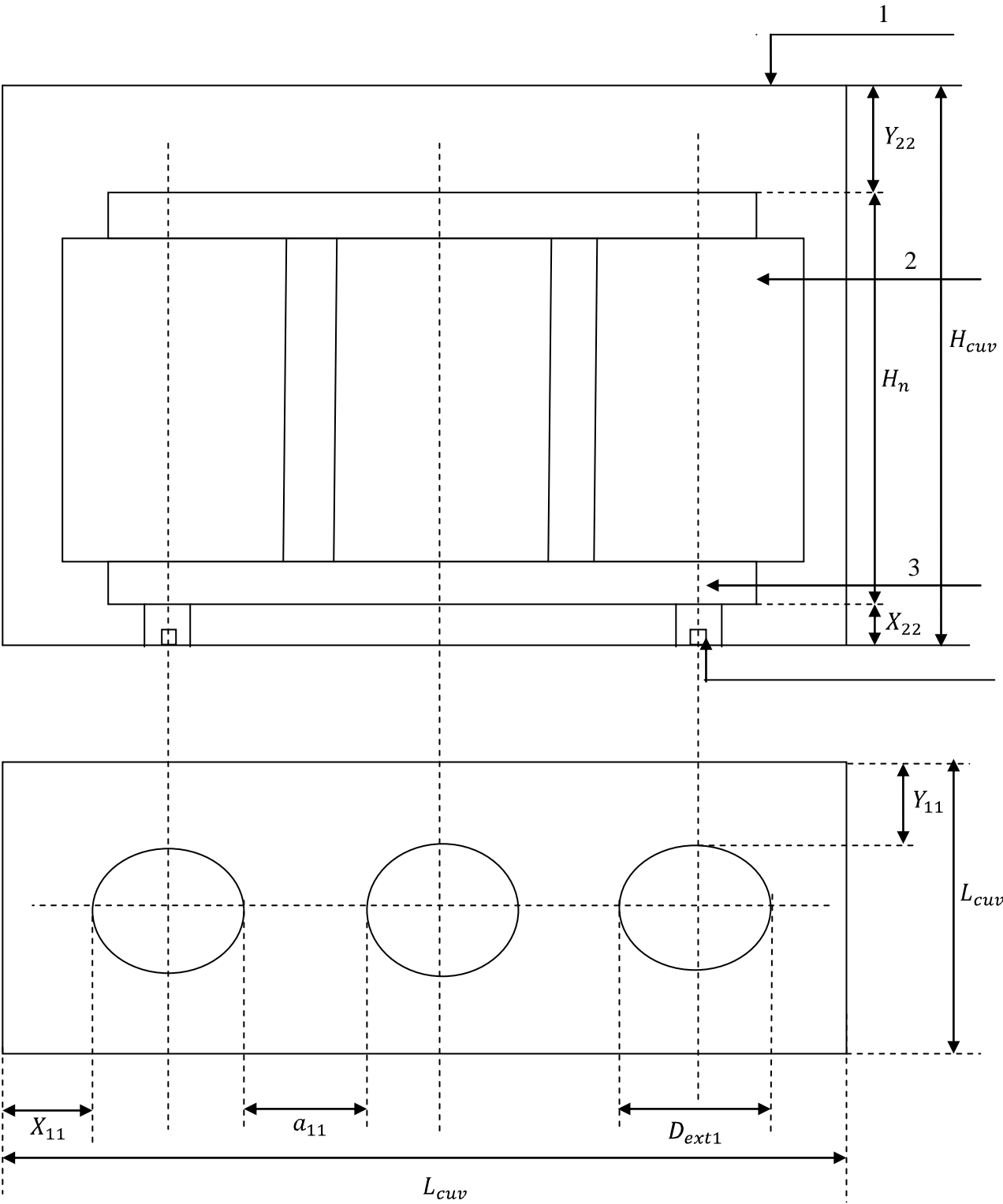


Fig. IV.4. Partie active du transformateur (vue à l'intérieur de la cuve).

1-Couvercle

3-Culasse

2-Enroulement

4-Tôle d'embase

➤ **Élévation moyenne de la température d'huile**

$$T_{\text{moyh}} = T_{\text{cu}} - T_{\text{moye/h}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.61})$$

où $T_{\text{cu}} - C$ 'est la sur élévation de température du cuivre ; $T_{\text{moye/h}} - C$ 'est l'échauffement moyen le plus élevé des trois bobines BM, MT et HT.

➤ **Élévation maximale de la température d'huile**

$$T_{\text{maxh}} = T_{\text{moyh}} \cdot 1.2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.63})$$

➤ **Echauffement de la cuve par rapport à l'air**

$$T_{\text{c/a}} = T_{\text{moyh}} - T_{\text{h/c}} - 2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.64})$$

où $T_{\text{h/c}}$ —L'échauffement de l'huile par rapport à la cuve, sa valeur varie de 5 à 6°C dans les calculs, on prend : $T_{\text{h/c}}=5^{\circ}\text{C}$

➤ **Recalcul de l'échauffement de l'huile**

• **Echauffement de l'huile par rapport à la cuve**

La chaleur transportée par l'huile se transmet à la cuve par convection naturelle.

L'échauffement de l'huile par rapport à la cuve est donné par la relation suivant :

$$T_{\text{h/c}} = 1.165 \cdot \left[\frac{1.05(P_0 + P_{\text{cc}})}{ST_{\text{tub}} + 0.5 \cdot ST_{\text{co}} + ST_{\text{cu}}} \right]^{0.6} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.65})$$

où P_0 — Pertes fer totales ; P_{cc} — Pertes totales en charge ; ST_{tub} — Surface totale des tubes (radiateurs). ST_{co} — Surface totale du couvercle ; ST_{cu} — Surface totale de la cuve.

• **La surface totale nécessaire d'évacuation de la chaleur est égale**

$$S_{\text{ne}} = 1.05 \cdot \frac{(P_{\text{cc}} + P_0)}{2.5(T_{\text{c/a}})^{1.25}} - 1.12 \cdot S_{\text{rycu}} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV.66})$$

• **la surface de rayonnement de la cuve**

$$S_{\text{rycu}} = ST_{\text{cu}} \cdot KT \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV.67})$$

où KT — Coefficient qui prend en considération le rayonnement de la cuve avec $KT=1.5$

• **la surface de convection de la cuve**

$$SC_{\text{cu}} = ST_{\text{cu}} \cdot K \quad [\text{m}^2] \quad (\text{IV.68})$$

où K — Coefficient qui prend en considération la surface de convection de la cuve, avec $K=1$

➤ **Echauffement de la cuve par rapport à l'huile**

La cuve transmet la chaleur à l'air ambiant par la convection et par le rayonnement.

• **L'Echauffement de la cuve par rapport à l'air**

est donné par la relation suivante :

$$T_{c/a} = \left[\frac{1.05(P_{cc} + P_o)}{2.8 \cdot ST_{ry} + 2.5 \cdot ST_{conv}} \right]^{0.8} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.69})$$

➤ **Température moyenne du circuit magnétique**

L'échauffement du circuit magnétique doit être inférieure ou égale à l'échauffement admissible qui est de 115 °C.

$$T_{cm} = \theta_{\max cm/h} + \theta_{h/c} + \theta_{c/a} + T_a \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.70})$$

➤ **Les Températures moyennes finales des enroulements**

L'échauffement moyen des enroulements doit être inférieure ou égale à l'échauffement admissible qui est de 105 °C.

• **Enroulement serie**

$$T_{e1} = \theta_{1moyh} + \theta_{h/a} + \theta_{c/a} + T_a \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.71})$$

• **Enroulement shunt**

$$T_{e2} = \theta_{2moyh} + \theta_{h/c} + \theta_{c/a} + T_a \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.72})$$

• **Enroulement tertiaire**

$$T_{e3} = \theta_{3moyh} + \theta_{h/c} + \theta_{c/a} + T_a \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{IV.73})$$

IV.5. Calcul du volume de l'huile

➤ **volume de la cuve sans radiateurs**

$$V_c = L_{cuv} \cdot L_{cu} \cdot H_{cuv} \quad [\text{dm}^3] \quad (\text{IV.74})$$

➤ **volume de la partie décuvable**

$$V_d = 1.2 \cdot \left[\frac{G_n}{\gamma_{fer}} + \frac{G_c}{\gamma_c} \right] \quad [\text{dm}^3] \quad (\text{IV.75})$$

où

$$\gamma_{fer} = 7.65 \text{ Kg/dm}^3$$

$$\gamma_c = 8.9 \text{ Kg/dm}^3$$

Le volume occupé par les accessoires de la fixation et de serrage à l'intérieur de la cuve est estimé à 20% de la partie active.

Résultats numériques

Calcul de l'échauffement du circuit magnétique

Longueur de la colonne.....	$X=0,505 \text{ m}$
Largeur de la colonne.....	$Y=0,432 \text{ m}$
Pertes par unité de volume.....	$P=9,93 \text{ W/m}^3$
Echauffement max du circuit magnétique /la surface dans la direction longitudinale	$\theta_1 = 15,811 \text{ }^\circ\text{C}$
Echauffement max du circuit magnétique /la surface dans la direction transversale	$\theta'_1 = 77,189 \text{ }^\circ\text{C}$
Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction longitudinale.....	$\theta_2 = 69,509 \text{ }^\circ\text{C}$
Différence de température entre la surface du circuit magnétique et l'huile dans la direction transversale	$\theta'_2 = 21,445 \text{ }^\circ\text{C}$
Echauffement max du circuit magnétique dans la direction longitudinale.....	$\theta_{1\text{max}} = 85,319 \text{ }^\circ\text{C}$
Echauffement max du circuit magnétique dans la direction transversale.....	$\theta_{2\text{max}} = 98,633 \text{ }^\circ\text{C}$
Echauffement moy du circuit magnétique /huile.....	$\theta_{\text{moy/h}} = 57,385^\circ\text{C}$

Calcul de l'échauffement de l'enroulement tertiaire

1. Première bobine

Diamètre extérieur de la première bobine BT.....	$D_{\text{ext1}} = 62,575 \text{ Cm}$
Surface intérieure de la première bobine BT.....	$S'_{\text{int1}} = 2,311 \cdot 10^4 \text{ Cm}^2$
Coefficient tenant compte de la Surface intérieure de la bobine BT.....	$K_{i1} = 0,979$
Surface intérieure en contact avec huile de la première bobine BT.....	$S_{\text{int1}} = 2,264 \cdot 10^4 \text{ Cm}^2$
Surface extérieure de la première bobine BT.....	$S'_{\text{ext1}} = 2,348 \cdot 10^4 \text{ Cm}^2$
Coefficient tenant compte de la Surface extérieure de la bobine BT.....	$K_{e1} = 0,98$

Surface extérieure en contact avec huile de la première bobine BT.....	
.....	$S_{\text{ext}1} = 2,282 \text{ Cm}^2$
Epaisseur de l'isolation.....	$I_{3\text{sp}} = 0,225 \text{ mm}$
Conductivité résultante de la première bobine BT.....	$\lambda_r = 0,996 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
Résistivité thermique du coté, intérieur de la première bobine BT.....	
.....	$R_{31\text{int}} = 4,914 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/W}$
Résistivité thermique du coté, extérieur de la première bobine BT.....	
.....	$R_{31\text{ext}} = 4,929 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/W}$
Distance où la température est max du coté de la première bobine BT.....	
.....	$X_{31} = 1.12710^{-3} \text{ m}$
Flux thermique traversant la première bobine B.....	$I_{31} = 1,003$
Perte en court-circuit dans la première bobine BT.....	$P_{\text{cc}31} = 2,184 \cdot 10^3 \text{ W}$
Flux thermique traversant Surface extérieure de la première bobine BT.....	
..... ;.....	$P_{\text{ext}31} = 1,094 \cdot 10^3 \text{ W}$
Flux thermique traversant Surface intérieure de la première bobine BT.....	
.....	$P_{\text{int}31} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ W}$
Résistivité interne du coté extérieur de la première bobine BT.....	
.....	$R_{i31e} = 2,38 \cdot 14^{-4} \Omega$
Résistivité interne du coté intérieur de la première bobine BT.....	
.....	$R_{i31i} = 2,449 \cdot 10^{-4} \Omega$
Echauffement max dans les conducteurs coté intérieur de la première bobine BT	
.....	$T_{i31\text{max}} = 5,625^\circ\text{C}$
Echauffement max dans les conducteurs coté extérieur de la première bobine BT.....	
.....	$T_{e31\text{max}} = 5,626^\circ\text{C}$
Echauffement superficiel du conducteur coté intérieur de la première bobine BT....	
.....	$T_{31\text{int}} = 0,26 \text{ }^\circ\text{C}$
Echauffement superficiel du conducteur coté extérieur de la deuxième bobine BT...	
.....	$T_{31\text{ext}} = 0,267 \text{ }^\circ\text{C}$
Echauffement moyen de la première bobine BT.....	$T_{31\text{moy}} = 5,538^\circ\text{C}$

2. Deuxième Bobine

Diamètre intérieur de la deuxième bobine BT.....	$D_{int2} = 64,008$	Cm
Surface intérieure de la deuxième bobine BT.....	$S'_{int2} = 2,363 \cdot 10^4$	Cm^2
Diamètre extérieur de la deuxième bobine BT.....	$D_{ext2} = 64,561$	Cm
Surface extérieure de la deuxième bobine BT.....	$S'_{ext2} = \cdot 10^4$	Cm^2
Coefficient tenant compte de la Surface intérieure de la bobine BT.....	$K_{i2} = 0,98$	
Surface extérieure en contact avec huile de la deuxième bobine BT.....	$S_{ext2} = 2,354 \cdot 10^4$	Cm^2
Coefficient tenant compte de la Surface extérieure de la bobine BT.....	$K_{e2} = 0,98$	
Surface intérieure en contact avec huile de la deuxième bobine BT.....	$S_{int2} = 2,316 \cdot 10^4$	Cm^2
Résistivité thermique du coté, intérieur de la deuxième bobine BT	$R_{32int} = 4,804 \cdot 10^{-3}$	Ω
Résistivité thermique du coté, extérieur de la deuxième bobine BT.....	$R_{32ext} = 4,727 \cdot 10^{-3}$	Ω
Distance où la température est max du coté de la deuxième bobine BT	$X_{32} = 1,128 \cdot 10^{-3}$	
Flux thermique traversant la deuxième bobine BT.....	$I_{32} = 1.001$	
Flux thermique traversant Surface extérieure de la deuxième bobine BT.....	$P_{ext32} = 66,057$	
Flux thermique traversant Surface intérieure de la deuxième bobine BT.....	$P_{int31} = 1,185 \cdot 10^3$	W
Résistivité interne du coté extérieur de la deuxième bobine BT.....	$R_{i32e} = 2,344 \cdot 10^{-4}$	$^{\circ}C/W$
Résistivité interne du coté intérieur de la deuxième bobine BT.....	$R_{i32i} = 2,38 \cdot 10^{-4}$	$^{\circ}C/W$

Echauffement max des conducteurs coté intérieur de la deuxième bobine BT.....

..... $T_{i32max} = 5,461^{\circ}\text{C}$

Echauffement max des conducteurs coté extérieur de la deuxième bobine BT.....

..... $T_{e32max} = 0,017^{\circ}\text{C}$

Echauffement superficiel du conducteur coté intérieur de la deuxième bobine BT

..... $T_{32int} = 0,258^{\circ}\text{C}$

Echauffement max de la deuxième bobine B..... $T_{32max} = 48,533^{\circ}\text{C}$

Echauffement moyen de la deuxième bobine BT..... $T_{32moy} = 7,977^{\circ}\text{C}$

Echauffement de la bobine BT..... $T_{32moy/h} = 7,977^{\circ}\text{C}$

Calcul d'échauffement de l'enroulement shunt

Largeur du conducteur avec l'isolation de la bobine MT.....

..... $e_{2p} = 7,55\text{ mm}$

Flux thermique d'une galette de la bobine MT.....

..... $P_2 = 2,387 \cdot 10^3$

Epaisseur de l'isolation MT..... $I_{s2p} = 0,225\text{ mm}$

Chute de température interne de la bobine MT.....

..... $T_{i2} = 2,684^{\circ}\text{C}$

Chute de température à la surface de la bobine MT.....

..... $T_{s2} = 33,49^{\circ}\text{C}$

Echauffement de la bobine MT.....

..... $T_{1moy} = 22,763^{\circ}\text{C}$

Echauffement maximum de la bobine BT, MT, HT.....

..... $T_{2max-h} = 36,147^{\circ}\text{C}$

Calcul d'échauffement de l'enroulement série

Largeur du conducteur avec l'isolation de la bobine HT.....

..... $e_{1p} = 53\text{ mm}$

Flux thermique d'une galette de la bobine HT.....

..... $P_1 = 983,283$

Epaisseur de l'isolation HT..... $I_{s1p} = 0,225\text{ mm}$

Chute de température interne de la bobine HT.....	$T_{i1} = 1,106 \text{ } ^\circ\text{C}$
Chute de température à la surface de la bobine HT.....	$T_{s1} = 21,634 \text{ } ^\circ\text{C}$
Echauffement de la bobine HT.....	$T_{1moy} = 29,157 \text{ } ^\circ\text{C}$
Echauffement maximum de la bobine BT, MT, HT.....	$T_{1max-h} = 22,749 \text{ } ^\circ\text{C}$

Dimensionnement de la cuve

Longueur de la cuve.....	$L_{cuV} = 323,205 \text{ Cm}$
Largeur de la cuve.....	$l_{cuV} = 74,468 \text{ Cm}$
Hauteur de la cuve.....	$H_{cuV} = 300,958 \text{ Cm}$

Calcul thermique de la cuve

Élévation moyen de la température de l'huile.....	$T_{moyh} = 35,743 \text{ } ^\circ\text{C}$
Élévation maximale de la température de l'huile.....	$T_{maxh} = 42,892 \text{ } ^\circ\text{C}$
Echauffement de la cuve par rapport à l'air.....	$T_{c/a} = 28,743$
Surface totale de la cuve	$S_{Tcu} = 23,937 \text{ Cm}^2$
Surface de convection de la cuve	$S_{Ccu} = 23,937 \text{ Cm}^2$
Surface de rayon de la cuve.....	$S_{raycu} = 35,905 \text{ Cm}^2$
Surface totale du couvercle	$S_{Tco} = 2,407 \text{ Cm}^2$
Surface de rayon du couvercle.....	$S_{rayco} = 1,203 \text{ Cm}^2$
Surface de convection du couvercle	$S_{Cco} = 1,203 \text{ Cm}^2$
Perte joule totale.....	$P_{cct} = 1,124 \cdot 10^5 \text{ w}$
Surface de convection nécessaire.....	$S_{Tcon} = 1,145 \cdot 10^3 \text{ Cm}^2$
Surface totale de convection.....	$ST_{con} = 1,147 \cdot 10^3 \text{ Cm}^2$
Surface totale de rayon de la cuve.....	$ST_{ry} = 30,968 \text{ Cm}^2$
Température finale du circuit magnétique.....	$T_{cm} = 70,696 \text{ } ^\circ\text{C}$
Température finale de l'enroulement BT.....	$T_{e3} = 76,912 \text{ } ^\circ\text{C}$
Température finale de l'enroulement MT.....	$T_{e2} = 77,344 \text{ } ^\circ\text{C}$

Température finale de l'enroulement HT..... $T_{e1} = 63,918 \text{ °C}$

Calcul du volume d'huile

Volume de la cuve sans radiateur..... $V_c = 7,244 \text{ dm}^3$

Volume de la partie décuvable..... $V_d = 323,717 \text{ dm}^3$

Volume d'huile dans la cuve..... $V_h = 5,02 \cdot 10^5 \text{ dm}^3$

Volume d'huile totale..... $V_{ht} = 5,271 \cdot 10^4 \text{ dm}^3$

Conclusion Générale

L'élaboration de ce présent travail, nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances dans le domaine de l'électrotechnique en général et de la technologie de dimensionnement des autotransformateurs immergés dans l'huile minérale en particulier.

Le calcul est réalisé à base d'un programme informatique en Matchad qui nous a permis d'éviter de laborieux calculs manuels.

Dans le programme de calcul on a pu suivre les différents paramètres. On a constaté que pour tout changement de combinaisons des paramètres de calcul (coefficient de Svelteesse β , le coefficient de Rogowski K_r , le diamètre de canal de fuite a_{12} , coefficient d'utilisation de la section de fer, le facteur des pertes supplémentaire K_{sup} ...etc.) engendrent les modifications sur les performances de l'autotransformateur.

Les résultats obtenus sont satisfaisants, puisqu'ils répondent aux exigences de cahier des charges.

Pour la partie thermique, les échauffements calculés ne dépassent pas les valeurs limites, ce qui confirme le bon choix effectué au niveau de calcul électromagnétique (dimensions de circuit magnétique et des enroulements.).

Le rendement atteint des valeurs qui dépassent 98%, ce qui vérifie la caractéristique de l'autotransformateur.

Vu à l'indisponibilité de documentation sur les autotransformateurs triphasés à trois enroulements nous souhaitons à l'avenir qu'une étude plus approfondie lui soit consacrée.

Références bibliographiques

- [1] Hadjout M'ouatez : étude et réalisation d'un transformateur triphasé immergé dans l'huile pour simulation des essais en haute tension à l'échelle réduite <<thèse de l'université de Tizi Ouzou promotion 2001>>.
- [2] M.H.Terkmane—automatisation d'une plate forme d'essais des transformateurs de puissance <<mémoire d'ingénieur à l'université de Tizi Ouzou promotion 2001 >>.
- [3] K.Chaib ; O.Iazouren : étude des surtensions impulsive dans les enroulements de transformateur de puissance <<mémoire d'ingénieur à l'université de Tizi Ouzou promotion 2004 >>.
- [4] M.O. Ait Hamou .H.Adjoud calcul d'un transformateur Leblanc 800KVA ,10KV/2,73KV <<mémoire d'ingénieur à l'université de Tizi Ouzou promotion 2008 >>.
- [5] Z.Fereka, O.Tibleghai, S.Meziani calcul et d'un autotransformateur Triphasé 32MVA, 230KV/121KV/6,6KV<<mémoire d'ingénieur à l'université de Tizi Ouzou promotion 2001 >>.
- [6] S.Smadhi ,F.Mezair étude d'un transformateur Biphase de distribution à remplissage intégral type embrochable 25KVA.20KV/0,48KV<<mémoire de DEUA.à l'université de Tizi Ouzou promotion 2007 >>
- [7] A.Boudissa B.Alliouat L.Bellahsene étude et réalisation d'un transformateur Triphasé à trois enroulements 1250KVA 30KV/690KV ; immergé dans l'huile
- [8] Théories de Willdi . (Electrotechnique).
- [9] Electrotechnique et machine électrique Edition Eyrolles.
- [10] Electrotechnique Jacques Cladé : ancien élève de l'école polytechnique et ingénieur de l'école supérieure d'électricité