

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÉRI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE



Mémoire de fin d'études



*En vue d'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Électrotechnique*

Thème

Dimensionnement et calcul de courant
de court circuit d'un transformateur
triphase 100kVA, 30kV/0.4kV

Présenté par :

Mr AIT LOUNIS Chafaa

Mr AMZAL Samir

Proposé par :

M^{me} CHAOUCHI

Dirigé par :

M^{lle} BELKACEMI

Mr C. BIROUCHE

Année universitaire : 2012/2013

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : DEFINITION ET GENERALITES SUR LES TRANSFORMATEURS

Introduction.....	4
I.1.Définition de transformateur	4
I.2.Symboles et circuits équivalents des transformateurs	4
I.3.Principe de fonctionnement d'un transformateur.....	6
I.4.Constitution d'un transformateur	6
I.4.1. La partie active	6
I.4.2. La partie constructive	11
I.5. Indice horaire	13
I.6. Groupe de couplage	14
I.7. Caractéristique industrielles du transformateur	17
I.8. Pertes dans le transformateur	19
I.9. Echauffement et refroidissement des transformateurs	19
I.10. Protection des transformateurs	21
I.11. Principaux paramètres de la plaque signalétique	22
I.12. Pièces de transformateurs	23
Conclusion	24

CHAPITRE II : CALCUL ELECTROMAGNETIQUE

Introduction	25
II.1.Calcul préliminaire des dimensions principales	25
II.2.Calcul du nombre de spires	27
II.3.Diamètre du canal de dispersion principale	31
II.4.Calcul de la densité moyenne du courant	32
II.5.Choix des conducteurs et du type de l'enroulement basse tension	33
II.6.Choix des conducteurs et du type de l'enroulement haute tension	34
II.7.Calcul des dimensions	35
II.8.Dimensionnement radial des enroulements	37
Conclusion	42

CHAPITRE III : CALCUL DES PERTES ET DU RENDEMENT

Introduction	43
III-1.pertes à vide	43

III.2.les pertes joules	47
III.3.calcul définitif de la tension de court circuit	55
III.4.rendement	56
III.5.la chute de tension	57
III.6. calcul du courant à vide	60
Conclusion	61

CHAPITRE IV : CALCUL THERMIQUE

Introduction	62
IV.1. Echauffement de circuit magnétique	62
IV.2.Echauffement moyenne dans les enroulements par rapport à l'huile	65

CHAPITRE V : CALCUL DES COURANT DE COURT-CIRCUIT

Introduction	77
V.1.Comment se produit un court-circuit	77
V.2.Les principaux défauts de court-circuit	77
V.3.Les méthodes présentées dans ce Cahier Technique	81
V.4.Les hypothèses de base	81
V.5. Calcul des Icc par la méthode des impédances	82
V.6.Calcul d'Icc dans les réseaux radiaux à l'aide des composantes symétriques	85
V.7.Calcul de courant de court-circuit dans un transformateur avec la méthode des impédances	86
V.8.Conséquences des défauts de court-circuit	89
V.9.Protection contre les courants de court-circuit	90
V.9.1.Un disjoncteur	90
V.9.2.Fusible	91
Conclusion.....	93
Normes	94

Conclusion générale	95
----------------------------------	----

Bibliographie

Cahier des charges

Puissance Nominal	100kVA
Tension Primaire Nominal	30kV
Tension Secondaire Nominale	0,4 kV
Groupe De Couplage :	YZN11
Pertes A Vide	380 W
Pertes en Charge	2340W
Fréquence	50Hz
Tension De Court Circuit :	4,5%
Prise De Réglage	$\pm 2 \times 2,5\%$

Introduction Générale

Le transformateur est l'un des éléments essentiels dans le réseau électrique. Ses applications sont multiples, il permet de changer la valeur de la tension à des tensions plus élevées ou plus basses, il rend possible le transport de l'énergie électrique sur des longues distances.

Les problèmes du rendement et des courants de court-circuit des transformateurs sont d'une grande importance. Pour augmenter ce rendement et limiter les défauts, il faudra optimiser et protéger le transformateur en améliorant sa construction.

Le but de notre travail est le dimensionnement d'un transformateur de distribution immergé dans l'huile, de puissance apparente 100 kVA, de tension primaire 30kV et secondaire de 0,4kV.

Nous allons effectuer un calcul préliminaire en se basant sur le cahier des charges; par la suite, et avec les dimensions initiales, nous allons calculer les différentes contraintes (électriques, magnétiques et thermiques) qui doivent être inférieures aux valeurs admissibles fixées par les normes.

En outre, les résultats doivent être situés dans les limites admissibles établies par des essais sur d'autres machines existantes. Dans le cas contraire, des corrections sont nécessaires pour certains paramètres jusqu'à obtention d'une variante répondant aux normes en vigueur et aux conditions de cahier des charges.

Pour atteindre notre objectif, nous avons réparti notre travail en cinq chapitres :

Chapitre I : Généralités sur le transformateur de distribution.

Chapitre II : Calcul électromagnétique.

Chapitre III : Calcul des pertes et du rendement.

Chapitre IV : Calcul thermique.

Chapitre V : Calcul du courant de court-circuit.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Introduction :

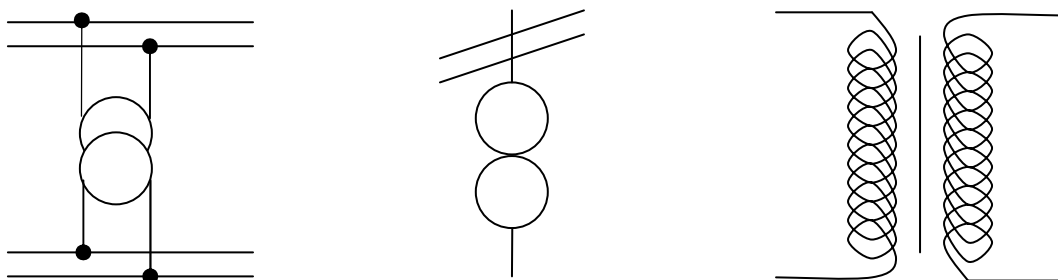
Le transformateur triphasé joue un rôle fondamental pour le transport et la distribution de l'énergie électrique. En effet les alternateurs sont triphasés et la tension qu'ils produisent est relativement basse. Si on veut que le transport de l'énergie soit économique il faut que celui-ci soit assuré à une tension beaucoup plus élevée. Cette élévation de la tension est assurée par des transformateurs triphasés (moteur à champs alternatif). La tension distribuée aux particuliers est normalisée à 220/380V (soit 380V entre fils de ligne et 220V entre phase et neutre). En revanche, qui souscrivent une puissance importante, cette tension est beaucoup plus élevée.

I.1.Définition de transformateur :

Un transformateur est une machine statique, à induction électromagnétique permettant la modification de certaines grandeurs alternatives d'un système ou plusieurs systèmes (courant ou tension) variables sans changer leurs fréquences, en valeur mieux adaptée au transport et à la distribution d'énergie électrique avec un excellent rendement.

Le transformateur comporte deux enroulement monté sur un circuit magnétique feuilleté, l'un est dit primaire qui reçoit la puissance du réseau l'autre dit secondaire qui restitue à son tour cette même puissance.

Si la tension d'alimentation appliquée au primaire est plus basse que celle délivrée par le secondaire, le transformateur fonctionne en élévateur de tension ; dans le cas contraire, il fonctionne en abaisseur de tension [1].

I.2.Symboles et circuits équivalents des transformateurs :**I.2.1.Symbole d'un transformateur :**

FigureI-1: Symbole des transformateurs monophasés.

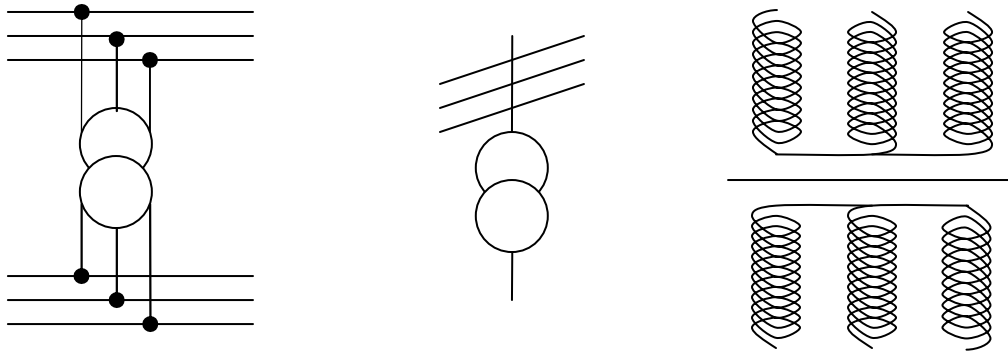


Figure I-2: Symbole des transformateurs triphasés.

I.2.2. Circuit équivalent d'un transformateur :

Une représentation d'un transformateur réel consiste en un transformateur idéal auquel se rattachent diverses résistances et réactances pour tenir compte des aspects réels.

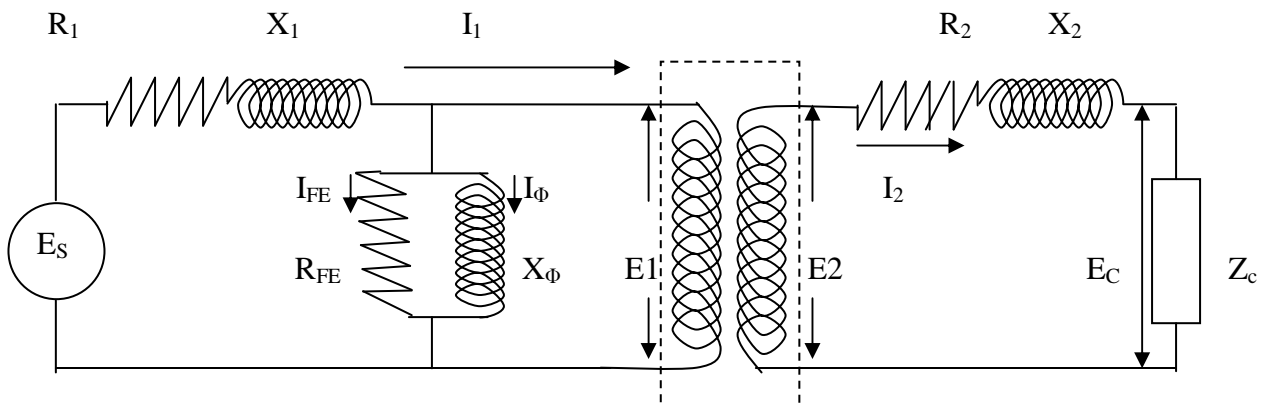


Figure I-3: Circuit équivalent d'un transformateur.

R_1, R_2 : représentent les résistances respectivement des enroulements primaire et secondaire.

R_{FE} : résistance de circuit magnétique représente les pertes par **hystérésis** et par **courant de Foucault**.

X_1, X_2 :représentent les réactances respectives des enroulements primaire et secondaire (elles tiennent compte des flux de fuite)

$X_Φ$: la réactance de circuit magnétique (tien compte du courant d'excitation nécessaire pour produire le flux).

E_s : la tension d'alimentation.

E_1 : f.e.m primaire.

E_2 : f.e.m secondaire.

E_c : la tension aux bornes de la charge.

I.3.Principe de fonctionnement d'un transformateur :

En vertu de la loi de Faraday, lorsque un flux d'induction magnétique variable ϕ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement ($d\phi/dt$) et au nombre de spires que comporte cette enroulement.

Lorsque le premier est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend de nombre de spires du primaire et la tension appliquée, ce flux induit dans l'enroulement secondaire crée une tension proportionnelle aux nombres des spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire.

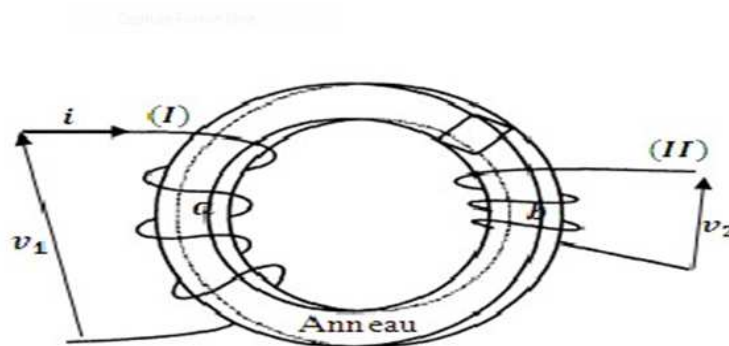


Figure I-4 : Le noyau.

Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation au flux magnétique.

I.4.Constitution d'un transformateur :

Le transformateur est constitué de deux parties essentielles qui sont [2] :

I.4.1. La partie active : elle est destinée à assurer la conversion de l'énergie.

I.4.2. La partie constructive : son rôle est d'assurer la protection, la fixation et le refroidissement de la première partie.

I.4.1.partie active :

Représente l'ensemble électromécanique situé au cœur du transformateur: circuit magnétique, bobinages, diélectrique et isolants solides. C'est dans la partie active que l'énergie électrique est transformée.

I.4.1.1. Le circuit magnétique :

Le circuit magnétique ou noyau sont juste des assemblages de tôles fines généralement ferromagnétiques disposées dans un même plan parallèlement et perpendiculairement les unes aux autres comportant deux culasses et trois colonnes de même section[3].

I.4.1.1.1.Assemblage :

Le serrage des tôles est effectué par des tiges feuillet, régulièrement réparties et isolées du circuit magnétique. Les vis ou rivets d'assemblage ne doivent pas former des circuits conducteurs unissant les tôles.

Les tôles sont découpées avec différentes géométries :

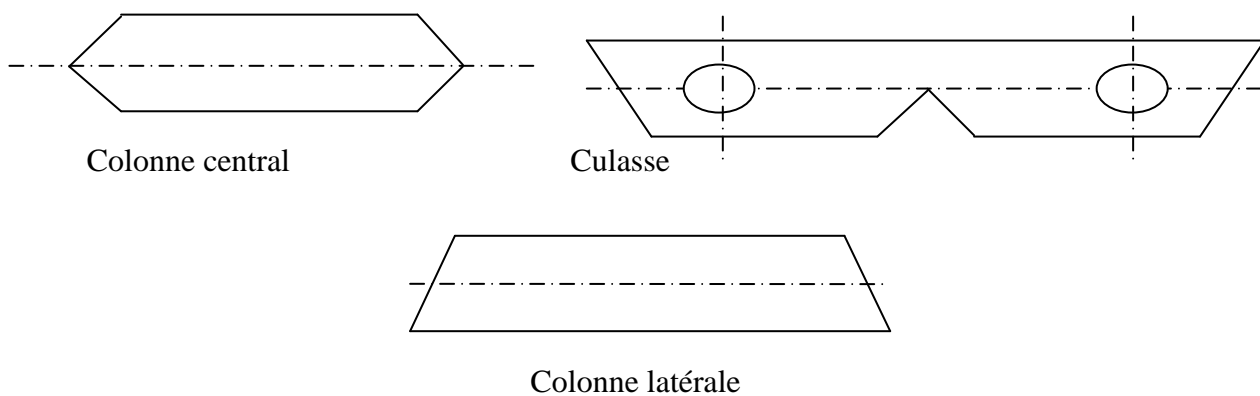


Figure I-5 :les différentes géométries des tôles

I.4.1.1.2.Section des colonnes :

Si pour les faibles puissances, les sections sont carrées, on réalise des sections circulaires pour les grosses puissances. En effet, les bobinages sont à section circulaire pour des raisons de résistance aux efforts électrodynamiques entre spires en cas de court-circuit et pour une réalisation plus facile.

Exemples de section de colonnes

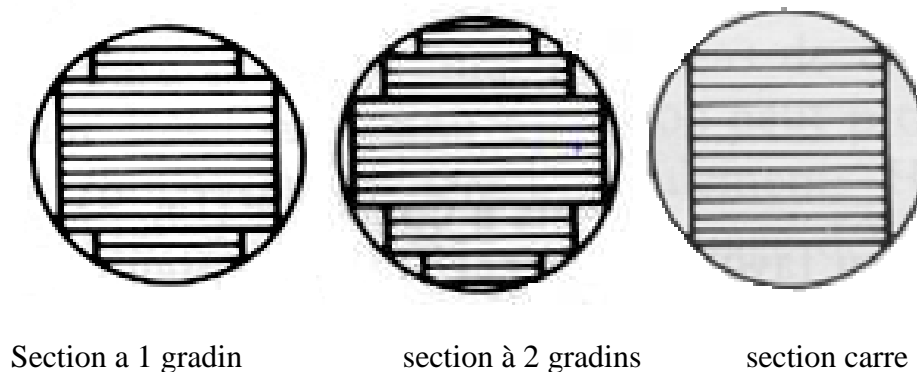


Figure I-6 :section de colonnes

I.4.1.1.3. Joints :

La réalisation de joints magnétiques qui réduisent le plus possible l'entrefer dans un circuit magnétique permet d'obtenir la réluctance minimale du circuit donc des faibles pertes.

Le principe de réalisation est le même pour les transformateurs monophasés et triphasés. Sauf que dans le cas des transformateurs triphasés, des canaux de refroidissement peuvent être aménagés pour les gros circuits magnétiques.

a- Joints enchevêtrés : (fig. I-7)

Les extrémités des tôles des colonnes et des Culasses sont enchevêtrées les unes avec les autres.

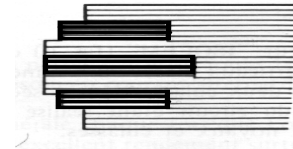


Fig.1-7

b- Joints à coupe oblique : (fig. 1-8)

Dans le cas des tôles à cristaux orientés, qui favorisent le passage du flux, dans le sens du laminage, le joint doit être à 45°. Dans ces conditions, il faut un faible recouvrement obtenu en décalant le joint.

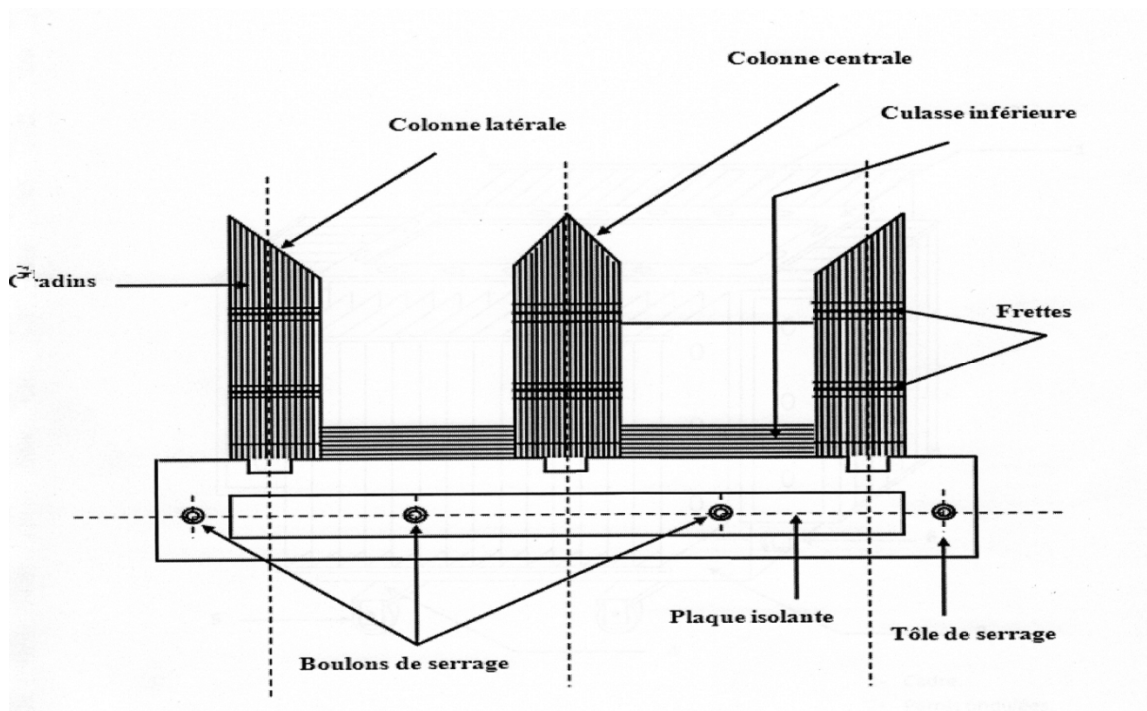
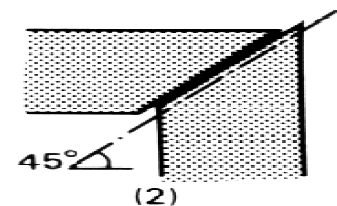
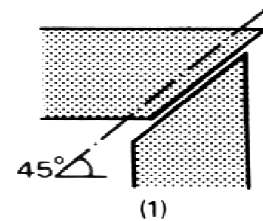


Figure I-9 : Schéma de montage de noyau.

I.4.1.2. Enroulements :

Les enroulements sont réalisés à partir des conducteurs en cuivre, méplat ou en aluminium de section circulaire ou rectangulaire isolés avec du vernis ou de papier isolant.

Les formes de bobinages, les sections et les nombres de spires sont conditionnés par les contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement pour assurer la circulation d'huile du fait des échanges thermiques.

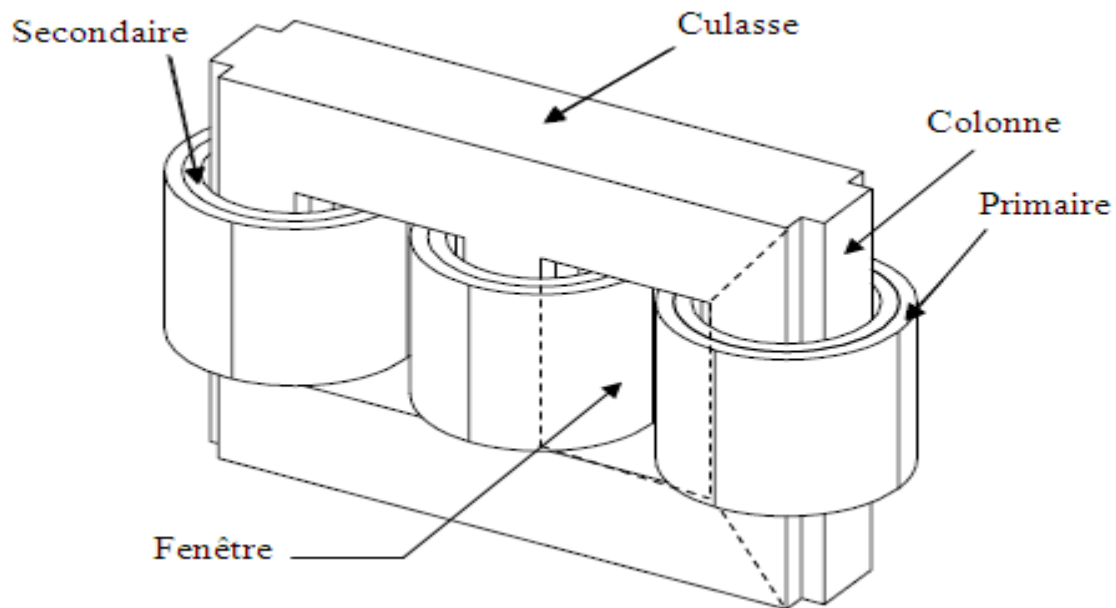


Figure I-10 : Emplacement des enroulements sur la culasse

Les deux enroulements (primaire et secondaire) sont montés sur les colonnes (ou noyau) du circuit magnétique. L'enroulement primaire a pour rôle de créer un champ alternatif et celui du secondaire la production du courant induit.

I.4.1.3. isolants solides :

L'isolation de la partie active est d'une grande importance et déterminante pour le bon fonctionnement du transformateur pour cela, les conducteurs, les bobines et les connexions doivent être isolées entre elles par rapport à la masse, au circuit magnétique, à la cuve et au couvercle. Les isolateurs sont à base de Papiers, de cellulose, rubans, vernis, résines époxydes, carton et de bois.

Les isolants solides assurent la rigidité diélectrique et apportent, en plus du noyau, une résistance mécanique globale. Les papiers captent et retiennent les dépôts issus de la dégradation des matériaux : ils jouent un rôle de purificateur d'huile et se dégradent

lentement. Ajoutée au vieillissement, cette dégradation altère les propriétés de l'huile entraînant à terme un risque de claquage du transformateur.

Isolement des conducteurs : L'isolation des conducteurs se fait soit en vernis ou en papier imprégné, suivant les dimensions des fils.

L'isolement de la bobine :

L'isolement des bobines basse tension des circuits magnétique est réalisé par un tube en presspahn (psp) pour le papier bakélinisé avec ou sans cale, monté sur la colonne de circuit magnétique

- Entre bobines haute-tension voisines, on utilise un écran plan en presspahn ou en papier bakélinisé qui est fixé à chaque angle.
- Entre bobine basse-tension et haut-tension, l'isolement se fait à l'aide d'un tube écran en papier bakélinisé avec cales
- Entre bobines et culasses (noyau), l'isolement se fait à l'aide des cales en papier bakélinisé ou en bois imprégné et de cornière rejoignant les tubes écrans.

I.4.1.4. Les diélectriques :

Les parties actives d'un transformateur sont immergées dans un liquide isolant et caloporteur, qui assure à la fois l'isolement et le refroidissement du transformateur, cette l'isolation peut être assurée par :

- de l'air pour les petits transformateurs BT.
- de l'huile très employée dans tout les transformateurs de puissance, mais elle présente des risques d'incendie et d'explosion.
- du quarts ; c'est un sable qui étouffe les flammes mais rend le refroidissement plus difficile.

I.4.1.5. Prise de réglage :

La stabilité de la tension dans les limites prescrites est réalisée au moyen d'un dispositif permettant la variation du nombre de spires de réglage disposées au primaire ou au secondaire.

Pour raison d'ordre pratique, les prises deréglages sont enroulées sur la dernière couche du primaire, ce qui facilite leur construction et leur connexion au commutateur.

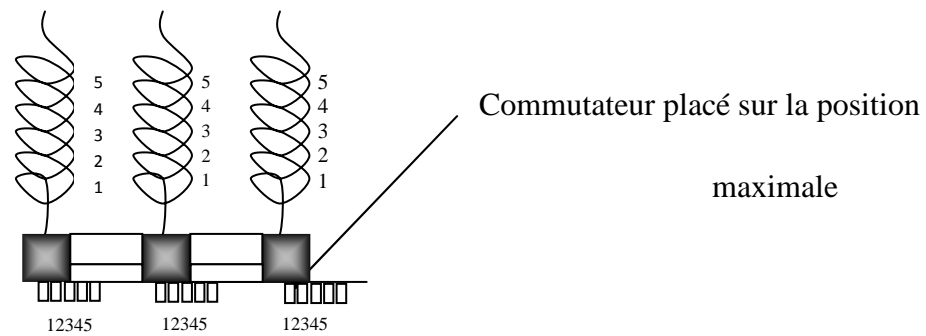


Figure I-11 : schémas des Prise de réglage.

Le réglage se fait hors tension à cinq (05) prises fixes $\pm 2 \times 2,5\%$

Position 1 (prise soustractive): $U_n - 2 \times 2,5\%$

Position 2 (prise soustractive): $U_n - 2,5\%$

Position 3 (prise nominale) : U_n

Position 4 (prise additive) : $U_n + 2,5\%$

Position 5 (prise additive): $U_n + 2 \times 2,5\%$

I.4.2. La partie constructive :

Le transformateur comprend en plus des parties actives une série d'éléments mécaniques qu'on appelle pièces constructives, destinés à la fixation et au refroidissement de la partie active au branchement des enroulent sur le réseau électrique, elle se résume ainsi :

I.4.2.1. La cuve :

La cuve constitue l'enveloppe protectrice de la partie active, un contenant au diélectrique liquide, elle a une grande surface en contact avec l'air pour faciliter l'évacuation de la chaleur. Elle est constituée de trois parties fondamentales

I.4.2.1.1. Les parois ondulées:

Elles constituent les quatre facettes de la cuve en forme d'ondulations qui servent de surfaces de dissipation de la chaleur.

I.4.2.1.2. La partie inférieure : C'est la basse de la cuve qui sert également de contenant au diélectrique liquide.

I.4.2.1.3. Le cadre : Il est en forme rectangulaire et se situe au niveau supérieur de la cuve, sur le quelle sera monté le couvercle.

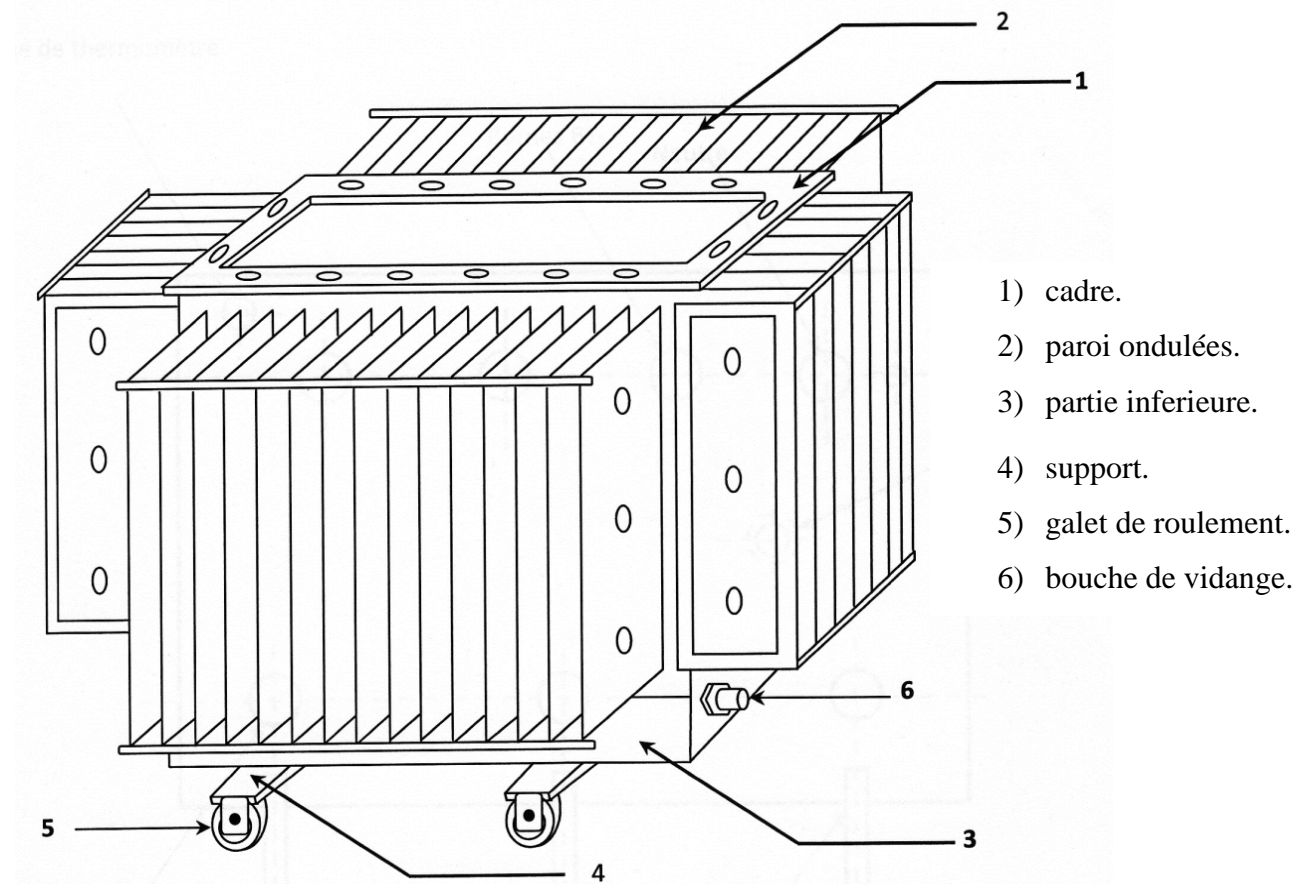


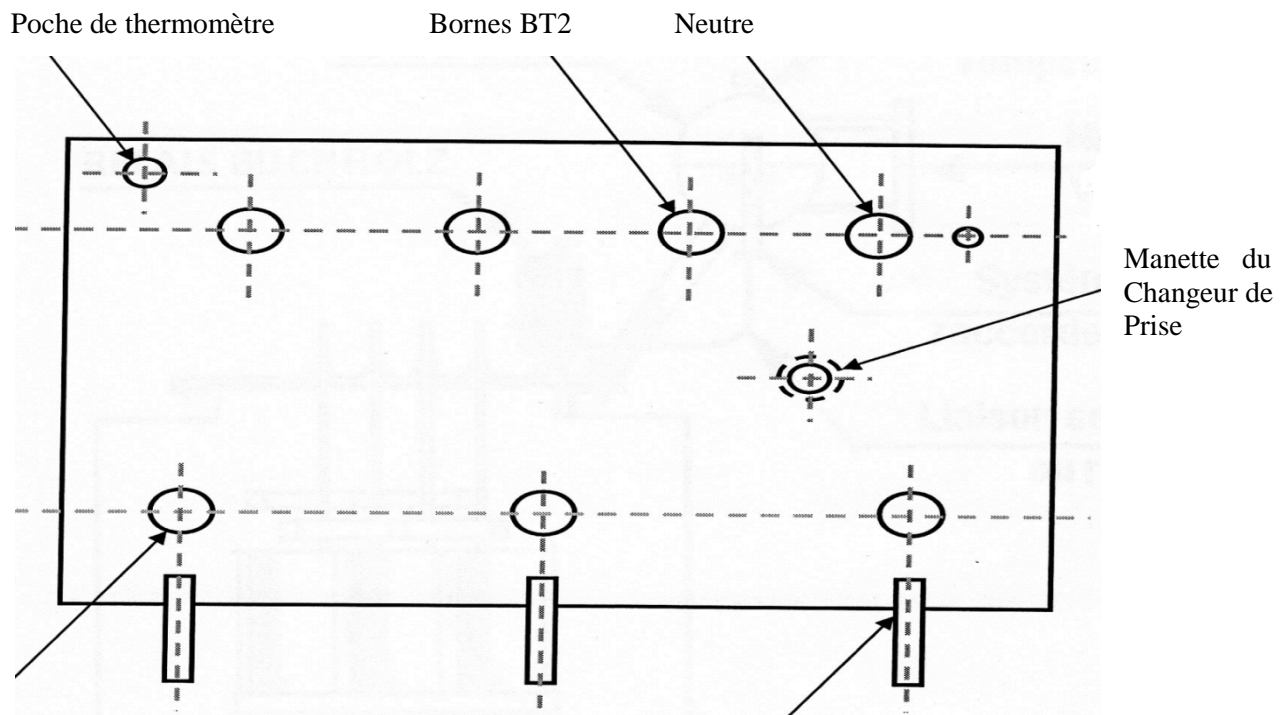
Figure I-12 : Montage de cuve

I.4.2.2. Le couvercle :

Il représente la partie supérieure de transformateur, son rôle est de fermer la cuve, d'où la nécessité d'un joint entache.

Par ailleurs il sert de support aux accessoires suivants :

- **Poche de thermostat**, il permet de mesurer la température aux différents niveaux du transformateur.
- **Crochets de levage** ; ils permettent la manutention et le décuillage.
- **Les traversées haute et basse tension**; qui ont pour rôle d'assurer à travers le couvercle, la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaires et secondaires d'une part et les lignes d'arrivée de départ d'autre part.



Bornes BT₁ Entier pour cornes d'éclateurs

Figure I-13 : Vue d'ensemble de couvercle

I.4.2.2. Le conservateur d'huile :

C'est un réservoir d'huile prévu pour compenser la dilatation de l'huile et maintenir ainsi la partie active constamment immergée, en limitant à son niveau normal l'espace d'échange avec l'atmosphère.

I.4.2.3. Dispositif de contrôle du niveau d'huile :

Il permet de contrôler le niveau d'huile dans le transformateur.

I.4.2.4. Assécheur :

Le rôle de l'assécheur est de permettre la mise à l'air libre, tout en évitant la pollution du diélectrique par la vapeur d'eau atmosphérique.

I.5. Indice horaire :

S'exprime par l'angle de déphasage φ sur le diagramme vectoriel entre la tension simple HT et BT ayant leurs bornes homologues, ce déphasage est toujours multiple de 30° , on peut aussi se servir du cadran d'une horloge pour en donner la valeur.

La méthode permettant cette détermination est relativement simple :

Le sens de bobinage primaire et secondaire est identique

- on place le vecteur référence (OB) sur l'origine OH.
- Toute lecture d'un enroulement sur la même colonne

- **en positif** (de bas en haut) donne un vecteur **en phase**.
- **en négatif** (de haut en bas) donne un vecteur **déphasé de π**

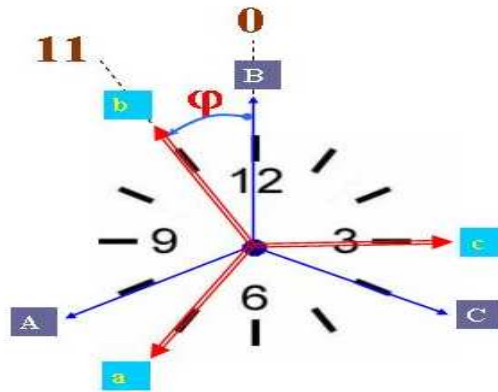


Figure I-14 : Indice horaire

I.6. Groupe de couplage :

Le groupe de couplage désigne l'association des couplages des enroulements choisis pour la haute tension et pour la basse tension. L'enroulement haute tension d'un transformateur triphasé de nombre de spires N_1 peut être connecté en étoile (symbole Y) ou en triangle (symbole D). L'enroulement basse tension avec un nombre de spires N_2 peut être connecté en étoile (symbole y), en triangle (symbole d) ou en zigzag (symbole z). Les systèmes des tensions du primaire et du secondaire d'un transformateur triphasé sont, en général, déphasés avec un angle φ . Comme cet angle est multiple de 30° ,

On définit l'indice horaire par : $I = \varphi / (\pi/6)$.

I.6.1. Couplage normalisé :

Trois couplages sont particulièrement utilisés en pratique : ce sont les couplages normalisés $Yy0$, $Dy11$, $Yz11$.

Couplage en étoile :

C'est la connexion des enroulements dans laquelle une extrémité de chaque enroulement de phase d'un polyphasé ou de chaque enroulement de même tension nominal pour les transformateurs monophasés constituant un groupe polyphasé est connectée à un point commun (point neutre), l'autre extrémité est reliée à la borne de ligne correspondante.

Couplage en zigzag :

C'est une connexion en étoile des enroulements de phase d'un transformateur polyphasé. Chaque enroulement étant constitué de deux parties semblables dans les quelle sont induites des tensions déphasées.

Couplage en triangle :

C'est une connexion des enroulements de même tension nominale d'un transformateur monophasé constituant un groupe triphasé sont connectés en série formant un circuit fermé.

I.6.1.1. Couplage étoile –étoile :

Pour le couplage étoile –étoile, les tensions aux bornes des bobines du primaire et du secondaire de la même colonne sont des tensions simples (Fig. I-15). Ce qui permet de

construire le diagramme vectoriel. Le rapport de transformation est $\left(m = \frac{N_1}{N_2}\right)$, Le déphasage

φ de basse tension par rapport à la haute tension est nul, ce qui donne un indice horaire I=0

I.6.1.2. Couplage triangle-étoile :

Pour le couplage triangle-étoile la tension aux bornes d'une phase du primaire est une tension composée, alors que la tension aux bornes de la phase correspondante est du secondaire est

une tension simple (Fig. I-16). Le rapport de transformation est $\left(m = \sqrt{3} * \frac{N_1}{N_2}\right)$. Le

déphasage φ entre les tensions du primaire et le secondaire est de $\left(\varphi = \frac{\pi}{6}\right)$, ce qui veut dire

l'indice horaire est I=11.

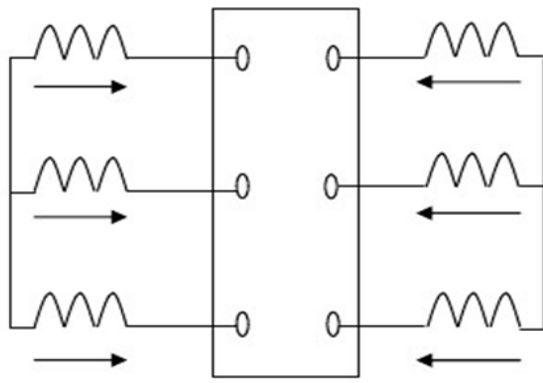
I.6.1.3. Couplage étoile –zigzag :

Pour le couplage étoile zigzag (Fig. I.7-a), la tension à la borne d'une phase du primaire est une tension simple alors qu'une tension aux bornes d'une phase du secondaire est la somme des deux tensions aux bornes de demi bobines ce qui permet de construire un

diagramme vectoriel. Le rapport de transformation est $\left(m = \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{N_1}{N_2}\right)$.

I.6.2. Choix du couplage dans les transformateurs :

La présence du conducteur neutre dans une distribution basse tension permet de disposer des deux types de tension ; la tension simple pour l'usage domestique usuel, et le système triphasé de tensions composées pour l'usage artisanal ou industriel. De plus il est intéressant, coté haute tension de disposer d'un couplage ayant un neutre et de mettre ce neutre, ainsi que le circuit magnétique et les parties métalliques (cuve) du transformateur au potentiel de la terre. Ceci permet de réduire les distances d'isolement des bobines hautes tensions, Ce qu'il faut éviter c'est d'avoir le même couplage au primaire et au secondaire d'un



Couplage Yy0

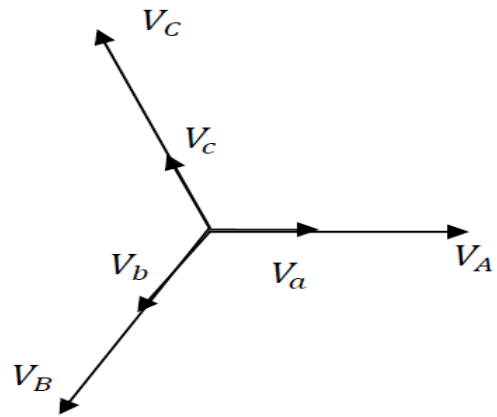
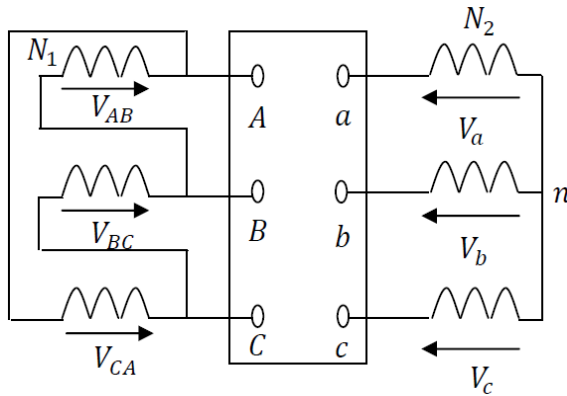


diagramme vectoriel

Fig. (I-15) Couplage étoile – étoile [4]



Couplage Dy11

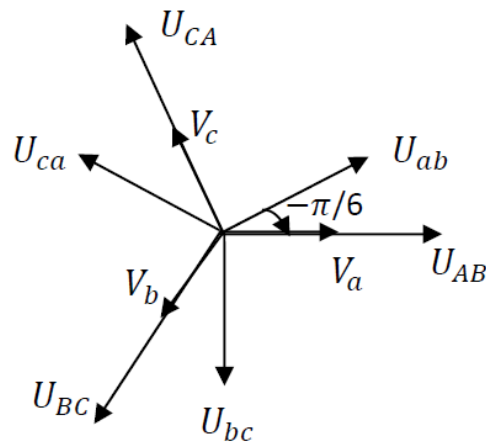
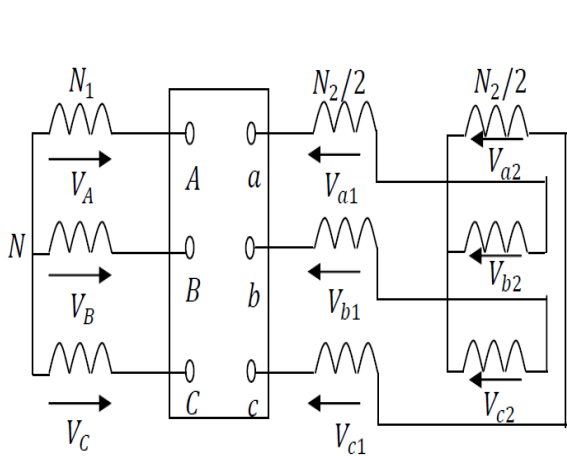


Diagramme vectoriel

Fig. (I-16) Couplage triangle – étoile : [4]



Couplage Yz11

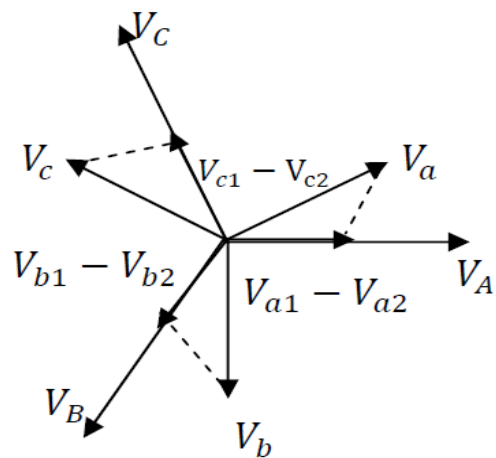


Diagramme vectoriel

Fig. (I-17) Couplage étoile – zigzag : [4]

transformateur, ceci évite de transmettre intégralement le déséquilibre éventuel des grandeurs (courants, tensions) d'un coté du transformateur à l'autre. On voit donc apparaître l'intérêt d'un couplage Yz offrant un neutre des deux cotés et des couplages différents.

I.7. Caractéristiques industrielles du transformateur :

I.7.1. Les valeurs nominales :

Les valeurs nominales de la tension, du courant, de la puissance et de la fréquence sont les valeurs spécifiées généralement sur la plaque signalétique du transformateur. On doit obligatoirement les respecter sous peine de chauffer anormalement la machine.

I.7.2. Essai à vide :[5]

L'essai à vide, c'est-à-dire sans aucune charge raccordée au transformateur, permet de déterminer le rapport de transformateur et les valeurs des paramètres R_{fe} et X_u de la branche de magnétisation, paramètre qui tient compte des pertes dans le fer et le courant de magnétisation.

I_{co} : est le courant de magnétisation I_m .

P_{co} : les pertes dans le circuit magnétique et aux pertes dans le circuit de l'enroulement. Ces dernières sont en général très faibles à vide ; on peut les ignorer et considérer que $P_{co} = P$.

E_{co} : correspond à la tension induite E_1 plus la chute de tension dans l'impédance de l'enroulement. Cette dernière étant généralement négligeable à vide, on peut considérer que :

$$E_{co} = E_1.$$

On obtient alors les relations :

$$\cos \theta = \frac{P_{fe}}{E_1 * I_m} \approx \frac{P_{co}}{E_{co} * I_{co}}$$

$$I_{fe} = I_m * \cos \theta \approx I_{co} * \cos \theta$$

$$I_\phi = I_m * \sin \theta \approx I_{co} * \sin \theta$$

$$R_{fe} = \frac{P_{fe}}{I_{fe}^2} = \frac{E_1}{I_{fe}} \approx \frac{P_{co}}{I_{fe}^2} \approx \frac{E_{co}}{I_{co} * \cos \theta}$$

$$X_\phi = \frac{E_1}{I_\phi} \approx \frac{E_{co}}{I_{co} * \sin \theta}$$

θ : est l'angle entre E_1 et I_m .

De plus, on peut déterminer le rapport de transformation : $N = \frac{E_1}{E_2}$

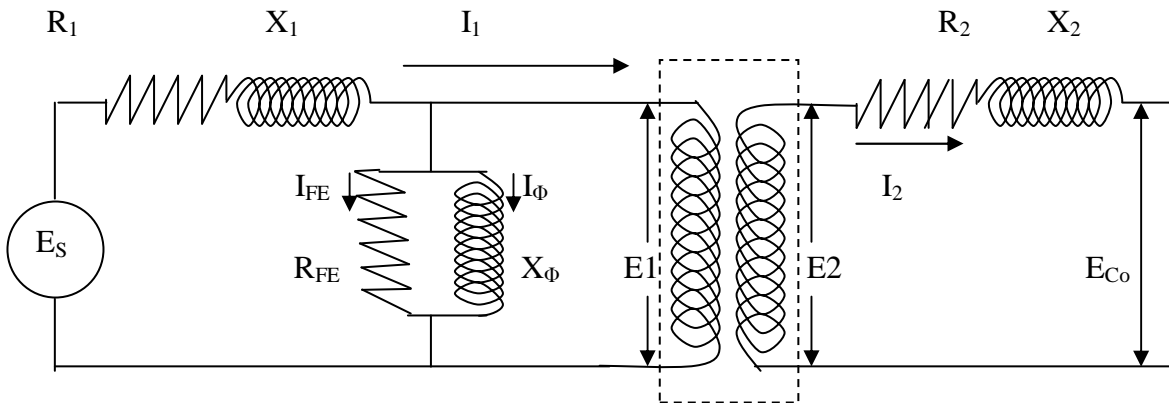


Figure I-18 :Essai à vide

I.7.3.Essai en court-circuit:[5]

Dans cet essai en court-circuité un enroulement, en alimentant l'autre enroulement à tension réduite, de façon que le courant de court-circuit ne dépasse pas la valeur nominale du courant de cet enroulement.

Puisque l'essai se fait à tension très réduite, le courant de magnétisation, de même que les pertes par hystérésis et par courant de Foucault s'en trouvent fortement diminués en pratique, on peut les considérer comme négligeables vis -a vis de la puissance dissipée dans la résistance équivalente. On obtient les relations suivantes :

$$Z_{eq} = \frac{E_{cc}}{I_{cc}}$$

$$R_{eq} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} = Z_{eq} * \frac{P_{cc}}{E_{cc} * I_{cc}}$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

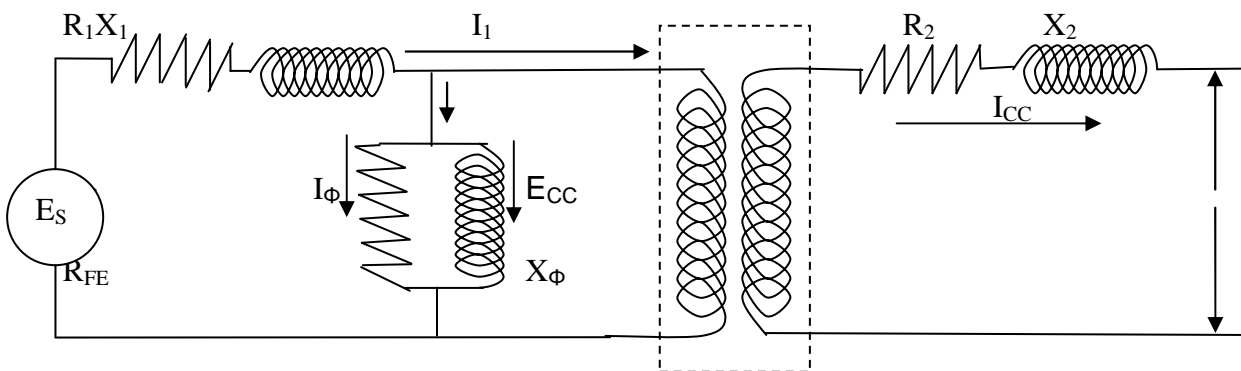


Fig. (1-19) : Essai en court-circuit

I.7.4.les paramètres d'exploitation :**I.7.4.1.la chute de tension :**

La chute de tension d'un transformateur est la variation d'amplitude de la tension *secondaire*, entre les conditions de marche à vide et en charge. Cette tension est en fonction de l'importance de la charge et de son facteur de puissance. Elle peut même devenir négative dans le cas d'une charge capacitive.

$$\frac{\Delta U}{U} (\%) = \frac{|U_{n2} - U_2|}{U_2} \times 100$$

U_{n2} : Tension nominale secondaire.

U_2 : tension secondaire en charge

Pour une charge nominale, l'exploitation analytique de la variation de la tension et donnée par :

$$\Delta U = \alpha \times (U_{cca} \times \cos \theta_2 + U_{ccr} \times \sin \theta_2) + \alpha^2 \left[\frac{U_{ccr} \times \cos \theta_2 - U_{cca} \times \sin \theta_2}{200} \right]^2$$

U_{cca} : la composante active de la tension du court-circuit.

U_{ccr} : la composante réactive de la tension du court-circuit.

θ_2 : Le déphasage secondaire.

α : facteur de charge.

$$\text{avec : } \alpha = \frac{P_2}{P_{2n}}$$

I.7.4.2.Le rendement :

Le rendement d'un transformateur est le rapport entre, la puissance fournie au secondaire et la puissance absorbée par le primaire ; le rendement du transformateur est d'autant meilleur qu'il avoisine 99%.

$$n[\%] = \frac{P_2}{P_1} \times 100.$$

$$P_1 = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1 \times \cos \theta_1 \quad \text{La puissance fournie au transformateur.}$$

$$P_2 = \sqrt{3} \times U_2 \times I_2 \times \cos \theta_2 \quad \text{Puissance délivrée par le transformateur.}$$

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{cu}.$$

P_0 : pertes fer dans le circuit magnétique.

$$P_{cu} = 3 \times R \times I_2^2 \text{ Pertes cuivre pour un facteur de charge donné.}$$

$$n[\%] = \frac{p_1 - (p_0 + p_{cu})}{p_2 + p_0 + p_{cu}} \times 100.$$

$$n[\%] = \left[1 - \frac{p_0 + p_{cu}}{p_2 + p_0 + p_{cu}} \times 100 \right].$$

I.8. Pertes dans le transformateur :

I.8.1. Les pertes électriques :

Ces pertes sont produites par l'effet joule dans les enroulements, elles dépendent de la résistance de ces enroulements et du courant qui les traverse.

I.8.2. Les pertes fer :

Ce sont des pertes dans les tôles du circuit magnétique, elles comportent les pertes par **hystérésis** et par **courant de Foucault**. Ces pertes dépendent de la fréquence et de l'induction maximale. Comme ces deux grandeurs sont constantes, il résultant que les pertes fer sont indépendantes de la charge.

I.8.2.1. Les pertes par hystérésis :

Le phénomène d'hystérésis s'explique par un retard de l'induction sur le champ magnétique appliqué au matériau du circuit magnétique. Ce retard provoque une perte d'énergie sous forme de chaleur à chaque cycle de courant alternatif.

I.8.2.2. Les pertes par courant de Foucault :

Le circuit magnétique qui est le siège de l'induction alternative est parcouru par des courants induits appelés (courants de Foucault).

Ils produisent par effet joule un dégagement de chaleur au sein du circuit magnétique. Pour les réduire, on feuillette et on empile les tôles, puis on les isole les unes des autres.

I.9. Echauffement et refroidissement des transformateurs :

I.9.1. L'échauffement :[6]

L'échauffement se produit par les pertes d'énergie électrique dans la partie active du transformateur pendant son fonctionnement, ce qui nécessite le refroidissement de ce dernier.

I.9.2. Le refroidissement :[6]

I.9.2.1. refroidissement à air :

Lorsque le transformateur est placé dans un milieu aéré naturellement, il peut y avoir une diminution de l'échauffement.

Ce refroidissement est obtenu par ondulation de la tôle de la cuve pour augmenter la surface d'échange avec le milieu extérieur.

I.9.2.2. Refroidissement à l'huile :

Ce système de refroidissement est assuré par l'huile qui est dans la cuve munie d'ailettes.

I.9.2.3. Refroidissement par radiateur d'huile :

Ce radiateur est indépendant de la cuve est lié avec le transformateur par des tuyaux qui assurent la circulation d'huile dans le radiateur vers le transformateur à l'aide d'une pompe et vice versa.

La circulation de l'huile froide dans le radiateur vers le transformateur fait refroidir la partie intérieure du transformateur.

I.10. Protection des transformateurs :

Les différentes contraintes subies par le transformateur obligent le constructeur à prévoir un système de protection, donc des mesures de sécurité doivent être mises en place pour assurer le contrôle des dysfonctionnements on distingue les éléments de protection interne et externe.

I.10.1. Le relais de BUCHHOLZ :

Il sert à détecter les anomalies internes (court-circuit, détérioration de l'isolation, mauvais contact dans les connexions...etc.). Lors d'un disfonctionnement, un jet d'huile vers le conservateur entraîne le déplacement d'un flotteur qui coupe la liaison entre le transformateur et le réseau.

I.10.2. Éclateurs de coupure :

Ils sont prévus pour protéger les traversées du transformateur, on les dispose entre la ligne du réseau et la terre.

I.10.3. Thermomètre :

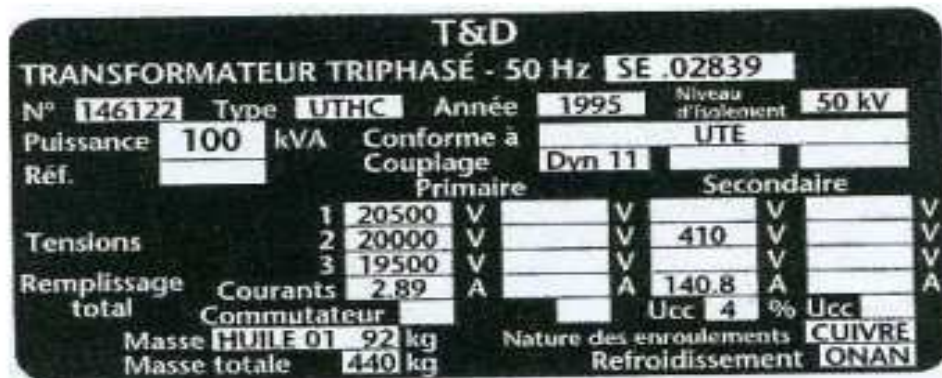
Il sert à surveiller l'échauffement de l'huile dans la cuve. Pour une température de l'huile qui atteint (75°C), il donne l'alarme et pour (80°C), on aura un déclenchement.

I.10.4. Renforcement de l'isolation :

En raison de surtensions résultant des différents phénomènes atmosphériques commutation... Les premières spires (de 5 à 7% du nombre total) en communication avec la ligne doivent avoir un isolement, car lors des surtensions un amorçage avec perforation de l'isolement de ces spires peut se produire.

I.11. Principaux paramètres de la plaque signalétique :

La puissance apparente ou assignée S, elle s'exprime en Voltampère $S = \sqrt{3}.U.I$	Tension de court-circuit : $U_{CC} \% = 100U_{1CC} / U_1$
	Réglage hors tension
	Couplage
	Diélectrique
Fréquence	Classe thermique et échauffement
Tension et intensité au primaire	refroidissement
Tension et intensité au secondaire	Technologie diélectrique : sec, enrobé ou immergé

Exemple de plaque signalétique :


T&D		TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ - 50 Hz		SE .02839	
N°	146122	Type	LTHC	Année	1995
Puissance	100 kVA	Conforme à	UTE		
Réf.		Couplage	DYN 11		
Tensions	Primaire		Secondaire		
	1	20500 V		V	V
	2	20000 V		410 V	V
Remplissage total	3	19500 V		V	V
	Courants	2,89 A		140,8 A	A
Masse	HUILE 01 92 kg	Nature des enroulements	CUIVRE		
Masse totale	440 kg	Refroidissement	ONAN		

Signification :

- triphasé : Nombre de phases du transformateur
- 50 Hz : Fréquence nominale d'utilisation du transformateur
- Refroidi. AN : Type de refroidissement du transformateur
 - ONAN : circulation huile naturelle (ON) + circulation air naturelle (AN)
 - ONAF : circulation huile naturelle (ON) + circulation air forcée (AF)
- Classe therm : classe thermique d'isolation : définit la limite maximale que peuvent supporter l'isolants des enroulements
- N° 146122 : Numéro de série
- Année 1995 : Année de construction

- 100kVA : Puissance apparente nominale
- Ucc : 4 % : Tension de court-circuit
- Couplage Dyn11 : couplage des enroulements du transformateur
- primaires: Valeur des tensions nominales à Haute tension.
- secondaire: Valeur de la tension nominale et du courant nominal à Basse tension
- Niveau d'isolement : tension maximale entre enroulement et masse et entre enroulement

I.12. Pièces de transformateurs :

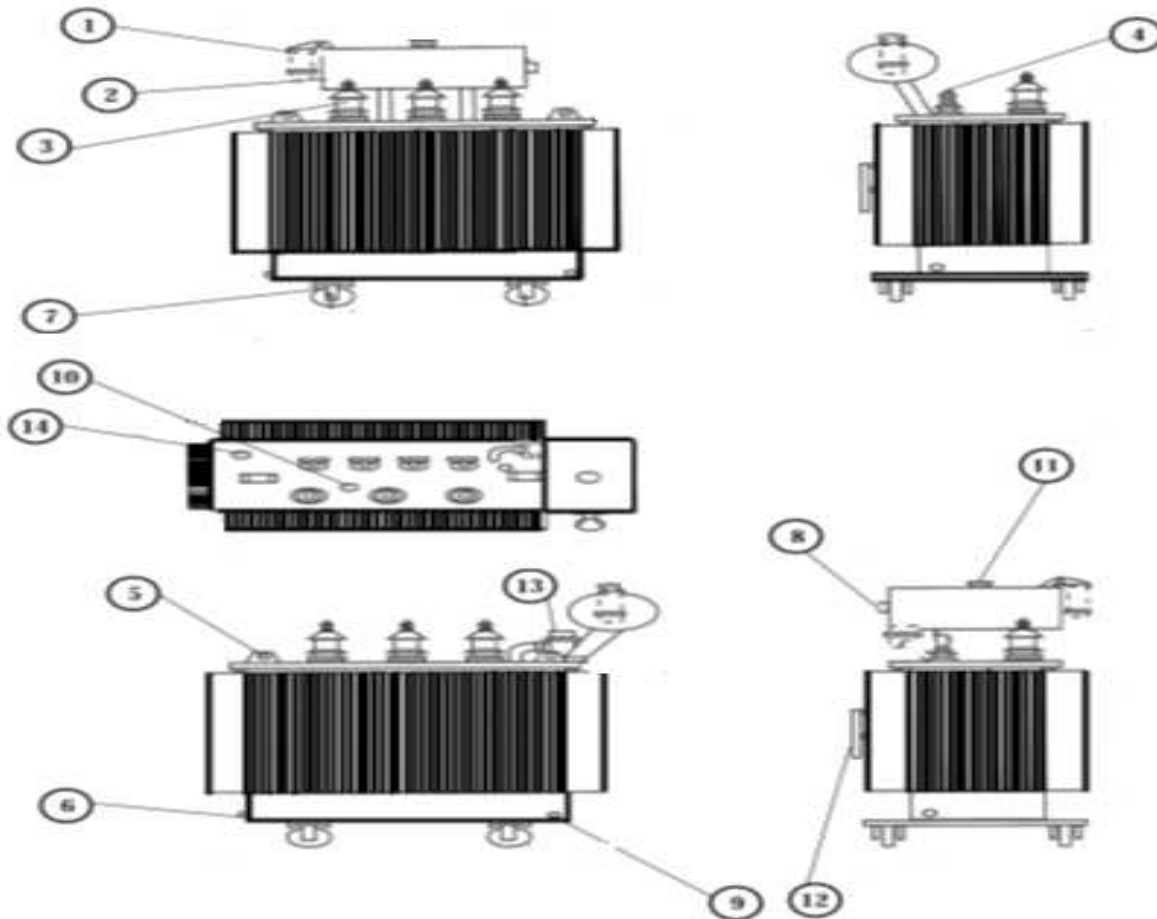
I.12.1.Equipements Standards :

- 1 - Assecheur d'air.
- 2 - Conservateur d'huile.
- 3 - Isolateurs 10 / 30 NF 250 - DIN 42531
- 4 - Traversées DT 1 - DIN 42530
- 5 - Anneaux de suspension.
- 6 - Dispositif de vidange d'huile N 937 701 (DIN 42551)
- 7 - Galets de roulements.
- 8 - Indicateur magnétique de niveau d'huile.
- 9 - Mise à la terre.
- 10 - Manette de commutateur. (Manœuvrable hors tension)
- 11 - Bouchon de remplissage.
- 12 - Plaque signalétique.

I.12.2.Equipements en option :

- 13- Relais Buchholz à deux flotteurs à contacts à deux directions selon DIN42566.
(Alarme et déclenchement)
- 14 - Thermomètre à double contacts. (Alarme et déclenchement)

I.12.3. Plan récapitulatif des encombrements des transformateurs respirant et désignation de leurs différents accessoires :



Conclusion :

Dans ce chapitre on a présente les deux parties essentielles des transformateurs (partie active et partie constructive) utilisés dans l'industrie, en particulier le transformateur triphasé à circuit magnétique classique, ceci en soulignant leur importance dans la distribution de l'énergie électrique. Ensuite on a passé en revue les modes de couplage les plus utilisés, le choix approprié à notre cas, basé sur les régimes de fonctionnement de déséquilibré des utilisateurs, nous avons terminé notre chapitre par la protection de ce transformateur.

Introduction :

La partie active d'un transformateur est constituée du circuit magnétique (noyau) et d'une partie électrique (les enroulements) leur dimension sont essentiellement, le diamètre de la colonne, la hauteur des bobines et le canal de fuite.

Dans ce qui suit, nous allons calculer les dimensions des différentes parties actives, magnétiques et électriques, d'un transformateur triphasé classique de distribution.[7].

II.1.Calcul préliminaire des dimensions principales : [8].

Les dimensions principales d'un transformateur sont :

- Le diamètre de la colonne : D Il est fixé par le constructeur
- La distance entre les colonnes.
- La distance entre les culasses.

II.1.1.Puissance apparente par colonne : (S_c)

$$S_c = \frac{S_n}{m_c}$$

S_n : La puissance nominale d'un transformateur.

m_c : Le nombre de colonnes (m_c = 3 pour un transformateur triphasé).

$$S_c = \frac{100}{3}$$

$$S_c = 33,33 \text{ kVA}$$

II.1.2.Calcul de la tension simple :

La tension nominale par phase dépend du mode de couplage.

L'enroulement secondaire (basse tension) étant couplé en zigzag, la tension nominale par phase est :

U_{ph2} : tension nominale simple au secondaire.

U_{n2} : tension nominale composée au secondaire.

$$U_{ph2} = \frac{U_{n2}}{3}$$

$$U_{ph2} = \frac{400}{3}$$

$$U_{ph2} = 133,33 \text{ V}$$

L'enroulement primaire (haute tension) étant couplé en étoile :

U_{ph1} : tension nominale simple au primaire.

U_{n1} : tension nominale composée au primaire.

$$U_{ph1} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{ph1} = \frac{30 \times 10^3}{\sqrt{3}}$$

$$U_{ph1} = 17,32 \text{ kV}$$

II.1.3. Calcul du courant nominal simple :

Le courant nominal simple dépend du mode de couplage de la puissance par colonne et de la tension nominale simple.

On aura donc :

$$\begin{aligned} \text{Primaire :} \quad I_{ph1} = I_{n1} &= \frac{S_c}{U_{ph1}} \\ &= \frac{33,33 \times 10^3}{17,32 \times 10^3} \end{aligned}$$

$$I_{ph1} = I_{n1} = 1.92 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \text{Secondaire :} \quad I_{ph2} = I_{n2} &= \frac{S_c}{\sqrt{3} \times U_{ph2}} \\ &= \frac{33,33 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 133,33} \end{aligned}$$

$$I_{ph2} = I_{n2} = 144.32 \text{ A}$$

II.1.4. Tension de court-circuit:

La tension de court-circuit est la tension avec laquelle on alimente le primaire de telle sorte que le secondaire étant en court-circuit débite un courant d'intensité égal au courant nominal.

La tension de court-circuit a deux composantes :

- une composante active U_{cca}
- une composante réactive U_{ccr}

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

$U_{cc} = 4,5\%$ (Cahier de charge).

La composante active est donnée par :

$$U_{cca} = \frac{P_{cc}}{S_n} \times 100$$

Avec : P_{cc} : pertes en charge.

$$U_{cca} = \frac{2340}{100000} \times 100$$

$$U_{cca} = 2,34 \%$$

La composante réactive est donnée par :

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

$$U_{ccr} = \sqrt{(4,5)^2 - (2,34)^2}$$

$$U_{ccr} = 3,843 \%$$

II.2. Calcul du nombre de spires :

II.2.1. Basse tension : (w'_2).

$$U_2 = 3 \times 4,44 \times f \times W_2 \times B \times S \rightarrow (1)$$

avec:

U_2 : tension composée au secondaire.

$$U_{n2} = 400 \text{ V}$$

w_2 : nombre de spires au secondaire.

S : section de la colonne.

$$D_c = 119 \text{ mm}$$

$$S = 96,8 \text{ mm}^2 \text{ (donnée par le constructeur).}$$

B : induction magnétique.

$$B = 1,7727 \text{ T}$$

$f = 50 \text{ Hz}$: Fréquence du réseau

De l'équation (1)

On a :

$$W'_2 = \frac{400}{3 \times 4,44 \times 50 \times 1,7727 \times 96,8 \times 10^{-4}}$$

$$W'_2 = 35,00 \text{ spires}$$

$$W'_2 = 35 \text{ spires}$$

Remarque :

Puisque notre enroulement secondaire est couplée en **zigzag**, on doit multiplier le nombre de spires par 2 pour avoir le nombre total de spires de la bobine.

$$W_2 = 2 \times W'_2$$

$$W_2 = 70 \text{ spires}$$

II.2.2. Tension de spire :

$$\begin{aligned} U_{sp} &= 4,44 \times f \times B \times S \\ &= 4,44 \times 50 \times 1,7727 \times 96,8 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$U_{sp} = 3,809V$$

II.2.3. Épaisseur rapportée du canal de fuite a_r :

Pour les enroulements concentriques, elle est donnée par la relation suivante :

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

a_{12} : largeur du canal de fuite ;

a_2 : épaisseur de l'enroulement basse tension ;

a_1 : épaisseur de l'enroulement haute tension .

La largeur du canal de fuite est donnée en fonction de la tension la plus élevée du transformateur et de la tension d'essai. Le tableau II-1 donne a_{12} pour les transformateurs immergés dans l'huile.

Tableau II-1

U _n (kV)	3	8	10	15	20	35	60	170	220
U (kVA) CEI	3,6	7,2	12	17,5	24	36	72,5	123	245
U Essai (kV)	16	22	28	38	50	70	140	230	460
a ₁₂ (cm)	0,6 a 1	0,8 à 1,2	1 a 1,5	1,2 a 1,8	2,1 a 2,7	-	6 à 8	13 a 22	

Pour un calcul préliminaire, on choisit une largeur du canal de fuite qui est la suivante :

$$a_{12} = 2,70 \text{ cm}$$

Le terme $\frac{a_1 + a_2}{3}$ est fonction de la puissance apparente par colonne du transformateur, il est donné par la relation suivante :

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

k : coefficient donné en fonction de la puissance apparente par colonne et la tension la plus élevée.

Sc (kVA)	< 100	100 à 500	750 à 5600	7500 à 31500
Vn (kV)	≤ 10	10 à 35	10 à 35	10 à 35
K	0,6 à 0,8	0,48 à 0,6	0,4 à 0,5	0,44 à 0,64

Tableau II-2.

Pour un calcul préliminaire, on choisit pour k la valeur suivante :

$$K = 0,6$$

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

$$= 0,6 \times \sqrt[4]{33,33}$$

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 1,44 \text{ cm}$$

Finalement on aura:

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

$$= 2,70 + 1,44$$

$$a_r = 4,14\text{cm}$$

Le diamètre de la colonne est $D = 119$ mm, valeur fixée par le constructeur.

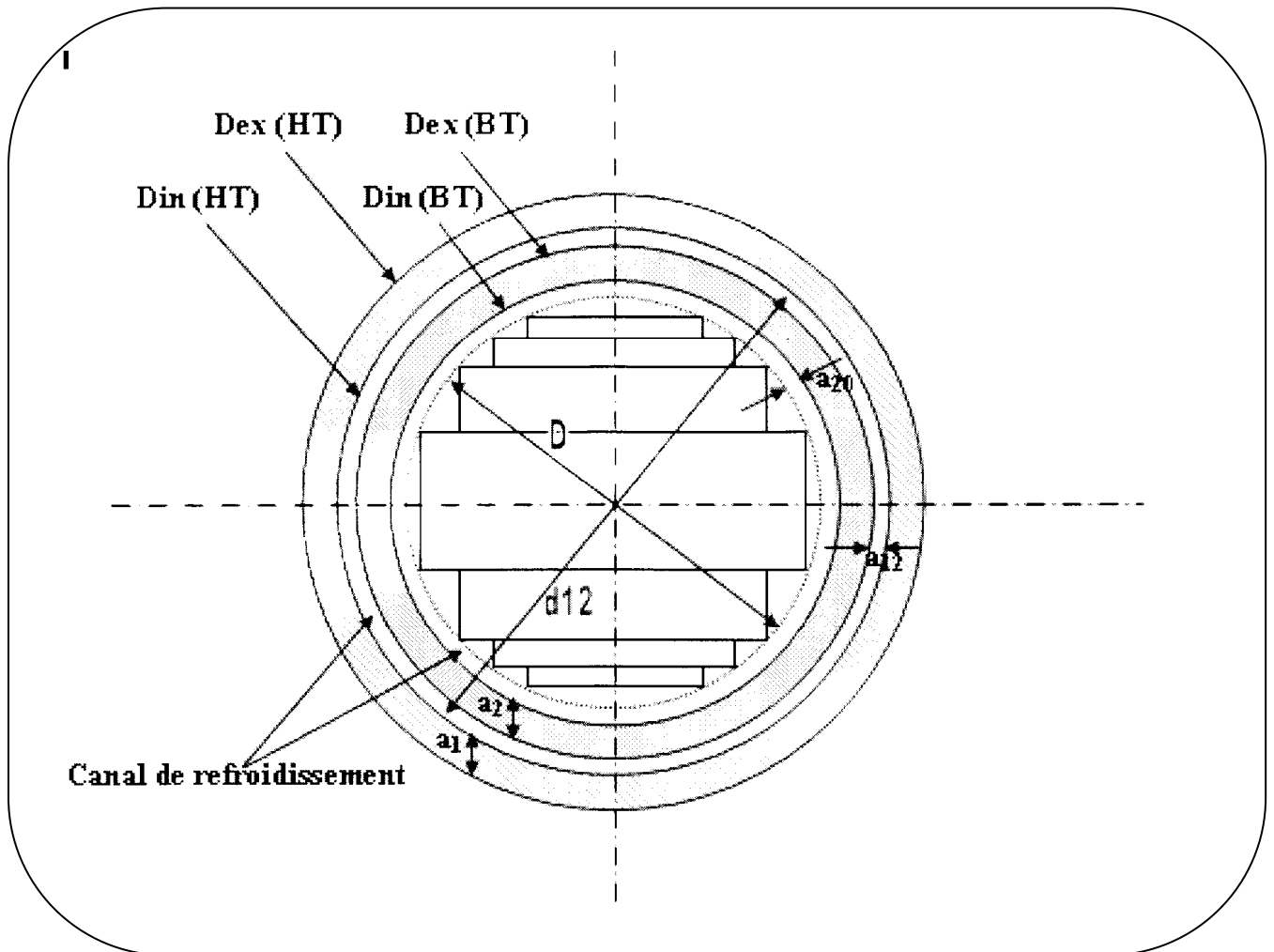


Fig. II.1.coupe générale de la colonne

II.3.Diamètre du canal de dispersion principale : (S₁₂).**II.3.1.Le diamètre du canal de fuite (a₂₀) :**

La distance entre la colonne et l'enroulement basse tension est donnée en fonction de la tension secondaire nominale selon le constructeur. (Tableau II. 3)

On choisit pour un calcul préliminaire :

Tableau II-3

$$a_{20} = 2,5 \text{ mm}$$

U _{n2} (kV)	≤1	3	6	10	15	20	35
a ₂₀	0,5	1,2	1,2-1,5	1,8	1,8-2	2,1-2,3	3

II.3.2.Épaisseur de l'enroulement basse tension :

La valeur de l'épaisseur de l'enroulement basse tension est donnée par la relation suivante :

$$a_2 = k_a \times \sqrt[4]{S_c}$$

k_a : Coefficient qui dépend de la tension nominale

$$k_a = 0,55 \text{ pour } U_n = 400V$$

Donc :

$$a_2 = 0,55 \times \sqrt[4]{33,33}$$

$$a_2 = 1,32 \text{ c m}$$

Enfin , on aura :

D₁₂ : Diamètre de canal de fuite.

$$\begin{aligned} D_{12} &= D + 2a_{20} + 2a_2 + a_{12} \\ &= 119 + 5 + 26,4 + 27 \end{aligned}$$

$$D_{12} = 177,4 \text{ m m}$$

II.3.3.Epaisseur de l'épaisseur de l'enroulement haute tension :

On a de la relation précédente

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 1,44 \text{ cm}$$

$$a_1 = 3 \times 1,44 - a_2$$

$$a_1 = 3 \text{ c m}$$

II.4. Calcul de la densité moyenne du courant (J_m) :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$J_m = \frac{1}{2 \times \pi \times P_t \times KP_{cc}} \times \frac{P_{cc}}{S_n} \times \frac{U_{sp}}{D_{12}}$$

$$\rho_T : \rho_{20^\circ} [1 + \alpha (T - 20)]$$

ρ_{20° : Résistivité du cuivre à 20 °C.

α : Coefficient de température (°C).

T : Température considérée en (°C).

$$\rho_{75^\circ C} : \text{Résistivité du cuivre à la température considérée} \left[\frac{\Omega m}{mm^2} \right]$$

Remarque:

La température moyenne de fonctionnement étant T = 75C

$$\rho_{75^\circ} = 0,0178 \times 10^{-6} \times [1 + 3,81 \times 10^{-3} (75^\circ - 20^\circ)]$$

$$\rho_{75^\circ} = 0,0215 \left[\frac{\Omega m}{mm^2} \right]$$

KP_{cc} : Facteur tenant compte des pertes supplémentaire, il est en fonction de la puissance apparente de transformateur, sa valeur est donnée par le tableau II-4 :

Tableau II-4

Sn (KVA)	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000
KP_{cc}	1,020	1,025	1,050	1,060	1,070	1,075	1,080	1,090

Pour une puissance de 100kVA on prend $KP_{cc}=1,024$

$$J_m = \frac{1}{2 \times \pi \times 0,0215 \times 1,024} \times \frac{2340}{100 \times 10^3} \times \frac{3,809}{177,4 \times 10^{-3}}$$

$$J_m = 3,634 A / mm^2$$

Valeur acceptable, vu la valeur maximale admissible de la densité de courant du cuivre qui est de **4,5 A /mm²** pour un transformateur immergé dans l'huile.

II.5.Choix des conducteurs et du type de l'enroulement basse tension :

II.5.1. Calcul de la section des conducteurs basse tension :

$$S_2 = \frac{I_{ph2}}{J_m}$$

$$= \frac{144,36}{3,634}$$

$S_2 = 39,716mm^2$

S2 = 41,3 mm² une valeur normalisée selon le tableau II — 5.

b = 11,8 mm et **a = 3,55 mm** pour isolation de **0,5 mm**.

Tableau II-5 : section et dimension des conducteurs méplats non isolée.

a \ b	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	8,1	8,9										
1,12			6,1	6,5	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	12,2	13,9	15,6	17,6							
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	15,6	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	61,1	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		18,0		135,0

a : épaisseur de conducteur en [mm]

b : largeur de conducteur en [mm]

Au dessous de trait fort : prévoir une isolation de 0,5 (mm).

Au dessus du trait fort : prévoir une isolation de 0,45(mm).

II.5.2.calcul de la densité de courant basse tension (Jm_2) :

$$Jm_2 = \frac{If_2}{S_2}$$

$$= \frac{144,32}{41,3}$$

$$Jm_2 = 3,494A/mm^2.$$

$$\frac{\Delta J_2}{J_m} = \frac{3,634 - 3,494}{3,634} = 3,85\%$$

$$\frac{\Delta J_2}{J_m} = 3,85\%$$

Cette erreur est inférieure à la valeur admissible qui est de 5%

II.6.Choix des conducteurs et du type de l'enroulement haute tension :**II.6.1.Section du conducteur haute tension S_1 :**

$$S_1 = \frac{I_{n1}}{J_m} = \frac{1,92}{3,634}$$

$$S_1 = 0,528mm^2$$

d :diamètre nu correspondent a S_1 :

$$S_1 = \frac{\pi \times d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \times S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times (0,528)}{\pi}}$$

$$d = 0,82mm$$

Donc on prend une valeur normalisée du tableau (II-6)

d = 0,85 mm avec isolation $d_{iso}=0,913$ mm

Tableau II-6.

Diamètre nu [mm]	Diamètre isolé [mm]	Diamètre nu [mm]	Diamètre isolé [mm]
0,53	0,580	0,71	0,767
0,56	0,611	0,75	0,809
0,6	0,654	0,8	0,861
0,63	0,684	0,85	0,913
0,67	0,726	0,9	0,965

Diamètre de conducteurs ronds

II.6.3. calcul de la densité du courant haut tension J_1 :

$$J_{m1} = \frac{I_{ph1}}{S_1} = \frac{1,92}{0,567}$$

$$J_{m1} = 3,386A / mm^2$$

La densité de courant HT est inférieure à la densité de courant moyenne donc la valeur est admissible.

II.7. Calcul des dimensions :**II.7.1. Calcul de la hauteur magnétique basse tension :**

$$h_m = w_2 \times b_{iso} = 35 \times (11,8 + 0,5)$$

$$h_m = 413mm$$

II.7.2. Calcul de la hauteur de la bobine basse tension :

$$h_b = (w_2 + 1) \times b_{iso}$$

$$= 36 \times (11,8 + 0,5)$$

$$h_b = 424,8mm$$

II.7.3.Calcul du nombre de spires haute tension :

Il est déduit de la relation suivante :

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{U_{n1}}{U_{n2}} \Rightarrow W1 = \frac{\sqrt{3} \times U_{n1} \times W_2}{2 \times U_{n2}}$$

$$W1 = \frac{\sqrt{3} \times 30000 \times 70}{2 \times 400}$$

$$W1 = 4546,63 \text{ spires}$$

$$W1 = 4547 \text{ spires}$$

II.7.4.Hauteur magnétique de la bobine haute tension :

La hauteur magnétique et la hauteur de la bobine sont égales en haute tension.

Vu l'isolation fragile des fils de la haute tension (vernis), on évite l'écrasement du fil par les culasses, lors de serrage des bobines, pour cela, la hauteur de la bobine haute tension est inférieure à la basse tension de 0 jusqu'à 16mm.

Alors on prend :

$$h_{mHT} = h_{BHT} = h_b - 10$$

$$= 424,8 - 10 = 414,8 \text{ mm}$$

II.7.5.Hauteur de montage des bobines :

Les hauteurs des bobines hautes tension sont égales :

avec $d=25\text{mm}$ Pour une tension de 30kV

$$H_M = H_{BHT} + 2d$$

$$= 414,8 + 50$$

$$H_M = 464,8 \text{ m}$$

II.7.6.Nombre de couches haute tension :

$$N_c = \frac{d_{iso} \times (W_1 + 5\%)}{H_{BHT}}$$

On a :

$$W_1 + 5\% = \frac{4547,25}{100} + 4547,25 = 4774.61$$

$$W_1 + 5\% \approx 4775$$

$$N_c = \frac{0,913 * 4775}{414.8} = 10,51 \text{ couches}$$

$$N_c = 11 \text{ couches}$$

II.7.7. Répartition des spires :

$$n_{80} = \frac{H_M - 80}{d_{iso}} = \frac{464,8 - 80}{0,913} = 421,46 \text{ spires} \quad (n_{80} = 421 \text{ spires})$$

$$n_{68} = \frac{H_M - 68}{d_{iso}} = \frac{464,8 - 68}{0,913} = 434,61 \text{ spires} \quad (n_{68} = 435 \text{ spires})$$

$$n_{60} = \frac{H_M - 60}{d_{iso}} = \frac{464,8 - 60}{0,913} = 443,37 \text{ spires} \quad (n_{60} = 443 \text{ spires})$$

$$n_{50} = \frac{H_M - 50}{d_{iso}} = \frac{464,8 - 50}{0,913} = 454,32 \text{ spires} \quad (n_{50} = 454 \text{ spires})$$

$$n_d = W_1 + 5\% - \sum_1^{10} n_{sp}$$

n_d = Nombre de spire de la dernière couche.

$$\sum_1^{10} n_{sp} = n_{80} + n_{68} + n_{60} + n_{50} + (N_c - 5) n_{50} = 4477 \text{ spires.}$$

$$n_d = 4775 - 4477 = 298 \text{ spires}$$

II.8. Dimensionnement radial des enroulements :

II.8.1. Diamètre intérieur de la bobine basse tension : (D_{I2})

$$D_{I2} = D + 2a_{20} \quad a_{20} = 2,5 \text{ mm (Donner par le constructeur)}$$

$$D_{I2} = 119 + 5$$

$$D_{I2} = 124 \text{ mm}$$

II.8.2. Diamètre extérieur de la bobine basse tension :

$$D_{ex2} = D_{I2} + 2 \times a_2$$

a_2 : épaisseur de l'enroulement basse tension.

a : épaisseur de conducteur en [mm]

C_2 : épaisseur du canal de refroidissement = (4mm).

$$a_2 = (a + 0,5) \times 2 + C_2$$

$$a_2 = 12,1 \text{ mm}$$

$$=(3,55+0,5)\times 2+4$$

$$D_{ex2}=124+24,2 =152\text{mm.}$$

$$D_{ex2}=148,2\text{mm}$$

II.8.3.Diamètre intérieur de la haute tension :

$$D_{12}=D_{ex2}+2 a_{12}.$$

a_{12} : Largeur du canal de fuite.

$$a_{12}=27\text{mm (voir tableau II-1, page 30).}$$

$$D_{12}=148,2+54=202,2\text{mm.}$$

$$D_{12}=202,2\text{mm}$$

II.8.4.Diamètre extérieur de l'enroulement haute tension:

$$D_{ext}=D_{in}+2 a_1$$

a_1 : épaisseur de l'enroulement haute tension.

$$a_1 = [0,2 \times (N_c - 1) + d_{iso} \times N_c + 4] \times 0,9.$$

C_1 : 4mm canal de refroidissement.

0,9 : coefficient de correction pour la disposition des fils de la haute tension.

0,2 : isolation entre couche en papier de 0,2 mm

$$a_1 = [0,2 \times (11 - 1) + 0,913 \times 11 + 4] \times 0,9$$

$$a_1 = 14,438\text{mm}$$

Donc :

$$D_{ext} = 202,2 + 2 \times 14,438$$

$$D_{ext} = 231,077\text{mm}$$

II.8.5.Hauteur de la fenêtre H_c :

$$H_C = H_M + (D_{cs} + D_{ci}).$$

$D_{cs} = 15\text{mm}$: Distance entre la bobine et la culasse supérieure.

$D_{ci} = 15\text{mm}$: Distance entre la bobine et la culasse inférieure.

$$H_c = 464,8 + (15 + 15)$$

$$H_c = 494,8 \text{ mm.}$$

II.8.6. Dimension du circuit magnétique :

Les colonnes et les culasse ont une même section. Cette section est de forme circulaire vu ses avantages par rapport à une section carrée ou autre. Pour se rapprocher de cette forme, on a recourus à un empilage de tôles sous forme de gradins.

II.8.6.1. Nombre et dimension des gradins : (figure II.2)

D'après le tableau standard de L'EI le nombre de gradins nécessaire est $N_g = 5$ gradins.

$$B_{s1} = 110 \text{ mm}$$

$$B_{s2} = 100 \text{ mm}$$

$$B_{s3} = 85 \text{ mm}$$

$$B_{s4} = 65 \text{ mm}$$

$$B_{s5} = 40 \text{ mm}$$

On doit appliquer le théorème de Pythagore pour déterminer les hauteurs des gradins.

$$H_{s1} = \sqrt{D^2 - B_{s1}^2}$$

$$H_{s1} = 40 \text{ mm}$$

$$H_{s2} = 64 \text{ mm}$$

$$H_{s3} = 84 \text{ mm}$$

$$H_{s4} = 100 \text{ mm}$$

$$H_{s5} = 112 \text{ mm}$$

II.8.7. Distance entre axe colonne : E_c :

$$E_c = D_{ex} + a_{11}$$

a_{11} : Distance latérale entre deux phases haute tension voisines, elle est donnée par le tableau (II-7).

	a_{12} (mm)	a_{11} (mm)
10kV	$\geq 7,5$	≥ 8
20kV	$\geq 9,5$	≥ 11
30kV	≥ 17	≥ 17

Tableau II-7

On a choisit $a_{11}=17\text{mm}$, c'est la valeur qui correspond à la classe d'isolation de 30kV à laquelle est assimilé le transformateur traité.

$$E_c = 231,077 + 17$$

$$E_c = 248,077\text{mm}$$

II.8.8. Longueur de la fenêtre L_f :

$$\begin{aligned} L_f &= E_c - B_{s1} \\ &= 248,077 - 110 \end{aligned}$$

$$L_f = 158,077\text{mm}$$

II.8.9. Hauteur de noyau H_n :

$$\begin{aligned} H_n &= H_c + 2 \times B_{s1} \\ &= 494,8 + 2 \cdot 110 \end{aligned}$$

$$H_n = 674,8\text{mm}$$

II.8.10. Longueur de noyau L_n :

$$\begin{aligned} L_n &= 2 \times E_c + B_{s1} \\ &= 2 \times 248,077 + 90 \end{aligned}$$

$$L_n = 586,154\text{mm}$$

II.8.11. Dimensionnement de la cale de progression :

On utilise une cale en papier dur à chaque extrémité des bobines Basse Tension.

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{H_M - h_B}{2} \\ &= \frac{464,8 - 424,8}{2} \end{aligned}$$

$$b_1 = 20\text{mm.}$$

$$\begin{aligned} b_2 &= b_1 + 2 \times b_{\text{iso}} \\ &= 20 + 2 \cdot 11,8 \end{aligned}$$

$$b_2 = 43,6\text{mm.}$$

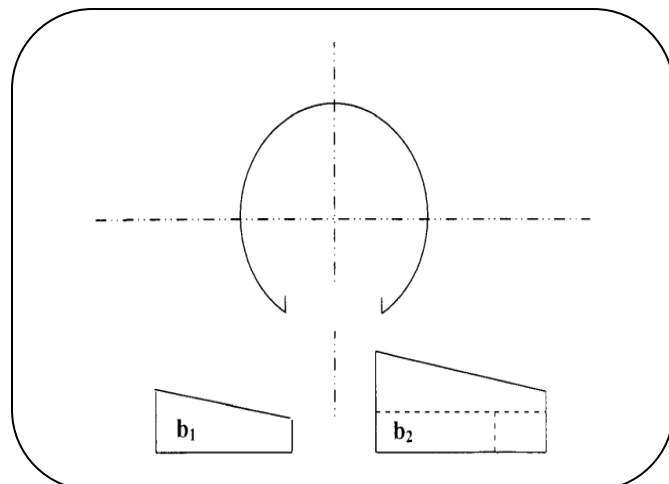


Fig. II.4. Cale de progression.

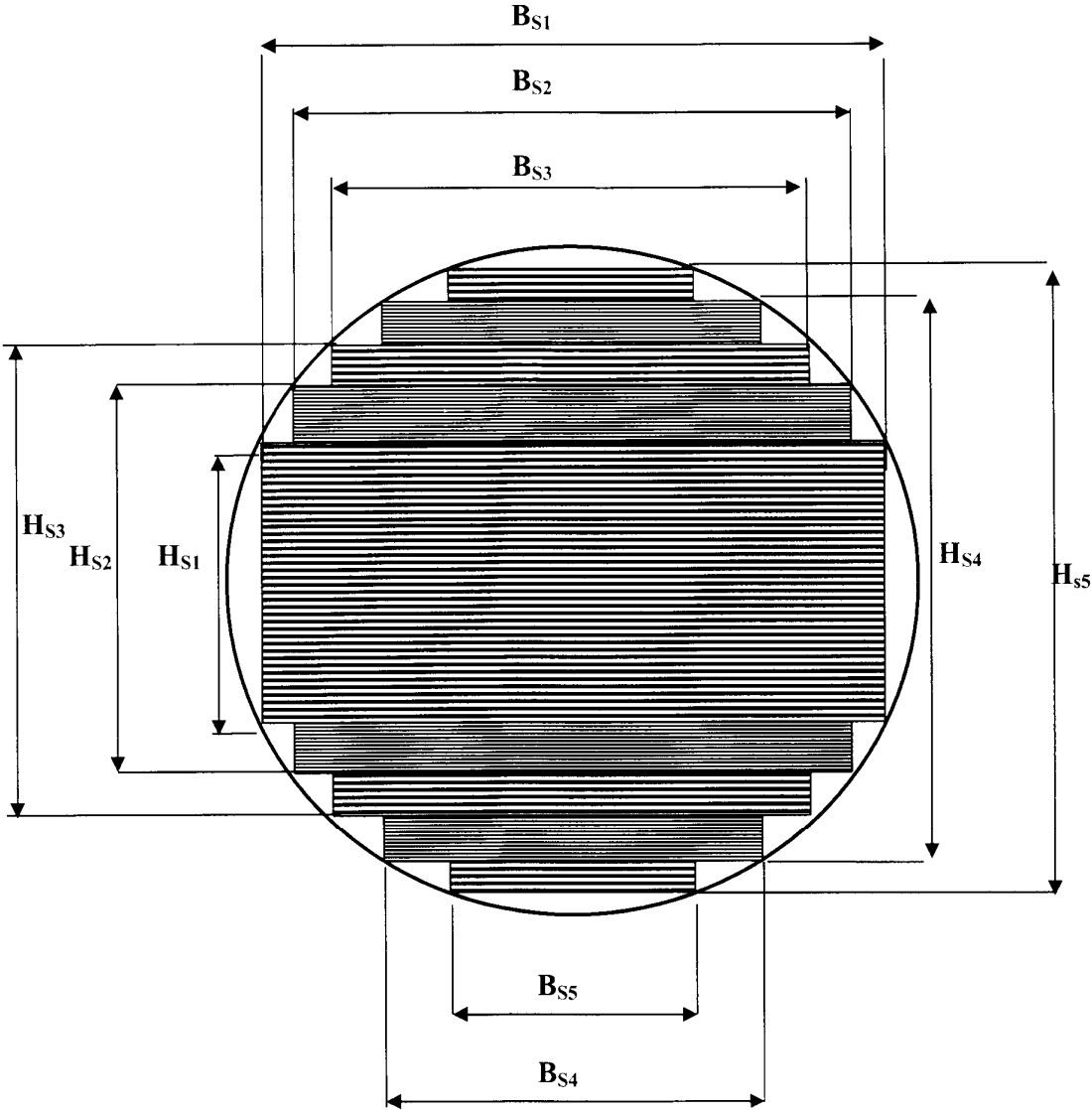


Fig II.2.Representation des gradins dans une colonne.

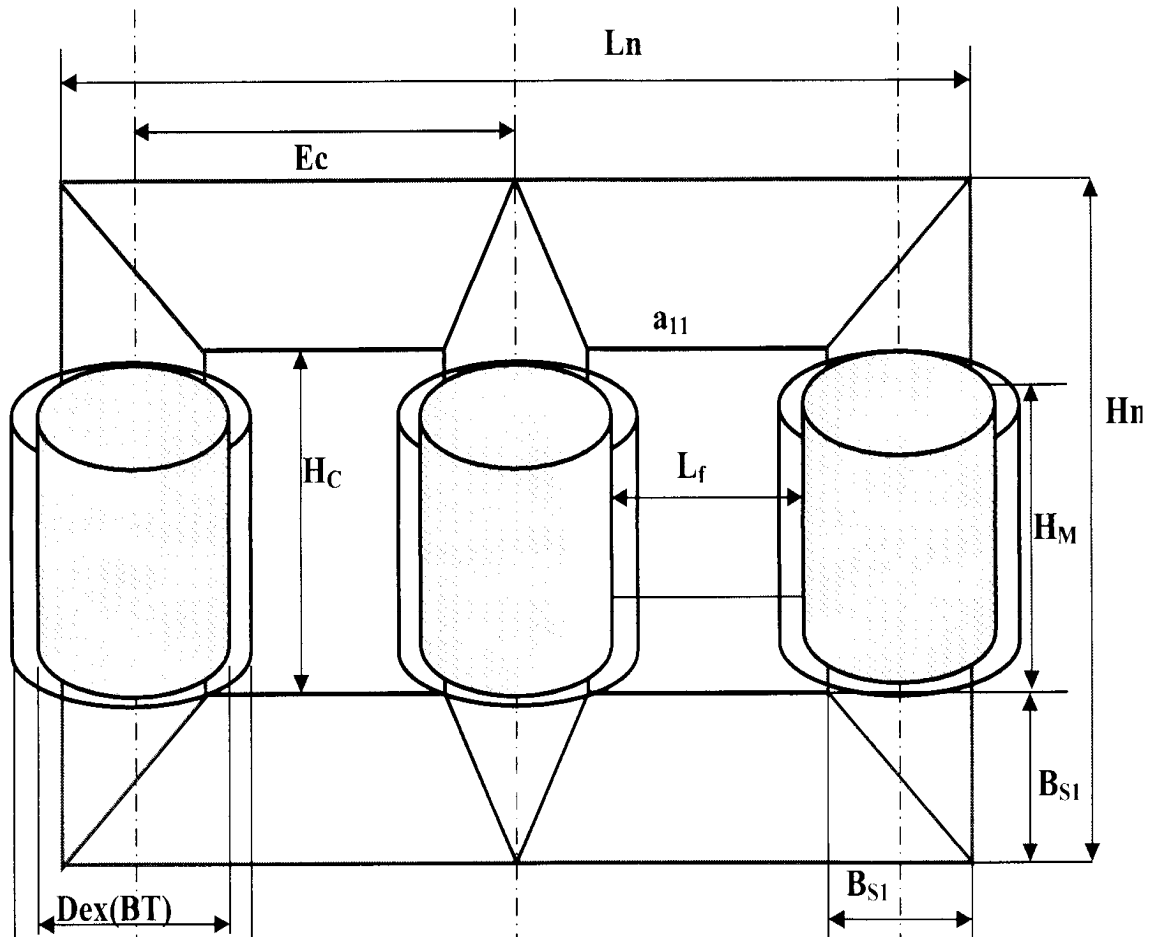


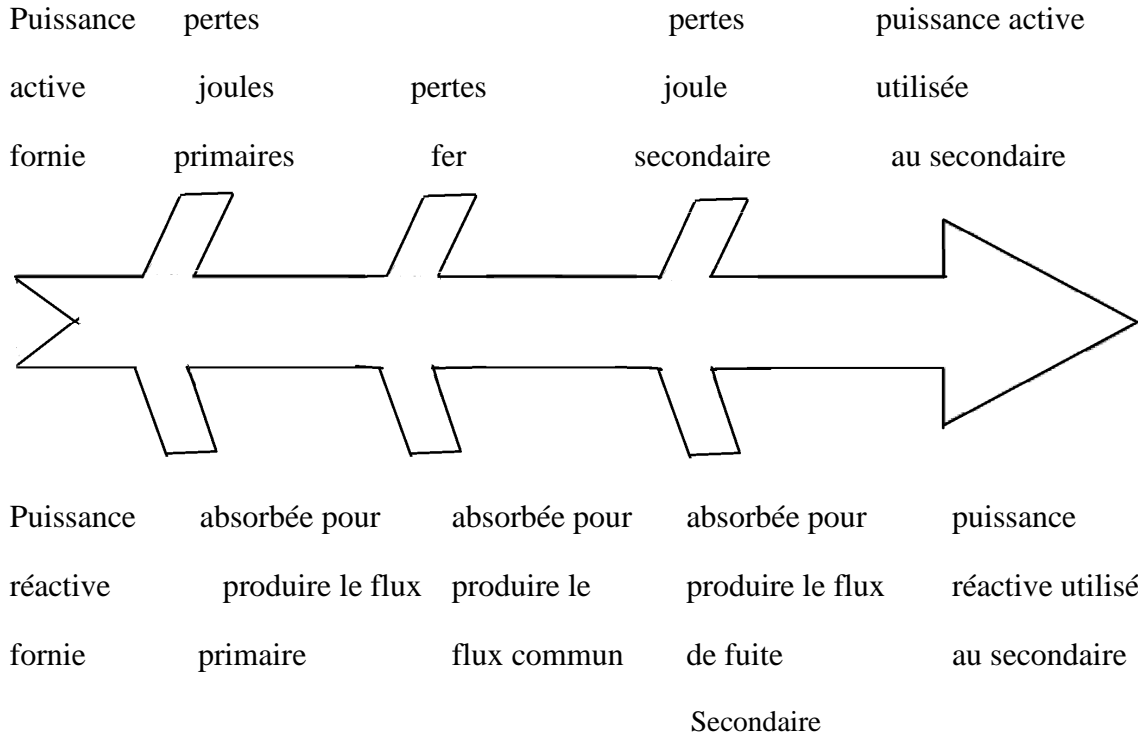
Fig. II.3. Représentation des dimensions de la partie active

Conclusion :

Dans ce chapitre le dimensionnement du transformateur est effectué sur la base d'un calcul électromagnétique. Grâce à ce calcul, nous avons déterminé les dimensions géométriques du circuit magnétique, tels que les diamètres, les largeurs et les hauteurs des colonnes. Ensuite, le calcul du circuit électrique est fait, tels que la section du conducteur et le nombre de spires de la haute et basse tension. Ceci, en respectant les limites admissibles de l'induction magnétique et de la densité de courant respectivement.

INTRODUCTION :

Le fonctionnement du transformateur engendre inévitablement des pertes localisées essentiellement dans le fer et dans le cuivre.



III-1. Pertes à vide : (P₀).

Elles sont constantes, elles dépendent du poids du noyau, du niveau de quantité de la tôle électrique utilisée et de la valeur de l'induction. Elles sont données par la relation suivante :

$$P_0 = P'_0 + P_{s1} + P_{s2}$$

P'_0 : Pertes dans le noyau.

P_{s1} : Pertes supplémentaires dans les coins.

P_{s2} : Pertes supplémentaires dans les colonnes et culasses.

III.1.1. Pertes dans le noyau : (P'₀).

$$P'_0 = \delta_{1.5T} \times k_{BP} \times G_n$$

$\delta_{1.5T} = 1,18 \text{ W/Kg}$: pertes spécifique pour une induction de **1,5T**.

k_{BP} : Coefficient correcteur des pertes spécifique pour une induction différente de 1,5T.

Sa valeur est donnée par le tableau suivant :

B[T]	K_{BP}
$0,5 \leq Bc \leq 1,1$	$0.413B^2$
$1,1 \leq Bc \leq 1,5$	$0.0758e^{1.72Bc}$
$1,5 \leq Bc \leq 1,8$	$0.0536e^{1.95Bc}$
$1,8 \leq Bc \leq 2$	$0.01126e^{2.8178Bc}$

Tableau III-1

On aura donc $K_{BP} = 0,0536e^{1,95Bc} = 1,214$.

Gn : le poids du noyau.

$$Gn = G_1 + G_2 + G_3.$$

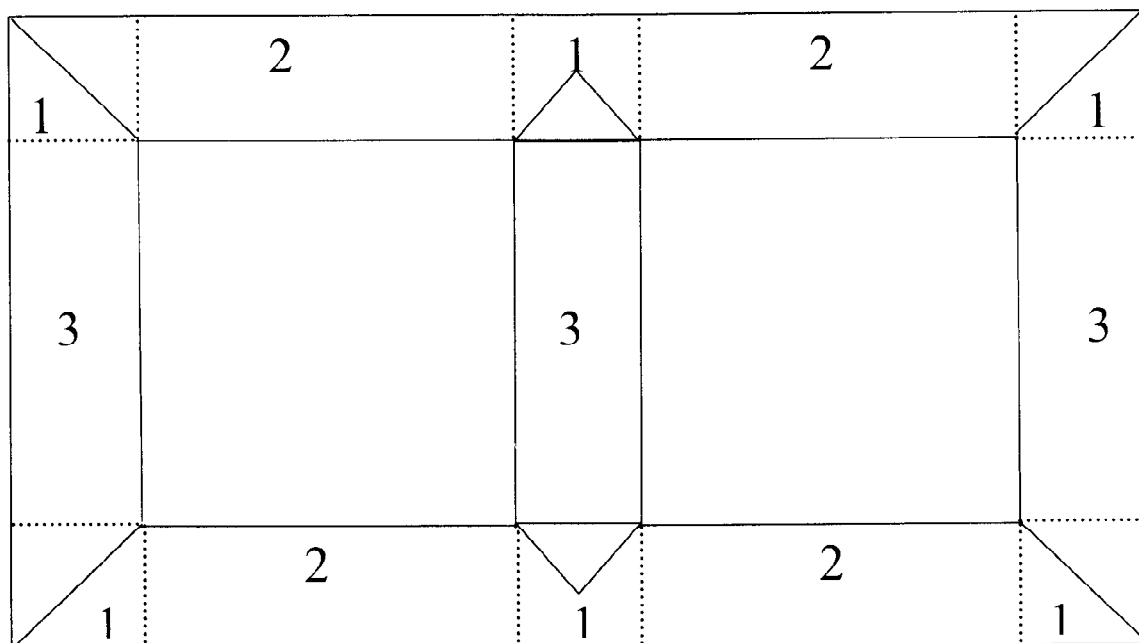


Fig III-1 : répartition des poids du noyau

A/G₁ : poids totale des coins :

$$G_1 = \delta_{fer} \times V_1$$

$\delta_{fer} = 7,65 \text{ Kg/dm}^3$: masse volumique de la tôle utilisée en Kg/dm^3 .

V_1 : volume totale des coins.

S_{fer} : section de noyau $96,8\text{mm}^2$

$$V_1 = 6(B_{S1} \times S_{FER})$$

$$G_1 = \delta_{FER} \times 6 \times (B_{S1} \times S_{FER})$$

$$= 7,65 \times 10^{-4} \times 6 \times (110 \times 96,8)$$

$$G_1 = 39,98Kg$$

B/ G_2 : poids de culasse diminuées des coins :

$$G_2 = \delta_{fer} \times V_2$$

V_2 : Volume totale des culasses.

L_{fer} : longueur de la fenêtre 158,077mm

$$V_2 = 4 \times S_{fer} \times L_{FER}$$

$$G_2 = 4 \times S_{fer} \times L_{FER} \times \delta_{fer}$$

$$= 4 \times 7,65 \times 10^{-4} \times 96,8 \times 158,077$$

$$G_2 = 46,823Kg$$

C/ G_3 : poids total des colonnes:

$$G_3 = \delta_{fer} \times V_3$$

V_3 : volume des colonnes.

H_c : la hauteur de la fenêtre

$$V_3 = 3 \times (H_c \times S_{FER})$$

$$G_3 = 3 \times \delta_{fer} \times (H_c \times S_{FER})$$

$$= 3 \times 7,65 \times 10^{-4} \times (494,8 \times 96,8)$$

$$G_3 = 109,922Kg$$

DONC :

$$G_n = G_1 + G_2 + G_3$$

$$= 39,98 + 46,823 + 109,922$$

$$G_n = 196,725 \text{ Kg}$$

Ce qui donne :

$$P'_0 = \delta_{1,5T} \times k_{BP} \times G_n$$

$$= 1,18 \times 1,214 \times 196,725$$

$$P'_0 = 281,812 \text{ W}$$

III.1.2. Pertes supplémentaires :**A/ pertes supplémentaires dans les coins : (P_{S1})**

Ces pertes sont dues à la non continuité de circuit magnétique provoquant un entrefer, donc une distorsion des ligne de champ. Ces dernières sont dérivées par rapport au sens de laminage.

Elles sont estimées à 50% des pertes fer dans les coins, elles sont données par la relation suivante :

$$P_{s1} = 0,5 \times \delta_{1,18} \times K_{BP} \times G_1$$

$$= 0,5 \times 1,18 \times 1,698 \times 39,98$$

$$P_{s1} = 28,63 \text{ W}$$

B/ pertes supplémentaires dans les colonnes et culasses : (P_{S2}).

Elles sont dues à la variation de la structure des tôles lors de leur usinage, et aux accessoires de fixation du noyau. Elles sont estimées à 15% des pertes dans le noyau sans les coins. Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{S2} = 0,15 \times \delta_{1,18} \times (G_2 + G_3) \times K_{BP}$$

$$= 0,15 \times 1,18 \times 1,645 \times (46,823 + 109,922)$$

$$P_{S2} = 33,681 \text{ W}$$

Pertes fer totales :

$$P_0 = 281,812 + 28,63 + 33,681$$

$$P_0 = 344,123W$$

Les pertes fer sont inferieures à celles fixées par le cahier de charge donc elles sont admissibles.

III.2.Les pertes joules (P_{cc}) :

Ces pertes sont causées par les courants traversant les enroulements primaire et secondaire elles sont du a la charge.

III.2.1.Enroulement basse tension :

a/Diamètre moyenne de la spire : (D_{m2})

$$\begin{aligned} D_{m2} &= D + 2 \times a_{20} + a_2 \\ &= 119 + 5 + 12,1 \end{aligned}$$

$$D_{m2} = 136,1mm$$

b/Longueur moyenne de la spire :

$$\begin{aligned} L_{m2} &= \pi \times D_{m2} \\ &= \pi \times 136,1 \end{aligned}$$

$$L_{m2} = 427,354mm$$

c/Longueur totale d'un enroulement : (L_2)

$$\begin{aligned} L_2 &= W_2 \times L_{m2} \\ &= 70 \times 427,354 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$$L_2 = 29,914m$$

d/Resistance de l'enroulement :(R₂)

$$R_2 = \rho_{75^\circ c} \times \frac{L_2}{S_2}$$

$$= 0,0215 \times \frac{29,914}{41,3}$$

$$R_2 = 15,572 \times 10^{-3} \Omega$$

e/Poids d'un enroulement :(G_{c2})

$$G_{c2} = \delta \times L_2 \times S_2$$

δ : Densité volumique du cuivre, elle est égale à 8,9 Kg/dm³

$$G_{c2} = 8,9 \times 29,914 \times 41,3 \times 10^{-3}$$

$$G_{c2} = 11Kg$$

f/Pertes joule coté basse tension :(P_{cc2})

Elles sont donner par :

$$P'_{cc2} = m \times k \times G_{c2} \times J_{m2}^2$$

K : facteur tenant compte de la conductivité du cuivre à 75°C.

K : 2,4 pour le cuivre.

$$P'_{cc2} = 3 \times 2,4 \times 11 \times (3,494)^2$$

$$P'_{cc2} = 966,876W$$

g/Pertes supplémentaires coté basse tension :**1. Pertes externe :(P_{ex})**

Ces Pertes sont dues aux isolateurs, et aux bornes de connexion, elles sont données par le tableau III-1.

$$P_{ex} = 20W$$

2. Pertes internes : (P_{in})

Elles sont données par l'expression suivante :

$$P_{in} = \frac{3 \times E \times K \times J_{m2}^2 \times G_{c2} \times F}{W_2}$$

E : facteur tenant compte des pertes supplémentaire, des pertes dans la cuve et la partie constructive et du noyau.

F : facteur imbriqué en fonction de couplage de la basse tension

Ces deux facteurs sont donnés par le tableau III-2.

Donc pour un courant secondaire I_{r2} égale a 144, 32 A, on a : $E=1,05$ et $F= 1,0$

$$P_{in} = \frac{1,05 \times 2,4 \times (3,494)^2 \times 3 \times 11 \times 1}{70}$$

$$P_{in} = 14,503W$$

D[mm]	A[mm]	Sn[KVA]	Courant basse tension en [A]	Sans antint	P _{ex} [W]	
					avec antint a=20mm	a= 30mm
28	150	10-30	43,3	0		
		50	72,2	5		
		75	103,3	10		
		100	144,3	20		
		125	180,4	30		
		160	231	40		
45	150	200	280	50		
		250	401	70		
		315	455	110		
		400	577	160		
56	150	500	722		100	90
		630	909		160	150
70	150	800	1155		190	180
		1000	1443		290	280
		1250	1804		450	430
90	165	1600	2309		560	540

Tableau III-2

Intensité du courant secondaire [A]	E	F	
		ΔY	Z
30-100	1,04	1,0	1,0
101-400	1,05		
401-700	1,07		
701-1200	1,09		2,0
1201-1500	1,12		
1501-1800	1,15		
1801-2400	120		

Tableau III-3

3. Pertes par connexion :

Elles sont dues à la résistance des fils qui relient les différentes phases du transformateur, leur valeur dépend de la longueur et de la section des fils de connexion.

Pour les connexions Zigzag

$$\triangleright L_{2con} = L'_{1con} + L'_{2con}$$

$$\bullet L'_{1con} = (D_{ex1} + a_{11}) \times 4$$

$$= (231,077 + 17) \times 4$$

$$L'_{1con} = 992,308mm$$

$$\bullet L'_{2con} = 3 \times A = 3 \times 150$$

$$L'_{2con} = 450mm$$

$$L_{2con} = 992,308 + 450$$

$$L_{2con} = 1442,308mm$$

$$R_{2con} = \rho_{75^\circ} \times \frac{L_{2con}}{S_2}$$

$$= 0,0215 \times \frac{1442,308}{41,3} \times 10^{-3}$$

$$R_{2con} = 7,508 \times 10^{-4} \Omega$$

$$P_{Jc2} = R_{2con} \times I_f^2$$

$$= 7,508 \times 10^{-4} \times (144,32)^2$$

$$P_{Jc2} = 15,638W$$

4. Pertes par effet pelliculaire : ($P_{\text{sup}2}$)

Elles sont dues à l'effet de peau électrique est sont donnees par la relation suivante :

$$P_{\text{sup}2} = (K_{mr2} - 1) \times m \times R_2 \times I_{f2}^2$$

K_{mr2} : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif.

$m=3$: nombre de phases.

Pour un conducteur méplat, K_{mr2} est donnee par la relation suivante :

$$K_{mr2} = 1 + \frac{(mc^2 - 0,2)}{9} \times (\alpha \times a)^4$$

$m_c=2$: nombre de couches basse tension.

a : épaisseur de conducteur basse tension sans isolation.

α : Facteur donne par la relation suivante :

$$\alpha = \sqrt{\frac{n \times b \times \omega \times \mu_0}{h_m \times 2 \times \rho}}$$

b : largeur de conducteur nu.

h_m : hauteur magnétique.

n : nombre de conducteurs dans le sens de la hauteur.

ω : pulsation du réseau.

μ_0 : perméabilité magnétique du vide.

$$\alpha = \sqrt{\frac{35 \times 11,8}{413} \times \frac{314 \times 4 \times \pi \times 10^{-7}}{2 \times 2,15 \times 10^{-8}}}$$

$$\alpha = 95,77 m^{-1}$$

$$K_{mr2} = 1 + \frac{(2^2 - 0,2)}{9} \times (95,77 \times 3,55 \times 10^{-3})^4$$

$$K_{mr2} = 1,0056$$

$$P_{\text{sup}2} = (1,0056 - 1) \times 3 \times 15,572 \times 10^{-3} \times (144,32)^2$$

$$P_{\text{sup}2} = 5,448 W$$

5. Pertes totales en charge cote basse tension :

$$P_{cc2} = P'_{cc2} + P_{ex} + P_{in} + P_{jc2} + P_{sup2}$$

$$P_{cc2} = 966,876 + 20 + 14,503 + 15,638 + 5,448$$

$$P_{cc2} = 1022,465W$$

III.2.2.Enroulement haute tension :**A/Diamètre moyen de la spire :(Dm1)**

$$D_{m1} = D + 2a_{20} + 2a_{12} + 2a_2 + a_1$$

$$= 119 + 5 + 54 + 24,2 + 14,438$$

$$D_{m1} = 216,638mm$$

B/Longueur moyenne de la spire :(Lm1).

$$L_{m1} = D_{m1} \times \pi = 216,638 \times \pi$$

$$L_{m1} = 680,243mm$$

C/Longueur totale d'un enroulement :(L1)

$$L_1 = w_1 \times L_{m1} = 4547 \times 680,243 \times 10^{-3}$$

$$L_1 = 3093,064mm$$

D/Resistance de l'enroulement :

$$R_1 = \rho_{75^\circ} \times \frac{L_1}{S_1} = 0,0215 \times \frac{3093,064 \times 10^{-3}}{0,528}$$

$$R_1 = 125,95 \times 10^{-3} \Omega$$

E/Poids d'un enroulement :

$$G_{c1} = \gamma \times L_1 \times S_1 \times 10^{-3}$$

$$= 8,9 \times 3093,064 \times 0,528 \times 10^{-3}$$

$$G_{c1} = 14,535Kg$$

F/Pertes joule coté haute tension :

$$P'_{cc1} = K \times m \times G_{c1} \times J_1^2$$

$$= 2,4 \times 3 \times 14,535 \times (3,386)^2$$

$$P'_{cc1} = 1199,83w$$

g/Pertes supplémentaire cote haute tension :

1. Pertes par connexion : (P_{jc1})

$$L_{1con} = H_B \times 7,5 = 424,8 \times 7,5$$

$$L_{1con} = 3186mm$$

$$R_{1co} = \rho_{75^\circ} \times \frac{L_{1con}}{S_1} = 0,0215 \times \frac{3,168}{0,528}$$

$$R_{1co} = 12,973 \times 10^{-2} \Omega$$

$$P_{jc1} = R_{1con} \times I_{f1}^2 = 12,973 \times 10^{-2} \times (1,92)^2$$

$$P_{jc1} = 0,478w$$

2/Pertes par effet pelliculaire : (P_{sup1})

$$P_{sup1} = (K_{mr1} - 1) \times m \times R_1 \times I_{ph1}^2$$

$$K_{mr1} = \frac{m_c^2 - 0,2}{9} \times (\alpha d)^4$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{n \times d}{h_B} \times \frac{w \times \mu_0}{2 \times \rho}}$$

$$= \sqrt{\frac{454 \times 0,913}{414,8} \times \frac{314 \times 4 \times \pi \times 10^{-7}}{2 \times 2,15 \times 10^{-8}}}$$

$$\alpha = 95,734m^{-1}$$

Donc :

$$K_m = 1 + \frac{(11)^2 - 0,2}{9} \times (95,734 \times 0,913 \times 10^{-8})$$

$$K_m = 1,000011$$

$$P_{sup1} = (1,000011 - 1) \times 3 \times 125,95 \times (1,92)^2$$

$$P_{sup1} = 0,0153W$$

3/Pertes totales en charge coté haute tension :

$$P_{ccl} = P'_{cc1} + P_{jcl} + P_{sup1}$$

$$= 1199,83 + 0,478 + 0,0153$$

$$P_{ccl} = 1200,323W$$

H/Erreurs sur les pertes en charge :

$$\frac{\Delta P_{cc}}{P_{cc}} = \frac{2340 - 2222,788}{2340} \times 100 = 5\%$$

$$\frac{\Delta P_{cc}}{P_{cc}} < 15\% \quad \text{donc l'erreur est admissible.}$$

I/Poids total de cuivre :

$$Gc = m \times (Gc2 + Gc1)$$

$$= 3 \times (11 + 14,535)$$

$$Gc = 76,605Kg$$

III.3.Calcul définitif de la tension de court circuit :

$$U_{cca} = \frac{2222,788 \times 10^{-3}}{100} \times 100$$

$$U_{cca} = 2,222\%$$

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

$$= \sqrt{(2,222)^2 + (3,843)^2}$$

$$U_{cc} = 4,439\%$$

III.4.Rendement :

Il est donné par la relation suivante :

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + \alpha^2 \times P_{cc}}{\alpha \times S_n \times \cos \varphi_2 + \rho_0 + \alpha^2 \times P_{cc}} \right) \times 100\%$$

$$\alpha = 0,39$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}} = \sqrt{\frac{344,123}{2222,788}}$$

Le rendement pour une charge ayant un $\cos\varphi_2=1$.

α	$\alpha^2 \times P_{cc}$ [w]	$P_0 + \alpha^2 \times P_{cc}$ [w]	$\alpha \times S_n \times \cos\varphi + P_0 + \alpha^2 \times P_{cc}$ [w]	$\eta\%$
0,25	138,924	483,047	25483,047	98,10
0,39	338,086	682,209	39682,209	98,28
0,5	555,697	899,82	50899,82	98,23
0,75	1250,318	1594,44	76594,44	97,91
1,00	2222,788	2566,911	12566,911	97,47

Tableau III.4.

Le rendement pour une charge ayant un. $\cos\varphi_2=0,8$.

α	$\alpha^2 \times P_{cc}$ [w]	$P_0 + \alpha^2 \times P_{cc}$ [w]	$\alpha \times S_n \times \cos\varphi_2$ [w]	$\alpha \times S_n \times \cos\varphi_2 + P_0 + \alpha^2 \times P_{cc}$ [w]	$\eta\%$
0,25	138,924	483,047	20000	20483,047	97,64
0,39	338,086	682,209	31200	31882,209	97,86
0,50	555,697	899,82	40000	4899,82	97,79
0,750	1250,32	1594,44	60000	61594,44	97,41
1,00	2222,788	2566,91	80000	82222,788	97,29

Tableau III.5.

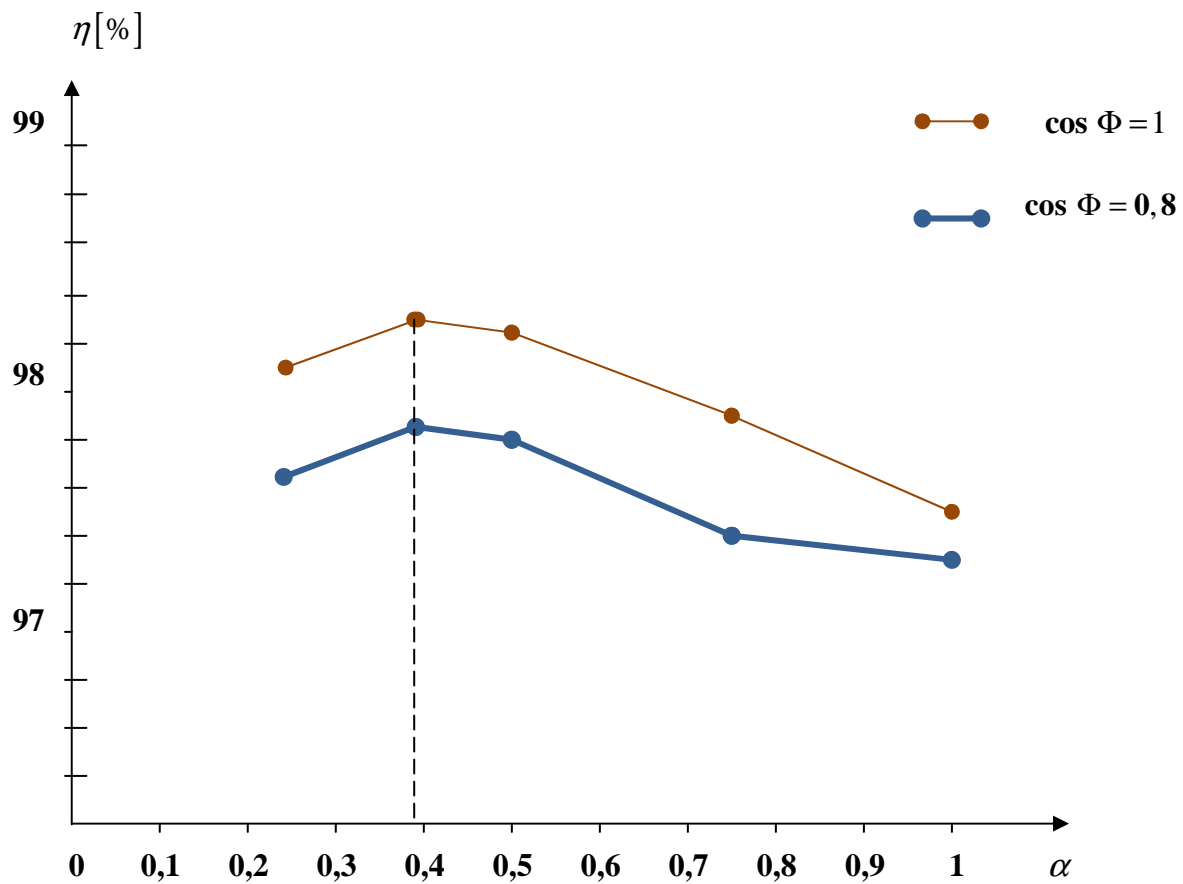


Fig. III-2. Courbe de rendement

III.5. La chute de tension :

La variation de la tension d'un transformateur est donnée par :

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

Avec :

$$\alpha = \frac{p_{ch}}{S_n} = \frac{\sqrt{3} \times U_2 \times I_{2n}}{U_2 \times \cos \varphi_2}$$

$$I_2 = \frac{\alpha \times U_{n2} \times I_{n2}}{U_2 \times \cos \varphi_2}$$

$$I_2 = \frac{\alpha \times S_n}{\sqrt{3} \times U_2 \times \cos \varphi_2}$$

α: coefficient de charge

la variation de l'erreur relative de la tension est définie (%) :

$$\Delta U (\%) = \frac{U_{n2} - U_2}{U_{n2}} \times 100$$

En posant: $\Delta U = U_{n2} - U_2$

$$\Delta U (\%) = \frac{\Delta U}{U_{n2}} \times 100$$

$$\Delta U [V] = \frac{U_{n2} \times \Delta U (\%)}{100}$$

La tension de charge au secondaire sera égale à :

$$U_2 = U_{n2} - \frac{U_{n2} \times \Delta U (\%)}{100} = U_{n2} \times \left(1 - \frac{\Delta U (\%)}{100} \right)$$

Cas d'une charge inductive $\cos\varphi_2 = 1$ et $\sin\varphi_2 = 0$.

Avec

$$U_{ccr} = 3,84\% \quad U_{cca} = 2,34\%$$

D'où :

$$\Delta U [\%] = \alpha \times (2,34 \times \cos\varphi_2)$$

Tableau III.6.

α	$\Delta U \%$	$\Delta U (v)$	$U_2(v)$	I_2
0,25	0,585	2,34	397,66	36,296
0,39	0,912	3,6504	396,35	56,81
0,50	1,17	4,68	395,32	73,023
0,75	1,755	7,02	392,98	111,18
1,00	2,34	9,36	390,64	147,8

Cas d'une charge inductive $\cos\varphi_2=0.8$ et $\sin\varphi_2=0,6$.

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

avec :

$$U_{ccr} = 3,84\% \quad U_{cca} = 2,34\%$$

$$\Delta U (\%) = 4,176 \times \alpha$$

Tableau III.7.

α	$\Delta U \%$	ΔU (v)	U_2 (v)	I_2
0,25	1,044	4,176	395,82	45,37
0,39	1,628	6,512	393,48	71,53
0,50	2,088	8,352	391,65	92,13
0,75	3,132	12,528	387,47	139,69
1,00	4,176	16,704	383,29	188,28

Cas d'une charge capacitive $\cos\varphi_2=0.8$ et $\sin\varphi_2=-0,6$.

$$\Delta U [\%] = \alpha \times (U_{cca} \times \cos\varphi_2 - U_{ccr} \times \sin\varphi_2)$$

avec :

$$U_{ccr} = 3,84\% \quad U_{cca} = 2,34\%$$

$$\Delta U (\%) = 0,432 \times \alpha$$

Tableau III.8

α	$\Delta U \%$	ΔU (v)	U_2 (v)	I_2
0,25	0,108	0,432	399,56	45,15
0,39	0,168	0,672	399,32	70,48
0,50	0,216	0,864	399,14	90,63
0,75	0,324	1,296	398,70	135,75
1,00	0,432	1,728	398,27	181,20

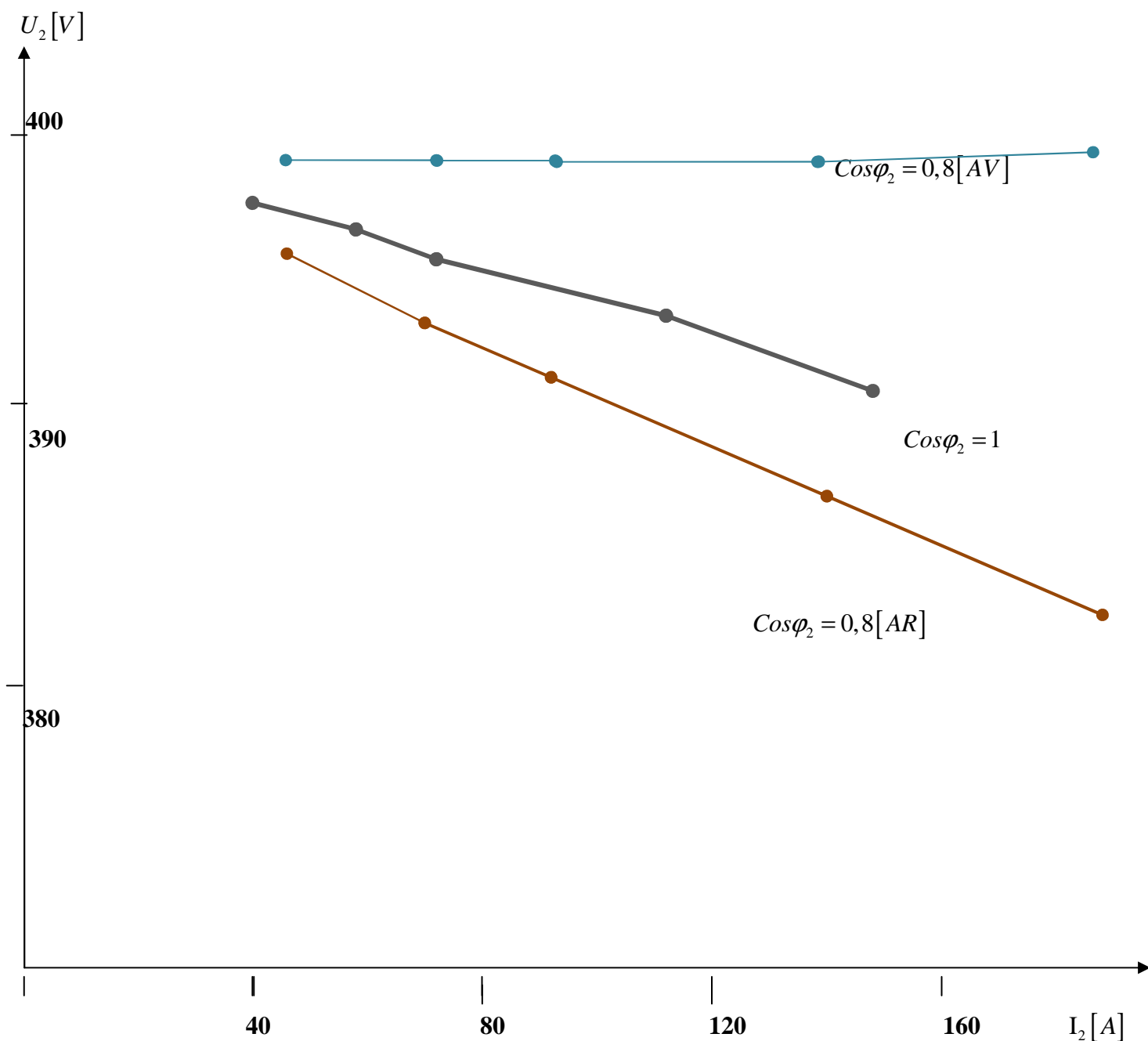


FIG-III-3. Caractéristique en charge

III.6. Calcul du courant à vide :

$$\frac{I_{10}}{I_{n1}} = \frac{K_{BS} \times K_{WS} \times K_{KS} \times S_{1,5} \times K_{GS} \times G_{fer}}{S_n} \times 100$$

G_{fer} : Poids de fer.

$$S_{01,5} = 3,45.$$

K_{ks} : 1,342 pour $D=119\text{mm}$. C'est le facteur de forme du noyau en fonction du diamètre de la colonne.

$K_{GS} = 1$ pour une tôle non recuite (laminage à froid) : facteur du circuit.

$K_{ws} = 1$ pour les bobines circulaires : facteur de forme de la bobine.

$K_{BS} = 4,034$ pour $B_C = 1.7727$

T=facteur d'induction.

$$\frac{I_{10}}{I_{n1}} = \frac{196,725 \times 3,45 \times 1,342 \times 1 \times 1 \times 4,034}{100 \times 10^3} \times 100$$

$$\frac{I_{10}}{I_{n1}} = 3,67\%$$

Interprétations des courbes :

A partir de la courbe (caractéristique du transformateur en charge) on voit que les variations de la tension U_2 en fonction de courant I_2 a la forme d'une droite pour les trois types de charge, mais en charge capacitive la tension U_2 est presque stable.

Pour la charge résistive, on remarque que la chute de tension est de l'ordre de 3% de la tension nominal, et elle est de l'ordre de 4,5% en charge inductive.

Lorsque le courant I_2 tend vers zéro, la tension U_2 tend vers la tension nominal $U_n=400\text{V}$, pour les trois types de charge.

En ce qui concerne la courbe du rendement en fonction du facteur de charge, On voit que pour les valeurs de facteur de charge compris entre 0,3 et 0,38, le rendement augmente avec la croissance de facteur de charge α comprise entre 0,38 et 1, le rendement diminué.

On remarque que les deux courbes ont la même forme pour les deux types de charge résistive et inductive. Ceci avec des valeurs plus importantes dans le cas de la charge résistive. On relève un écart de 0,5% du rendement entre les deux charges.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a calculé les différentes pertes générées dans un transformateur lors de son fonctionnement à vide et en charge (pertes à vide et pertes en charge) .

Les pertes à vide sont causées principalement par courant de Foucault, par hystérésis et par pertes supplémentaires.

La valeur des pertes à vide calculée est proche de celle donnée par le cahier des charges.

Introduction :

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

Dans tous ces matériaux, une fraction de la puissance active reçue par le transformateur passe sous la forme calorifique dans le fer (par hystérésis et par courant de Foucault). Dans le cuivre (par effet joule) et dans les isolations en papier presspahn (par pertes diélectriques). La transmission de la chaleur peut être définie comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de la température.[9].

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

➤ **Par conduction :**

La chaleur d'une région à haute température vers une région de basse température par contact direct des molécules.

➤ **Par rayonnement :**

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

➤ **Par convection :**

Le transfert de la chaleur s'effectué dans ce cas par la combinaison de trois actions à savoir : la conduction, l'accumulation de chaleur et du mouvement de milieu (fluide).

L'idée générale est de placer le circuit magnétique muni des enroulements dans une cuve métallique remplie d'huile minérale. Cette dernière, en circulation le long des bobines et du noyau, véhicule de la chaleur dégagée et transmet à la cuve munie d'ondulation.les valeurs limites d'échauffement pour les différentes parties du transformateur sont :

- 60°C pour l'huile (température maximale de l'huile).
- 65°C pour les enroulements (température moyenne des enroulements).
- 75°C pour le circuit magnétique (température maximale du circuit magnétique).

IV.1. Echauffement de circuit magnétique :

En raison de l'inhomogénéité du circuit magnétique.et pour facilite les calculs. on assimilera la section de la colonne à une section rectangulaire et dimension **a** et **b**.[10]

$$a = 0,9 \times D$$

$$a = 0,9 \times 119$$

$$a = 107,1 \text{ mm}$$

$$b = \frac{S_{fer}}{a}$$

$$b = \frac{96,8 \times 10^2}{107,1}$$

$$b = 90,38 \text{ mm}$$

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

IV.1.1. Calcul de l'échauffement maximal par rapport à la surface dans la direction longitudinal θ_1 :

$$\theta_1 = \frac{p \times a^2}{8 \times \lambda_L}$$

$$p = \gamma_{1,5} \times K_{BP} \times \gamma_{fer} \left[\frac{W}{m^3} \right]$$

P : pertes spécifiques par unité de volume.

$\gamma_{1,5}$: Pertes spécifiques pour une induction de 1,5T (0,97W /Kg).

K_{BP} : coefficient correcteur des pertes spécifiques pour une induction différente de 1,5 T.

$$K_{BP} = 0,0536 \times e^{1,95 \times 1,7727} \quad \text{Pour } 1,5T < B \leq 1,8T$$

$$P = 0,0536 \times e^{1,95 \times 1,7727} \times 7,65 \times 10^3 \quad P = 12956 \text{ W} / m^3$$

λ_L : Conduction thermique longitudinale (20w/mC).

$$\theta_1 = \frac{12956 \times (107,1 \times 10^{-3})^2}{8 \times 20}$$

$$\theta_1 = 0,928$$

IV.1.2. Echauffement maximal du circuit magnétique par rapport à la surface dans la direction transversal θ_1 :

La valeur de cet échauffement est donnée par la formule suivante :

$$\theta_1' = \frac{p \times b^2}{8 \times \lambda_t} [^{\circ}C]$$

λ_t : Conductivité thermique transversal égale a 3w/mC.

$$\theta_1' = \frac{12956 \times (90,38 \times 10^{-3})^2}{8 \times 3}$$

$$\theta_1' = 4,41^{\circ}C$$

IV.1.3. Différence de température entre les surfaces du circuit magnétique et l'huile, dans la direction longitudinale θ_2 :

$$\theta_2 = \frac{p \times a}{2 \times \alpha_{con}} [^{\circ}C]$$

α_{con} : Coefficient de convection de l'huile, sa valeur est comprise entre 100 et 110W/mC

On prend $\alpha_{con} = 100$ W/mC

$$\theta_2 = \frac{12956 \times 107,1 \times 10^{-3}}{2 \times 100}$$

$$\theta_2 = 6,94^{\circ}C$$

IV.1.4. Différence de température entre les surfaces de circuit magnétique et l'huile dans la direction transversale θ_2' :

$$\theta_2' = \frac{p \times b}{2 \times \alpha_{con}} [^{\circ}C]$$

$$\theta_2' = \frac{12956 \times 90,38 \times 10^{-3}}{2 \times 100}$$

$$\theta_2' = 5,85^{\circ}C$$

IV.1.5.Echauffement maximal dans la direction longitudinale :

$$\theta_{1\max} = \theta_1 + \theta_2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{1\max} = 0,928 + 6,94$$

$$\theta_{1\max} = 7,868^\circ\text{C}$$

IV.1.6.Echauffement maximal dans la direction transversale :

$$\theta_{2\max} = \theta'_1 + \theta'_2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{2\max} = 5,85 + 4,41$$

$$\theta_{2\max} = 10,26^\circ\text{C}$$

IV.1.7.Echauffement résultant du circuit magnétique :

$$\theta_{\max \text{ Cm/H}} = \theta_{2\max} \times \frac{\theta'_2 + 1,5 \times \theta'_1}{\theta_{2\max} + \theta'_2 + 1,5 \times \theta'_1} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\theta_{\max \text{ Cm/H}} = 10,26 \times \frac{5,85 + 1,5 \times 4,41}{10,26 + 5,85 + 1,5 \times 4,41}$$

$$\theta_{\max \text{ Cm/H}} = 5,627^\circ\text{C}$$

IV.2.Echauffement moyen dans les enroulements par rapport à l'huile :

Les conditions de répartition de la chaleur dans les enroulements sont beaucoup plus complexes que dans le circuit magnétique. Elles dépendent de plusieurs paramètres tels que le type et le nombre d'enroulements, les dimensions des canaux de refroidissement.

Les canaux de refroidissement sont utilisés pour que l'huile puisse entrer entre les enroulements basse tension pour assurer un bon refroidissement.

La présence de ces canaux par des cales, font que les conditions de refroidissement des surfaces internes des enroulements sont différentes.

La surface occupée par les cales est estimée à 15% de la surface totale de chaque enroulement.

La différence de température est répartie de façon uniforme suivant la hauteur des enroulements.

IV.2.1.Calcul des surfaces des enroulements :

IV.2.1.1.Surface intérieure de l'enroulement basse tension : (voire figure IV.1)

$$S_{i2} = \pi \times D_{i2} \times h_{B2}$$

$$S_{i2} = \pi \times 12,4 \times 10^{-2} \times 424,8 \times 10^{-3}$$

$$S_{i2} = 0,165 m^2$$

IV.2.1.2.Surface intérieure de l'enroulement basse tension en contact avec l'huile

$$S_{i2H} = 0,85 \times S_{i2} [m^2]$$

$$S_{i2H} = 0,85 \times 0,165$$

$$S_{i2H} = 0,140 m^2$$

IV.2.1.3.Surface extérieure de l'enroulement basse tension :

$$S_{e2} = \pi \times D_{ex2} \times h_{B2} [m^2]$$

$$S_{e2} = \pi \times 14,82 \times 10^{-2} \times 424,8 \times 10^{-3}$$

$$S_{e2} = 0,197 m^2$$

IV.2.1.4.Surface extérieure de l'enroulement basse tension en contact avec l'huile:

$$S_{e2H} = 0,85 \times S_{e2} [m^2]$$

$$S_{e2H} = 0,85 \times 0,197$$

$$S_{e2H} = 0,167 m^2$$

IV.2.1.5.Surface intérieure de l'enroulement haute tension :

$$S_{il} = \pi \times D_{il} \times h_{B1} [m^2]$$

$$S_{il} = \pi \times 20,22 \times 10^{-2} \times 414,8 \times 10^{-3}$$

$$S_{il} = 0,263m^2$$

IV.2.1.6.Surface intérieure de l'enroulement haute tension en contact avec l'huile :

$$S_{ilh} = 0,85 \times S_{il} [m^2]$$

$$S_{ilh} = 0,85 \times 0,263$$

$$S_{ilh} = 0,223m^2$$

IV.2.1.7.Surface extérieure de l'enroulement haute tension :

$$S_{e1} = \pi \times D_{ex1} \times h_{B1} [m^2]$$

$$S_{e1} = \pi \times 23,10 \times 10^{-2} \times 414,8 \times 10^{-3}$$

$$S_{e1} = 0,300m^2$$

Tout cette surface est en contact avec l'huile, donc :

$$S_{e1} = S_{e1H}$$

IV.2.2.Echauffement de l'enroulement secondaire par rapport à l'huile :**IV.2.2.1.Calcul de la conductivité résultante de l'enroulement BT :**

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_i \times L}{2 \times L_i \times (m_c^2 - 2)} [W / m^{\circ}C]$$

λ_i : Conducteur du papier, elle est égale à 0,2 [w/mC]

L : épaisseur de l'enroulement BT sans isolation

$$L = a_2 - 2 \times L_i$$

$$L = 12,1 - 0,5$$

$$L = 11,6 \text{ mm}$$

$2 * L_i$: Épaisseur de l'isolation, égale a 0,5mm

m: nombre de couches ; enroulement zigzag, m=2

$$\lambda_{res} = \frac{0,2 \times 11,6}{0,5 \times (4 - 2)}$$

$$\lambda_{res} = 2,32 \text{ W / m}^\circ\text{C}$$

IV.2.2.2. Calcul des résistances thermiques de l'isolation périphérique :

- **Coté intérieur de la bobine secondaire basse tension :**

$$R_3 = \frac{L_i}{\lambda_i \times S_{i2H}} + \frac{1}{\alpha_{con} \times S_{i2H}} \text{ [}^\circ\text{C / W]}$$

$$R_3 = \frac{0,25 \times 10^{-3}}{0,2 \times 0,140} + \frac{1}{100 \times 0,140}$$

$$R_3 = 0,08 \text{ }^\circ\text{C / W}$$

- **Coté extérieur de la bobine secondaire basse-tension :**

$$R_1 = \frac{L_i}{\lambda_i \times S_{e2H}} + \frac{1}{\alpha_{con} \times S_{e2H}} \text{ [}^\circ\text{C / W]}$$

$$R_1 = \frac{0,25 \times 10^{-3}}{0,2 \times 0,167} + \frac{1}{100 \times 0,167}$$

$$R_1 = 0,067 \text{ }^\circ\text{C / W}$$

IV.2.2.3. Distance ou la température est maximale (voire figure)

$$X = L \times \left[\frac{R_1 \times S_{e1} + \frac{L}{2 \times \lambda_{res}}}{R_1 \times S_{e1} + R_3 \times S_{i2} + \frac{L}{\lambda_{res}}} \right] \text{ [mm]}$$

$$X = 11,6 * 10^{-3} \times \left[\frac{0,067 \times 0,300 + \frac{11,6 \times 10^{-3}}{2 \times 2,32}}{0,067 \times 0,300 + 0,08 \times 0,165 + \frac{11,6 \times 10^{-3}}{2,32}} \right]$$

$$X = 6,844 \text{ mm}$$

$$L - X = 11,6 - 6,844$$

$$L - X = 4,856 \text{ mm}$$

IV.2.2.4. Calcul du flux thermique :

$$i = \frac{p_1}{p_3} = \frac{(L - x) \times S_{e2}}{X \times S_{i2}}$$

$$i = \frac{4,856 \times 0,197}{6,844 \times 0,156}$$

$$i = 0,89$$

i : flux thermique.

P_1, P_3 : flux thermique traversant respectivement S_{e2}, S_{i2} .

• Le flux thermique traversant S_{i2} :

$$p_3 = \frac{P_{cc2}}{3 \times (i + 1)} [W]$$

$$p_3 = \frac{1022,47}{3 \times (0,89 + 1)}$$

$$p_3 = 180,33 \text{ W}$$

• Le flux thermique traversant S_{e2} :

$$p_1 = \frac{P_{cc1}}{3 \times \left(\frac{1}{i} + 1\right)} [W]$$

$$p_1 = \frac{1200,33}{3 \times \left(\frac{1}{0,89} + 1 \right)}$$

$$p_1 = 188,4W$$

IV.2.2.5. Calcul des résistances internes :

$$R_{i1} = \frac{1}{2} \times \frac{(L - X)}{\lambda_{res} \times S_{e2}} [^{\circ}C / W]$$

$$R_{i1} = \frac{1}{2} \times \frac{4,856 \times 10^{-3}}{2,32 \times 0,197}$$

$$R_{i1} = 5,312 \times 10^{-3} c^{\circ} / W$$

$$R_{i3} = \frac{1}{2} \times \frac{X}{\lambda_{res} \times S_{i2}} [^{\circ}C / W]$$

$$R_{i3} = \frac{1}{2} \times \frac{6,844 \times 10^{-3}}{2,32 \times 0,165}$$

$$R_{i3} = 8,94 \times 10^{-3} c^{\circ} / W$$

IV.2.2.6. Calcul de la température maximale de l'enroulement HT

$$\theta_m = P_1 \times (R_1 + R_{i1}) \quad (\text{À l'extérieur de la bobine}).$$

$$\theta_m = 188,4 \times (0,067 + 5,312 \times 10^{-3})$$

$$\theta_m = 13,63^{\circ}C$$

$$\theta'_m = P_3 \times (R_3 + R_{i3}) \quad (\text{à l'intérieur de la bobine}).$$

$$\theta'_m = 180,33 \times (0,08 + 8,94 \times 10^{-3})$$

$$\theta'_m = 16,04^{\circ}C$$

IV.2.2.7. Calcul des températures superficielles de l'enroulement :

$$\theta_1 = P_1 \times R_{i1} [^{\circ}C]$$

$$\theta_1 = 188,4 \times 5,312 \times 10^{-3}$$

$$\theta_1 = 1,007^{\circ}C$$

$$\theta_3 = P_3 \times R_{i3} [^{\circ}C]$$

$$\theta_3 = 180,33 \times 8,94 \times 10^{-3}$$

$$\theta_3 = 1,612^{\circ}C$$

Finalement la température moyenne de l'enroulement BT par rapport à l'huile est :

$$\theta_{m2/H} = \theta_{\max} - \frac{i \times \theta_1 + \theta_3}{3 \times (i + 1)}$$

Avec θ_{\max} : température supérieur de (θ'_m, θ_m)

$$\theta_{m2/H} = 16,04 - \frac{0,89 \times 1,007 + 1,612}{3 \times (0,89 + 1)}$$

$$\theta_{m2/H} = 15,6^{\circ}C$$

IV.2.3. Echauffement de l'enroulement primaire par rapport à l'huile.**IV.2.3.1. Calcul de la conductivité de l'enroulement HT :**

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_v \times a_1}{(2 \times L_i + d_i) \times (m_c - 1)} [^{\circ}C / W]$$

Avec : λ_v 0,17 [W / m[°]C] ; conductivité thermique de vernis.

$(2 \times L_i + d_i)$: Épaisseur de l'isolation.

d_i : Épaisseur de l'isolation entre couches.

$$\lambda_{res} = \frac{0,17 \times 14,438}{(0,5 + 0,2) \times (11 - 1)}$$

$$\lambda_{res} = 0,350^{\circ}C / W$$

IV.2.3.2. Calcul des résistances thermique de l'isolation périphérique :

- **Coté intérieur de la bobine HT**

$$R_3 = \frac{1}{S_{ilH}} \times \left[\frac{L_i + d_i}{\lambda_v} + \frac{1}{\alpha_{con}} \right] [^{\circ}C / W]$$

$$R_3 = \frac{1}{0,223} \times \left[\frac{(0,25 + 0,2) \times 10^{-3}}{0,17} + \frac{1}{100} \right]$$

$$R_3 = 0,0567^{\circ}C / W$$

- **Coté extérieur de la bobine HT :**

$$R_1 = \frac{1}{S_{elH}} \times \left[\frac{L_i + d_i}{\lambda_v} + \frac{1}{\alpha_{con}} \right] [^{\circ}C / W]$$

$$R_1 = \frac{1}{0,300} \times \left[\frac{(0,25 + 0,2) \times 10^{-3}}{0,17} + \frac{1}{100} \right]$$

$$R_1 = 0,0421^{\circ}C / W$$

IV.2.3.3. Distance ou la température est maximale :

$$X = a_1 \times \left[\frac{R_1 \times S_{el} + \frac{a_1}{2 \times \lambda_{res}}}{R_1 \times S_{el} + R_3 \times S_{il} + \frac{a_1}{\lambda_{res}}} \right] [mm]$$

$$X = 14,438 \times 10^{-3} \times \left[\frac{0,0421 \times 0,300 + \frac{14,438 \times 10^{-3}}{2 \times 0,350}}{0,0421 \times 0,300 + 0,0567 \times 0,263 + \frac{14,438 \times 10^{-3}}{0,350}} \right]$$

$$X = 7,45mm$$

$$a_1 - X = 14,438 - 7,45$$

$$a_1 - X = 6,989mm$$

La figure IV.2. Illustre les distances ou la température est maximale.

IV.2.3.4. Calcul des flux thermiques :

$$i = \frac{P_1}{P_3} = \frac{(a_1 - X) \times S_{e1}}{X \times S_{i1}}$$

P_1, P_3 : sont les flux thermiques traversant respectivement S_{e1} et S_{i1} .

$$i = \frac{6,989 \times 0,300}{7,45 \times 0,263}$$

$$i = 1,07$$

- **Le flux thermique traversant S_{e1} :**

$$P_1 = \frac{P_{cc1}}{3 \times \left(1 + \frac{1}{i}\right)} [W]$$

$$P_1 = \frac{1200,33}{3 \times \left(1 + \frac{1}{1,07}\right)}$$

$$P_1 = 206,82W$$

- **Le flux thermique traversant S_{i1} :**

$$P_3 = \frac{P_{cc1}}{3 \times (1+i)} [W]$$

$$P_3 = \frac{1200,33}{3 \times (1,07+1)}$$

$$P_3 = 193,3W$$

IV.2.3.5. Calcul des résistances :

$$R_{i1} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{a_1 - X}{\lambda_{res} \times S_{e1}} \right] [^{\circ}C / W]$$

$$R_{i1} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{(6,989) \times 10^{-3}}{0,350 \times 0,300} \right]$$

$$R_{i1} = 0,033^{\circ}C / W$$

$$R_{i3} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{X}{\lambda_{res} \times S_{el}} \right] [^{\circ}C/W]$$

$$R_{i3} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{7,45 \times 10^{-3}}{0,350 \times 0,300} \right]$$

$$R_{i3} = 0,0354^{\circ}C/W$$

IV.2.3.6. Calcul des températures maximales de l'enroulement HT :

$$\theta_m = P_1 \times (R_1 + R_{i1}) [^{\circ}C]$$

$$\theta_m = 206,82 \times (0,0421 + 0,033)$$

$$\theta_m = 15,53^{\circ}C$$

$$\theta'_m = P_3 \times (R_3 + R_{i3}) [^{\circ}C]$$

$$\theta'_m = 193,3 \times (0,0567 + 0,0354)$$

$$\theta'_m = 17,82^{\circ}C$$

$$\theta_{\max} = 17,82^{\circ}C$$

IV.2.3.7. Calcul des températures superficielles des enroulements :

$$\theta_1 = P_1 \times R_{i1} [^{\circ}C]$$

$$\theta_1 = 206,82 \times 0,033$$

$$\theta_1 = 6,82^{\circ}C$$

$$\theta_3 = P_3 \times R_{i3} [^{\circ}C]$$

$$\theta_3 = 193,3 \times 0,0354$$

$$\theta_3 = 6,85^{\circ}C$$

Donc la température moyenne de l'enroulement primaire par rapport à l'huile est :

$$\theta_{m/H} = \theta_{\max} - \frac{i \times \theta_1 + \theta_3}{3 \times (i+1)} [^{\circ}\text{C}]$$

$$\theta_{m/H} = 17,82 - \frac{1,07 \times 6,82 + 6,85}{3 \times (1,07 + 1)}$$

$$\theta_{m/H} = 15,89^{\circ}\text{C}$$

1 Enroulement BT

2 S_{e1}

3 S_{i1}

4 Enroulement HT

5 Canal

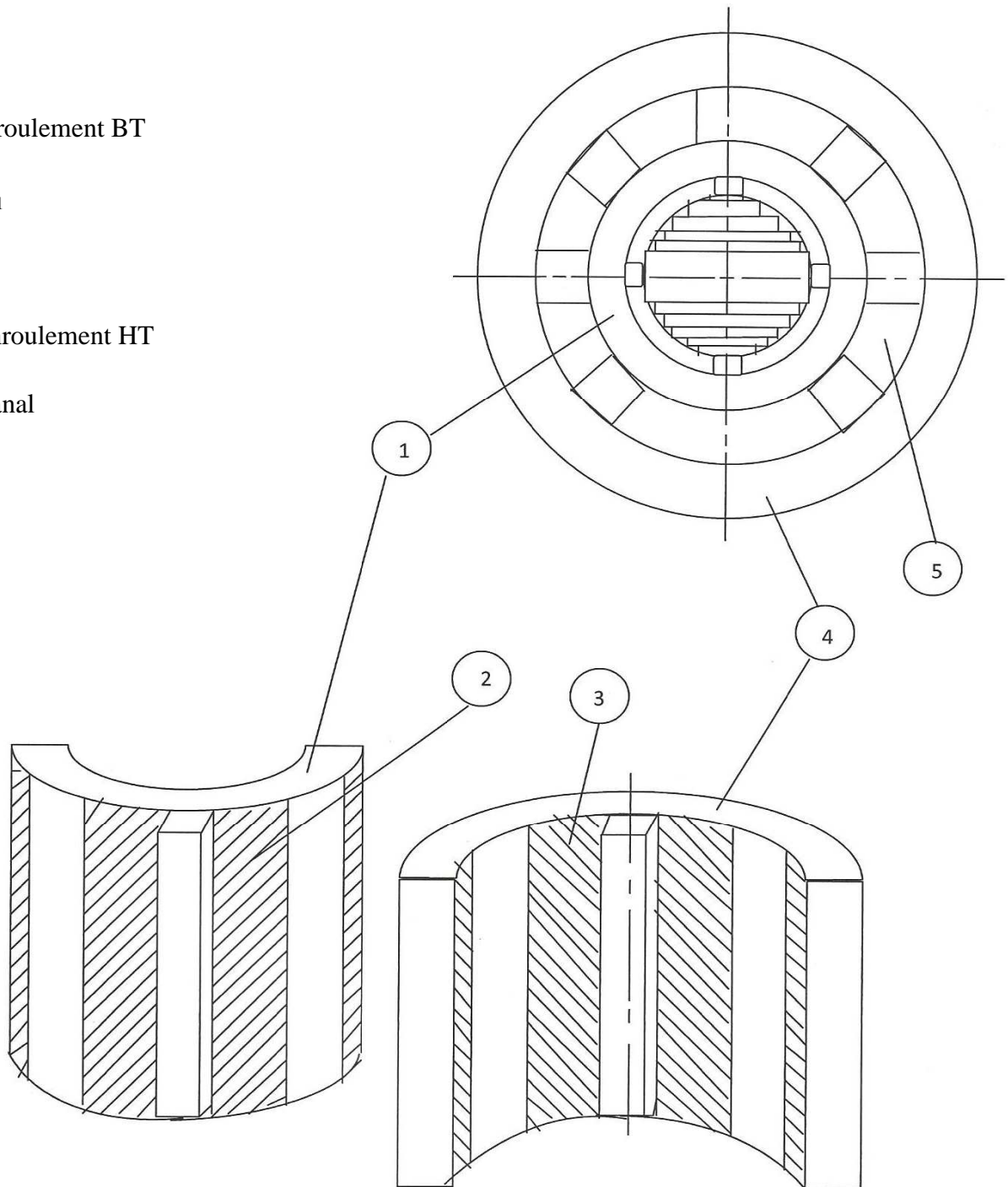
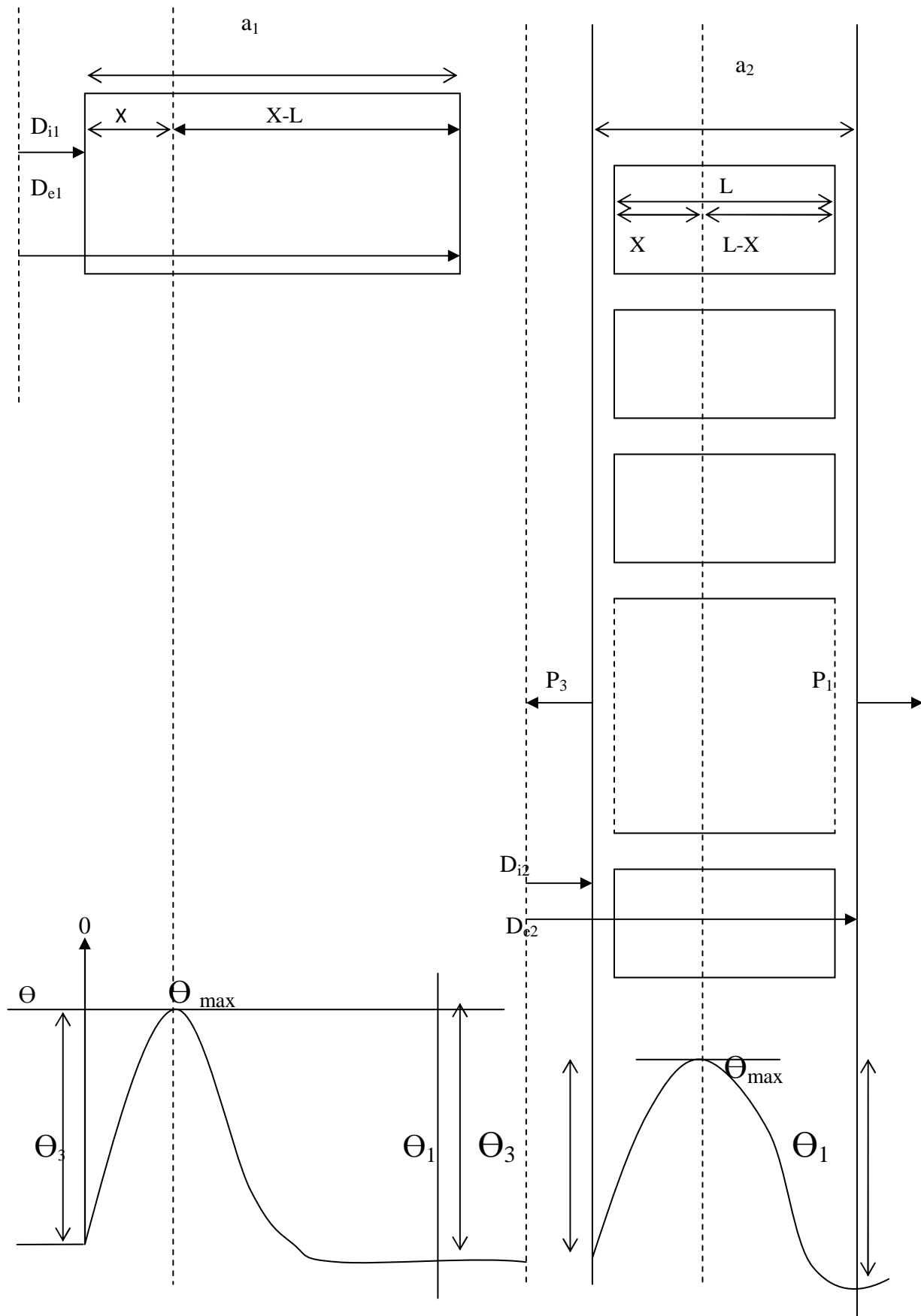


Fig. IV.1. Présentation des enroulements

Fig. IV Transmission de la chaleur dans un Enroulement



Introduction :

Le dimensionnement d'une installation électrique et, la détermination des protections des personnes et des biens nécessite le calcul des courants de court-circuit en tout point du réseau. Notre travail fait le point sur les méthodes de calcul de courant de court-circuit prévues par les normes UTE 15-105 et CEI 909-781. Il traite le cas des circuits radiaux BT « Basse Tension » et HT « Haut Tension ».

L'objectif poursuivi est de bien faire connaître les méthodes de calcul pour déterminer en toute connaissance de cause les courants de court-circuit, même en cas d'utilisation des moyennes informatiques.

V.1.Comment se produit un court-circuit ?

Le court-circuit est un contact non volontaire entre deux conducteurs. Ce contact se fait directement sans traverser l'ensemble du circuit. Il provoque l'augmentation de la température des conducteurs mais aussi le développement de l'intensité du courant. Sans coupe-circuit, le courant de court-circuit (aussi appelé courant de défaut) peut entraîner la destruction de l'ensemble du système d'alimentation.

Le disjoncteur ou le fusible peut pallier ce risque. La plupart des courts-circuits proviennent d'un mauvais branchement, d'un mauvais contact ou d'une mauvaise isolation des fils. La vigilance est indispensable pour éviter tous les risques.

Le court-circuit le plus dangereux est celui dont l'origine est due à des mauvais contacts souvent issus de bornes de raccordement mal serrées.

V.2.Les principaux défauts de court-circuit :

Dans les installations électriques, des différents courts-circuits peuvent se produire.

V.2.1.Types de court-circuit

Sur un réseau triphasé, les courts-circuits peuvent être de plusieurs types :

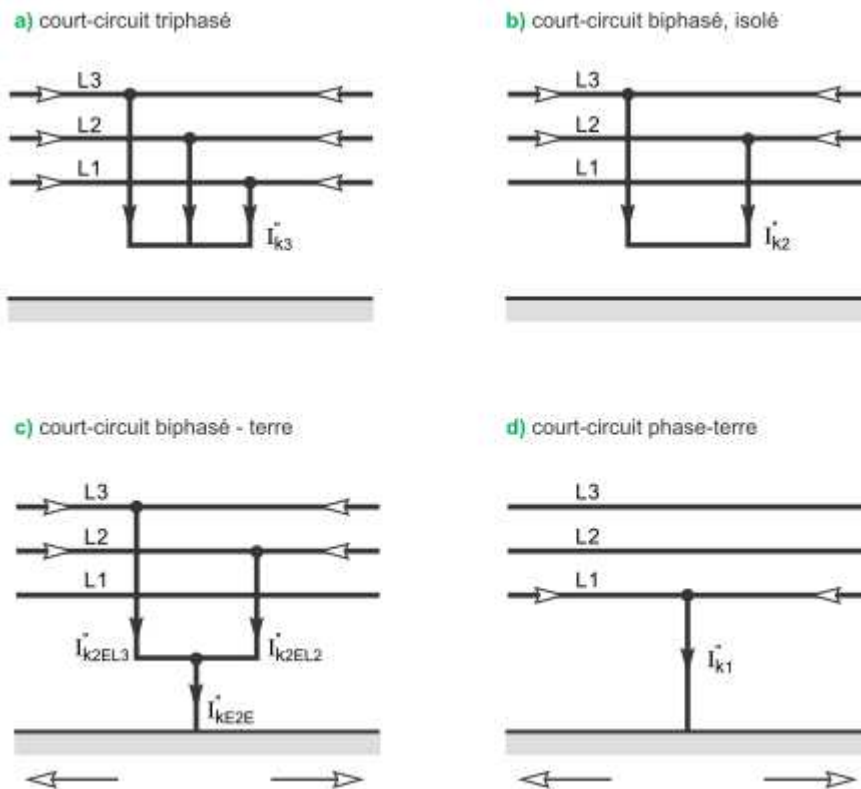
- défaut triphasé : les trois phases sont réunies ensemble (5 % des cas) ;
- défaut biphasé : deux phases sont raccordées ensemble (15 % des cas).

On distingue entre défaut biphasé/terre et biphasé isolé. Les défauts biphasés isolés sont fréquemment causés par un vent violent qui fait se toucher les conducteurs de deux phases sur une ligne à haute tension ;

- défaut monophasé : une phase est reliée au neutre ou à la terre (80 % des cas).

Sur une ligne à haute tension, ce type de défaut est fréquemment causé par la foudre qui initie un court-circuit entre une phase et la terre.

Ces différents courants de court-circuit sont présents sur la figure V-1.



← Courant de court-circuit.

↔ Courant de court-circuit partiel dans les conducteurs et la terre.

Pour les calculs ces différents courants ($I_{K''}$) sont distingués par des indices.

- Court-circuit triphasé symétrique.
- Court-circuit entre phases, isolé.
- Court-circuit entre phase, avec mise à la terre.
- Court-circuit phase-terre.

Fig.V.1 : les différents courts-circuits et leurs courants. Le sens des flèches figurant les courants est arbitraire (cf. CEI 60909).

V.2.2. Caractéristiques de courts-circuits :

Ils sont principalement caractérisés par :

- leurs durées : auto-extinctrices, fugitif ou permanent ;
- leurs origines ;
 - mécaniques (rupture de conducteur, liaison électrique accidentelle entre deux conducteurs par un corps étranger conducteur tel que outils ou animaux).
 - Surtension électrique d'origine interne ou atmosphérique,
 - Ou à la suite d'une dégradation de l'isolement, consécutive à la chaleur, l'humidité ou une ambiance corrosive ;
- Leurs localisations : interne ou externe à une machine ou à un tableau électrique.

V.2.3. Normes et calculs des I_{cc} : [11]

Plusieurs méthodes sont proposées par les normes.

a) Le guide pratique **C 15-105**, qui complète la **NF C 15-100** (installations BT alimentées en courant alternatif), présente les quatre méthodes suivantes :

1) Celle des « **impédances** », qui permet de calculer les courants de défaut en tout point d'une installation avec une bonne précision.

Elle consiste à totaliser séparément les différentes résistances et réactances de la boucle de défaut, depuis et y compris la source, jusqu'au point considéré ; puis à calculer l'impédance correspondante. Le courant de court-circuit est enfin obtenu par l'application de la loi d'Ohm :

Toutes les caractéristiques des différents éléments de la boucle de défaut doivent être connues (sources et canalisations) ;

2) Celle de « **composition** » utilisable quand les caractéristiques de l'alimentation ne sont pas connues.

L'impédance amont du circuit considéré est calculée à partir de l'estimation du courant de court-circuit à son origine.

Le facteur de puissance $\cos \theta \approx R / X$ est considéré comme identique à l'origine du circuit comme au point du défaut. En d'autres termes cela consiste à admettre que les impédances élémentaires de deux tronçons successifs de l'installation possèdent des arguments suffisamment voisins pour justifier le remplacement des additions vectorielles par des additions algébriques des impédances.

Cette approximation permet d'obtenir la valeur du module des courants de court-circuit, avec une précision suffisante.

3) Celle dite « **conventionnelle** » qui permet sans connaître les impédances ou les courants de court-circuit de la partie d'installation en amont du circuit considéré, de calculer les courants de court-circuit minimaux et les courants de défaut à l'extrémité d'une canalisation.

Elle est basée sur l'hypothèse que la tension à l'origine du circuit est égale à 80 % de la tension nominale de l'installation pendant la durée du court-circuit ou du défaut.

L'influence de la réactance des conducteurs est négligée pour les sections inférieures à 150 mm².

Il est tenu compte de l'influence des réactances des conducteurs pour les fortes sections en augmentant la résistance de 15 % pour la section de 150 mm², 20 % pour la section de 185 mm², 25 % pour 240 mm², et 30 % pour 300 mm².

Cette méthode est essentiellement utilisée pour les circuits terminaux dont l'origine est suffisamment éloignée de la source d'alimentation.

Elle n'est pas applicable dans les installations alimentées par un alternateur.

4) Celle dite <**simplifiée**>, qui par l'exploitation de tableaux établis avec de nombreuses hypothèses simplificatrices, donne directement pour chaque section de conducteur :

- le courant assigné du dispositif assurant sa protection contre les surcharges,
- les longueurs maximales de canalisations protégées contre les contacts indirects,
- les longueurs admissibles du point de vue des chutes de tension.

Ces tableaux présentent en fait des résultats de calculs essentiellement effectués par les deux méthodes, de composition et conventionnelle.

Elle permet de déterminer les caractéristiques d'un circuit ajouté à une installation existante dont les caractéristiques ne sont pas suffisamment connues.

Elle s'applique directement aux installations BT, et avec des coefficients correcteurs si la tension est différente de 230/400 V.

b) La norme **CEI 909** s'applique à tous les réseaux, radiaux et maillés, jusqu'à 550 kV. Basée sur le théorème de THEVENIN, elle consiste à calculer une source de tension équivalente au point de court-circuit pour ensuite déterminer le courant en ce même point.

Toutes les alimentations du réseau et les machines synchrones et asynchrones sont remplacées par leurs impédances (directe, inverse et homopolaire).

avec cette méthode, toutes les capacités de ligne et les admittances en parallèle des charges non tournantes, sauf celles du système homopolaire, sont négligées.

D'autres méthodes existent, elles exploitent le principe de superposition et nécessitent un calcul préalable du courant de charge.

c) la norme **CEI 865** qui conduit au calcul du courant de court-circuit thermiquement équivalent.

V.3. Les méthodes présentées dans ce Cahier Technique :

Dans ce Cahier Technique deux méthodes sont particulièrement étudiées pour le calcul des courants de court-circuit:

- il s'agit de la méthode des impédances.

Elle a été retenue pour la précision qu'elle permet d'obtenir et pour son aspect didactique puisqu'elle nécessite la prise en compte de la quasi-totalité des caractéristiques du circuit concerné.

- l'autre, surtout utilisée en HT, est celle de la CEI 909, retenue pour sa précision et pour son aspect analytique.

Plus technique elle exploite le principe des composantes symétriques.

V.4. Les hypothèses de base

Pour ces calculs de courants de court-circuit, des hypothèses précisant le domaine de validité des formules données sont nécessaires. Souvent simplificatrices et accompagnées d'approximations justifiées, ces hypothèses rendent plus aisée la compréhension des phénomènes physiques et ainsi le calcul des courants de court-circuit, tout en gardant une précision acceptable et par excès.

Les hypothèses retenues dans ce document sont :

- pendant la durée du court-circuit, le nombre de phases concernées n'est pas modifié; un défaut triphasé reste triphasé.
- pendant toute la durée du court-circuit, les tensions qui ont provoqué la circulation du courant et l'impédance de court-circuit ne changent pas de façon significative ;
- les régleurs ou changeurs de prises des transformateurs sont supposés être en position moyenne (dans le cas d'un court-circuit éloigné des alternateurs, on peut ignorer les positions réelles des changeurs de prises des transformateurs) ;

V.5. Calcul des Icc par la méthode des impédances

V.5.1. Icc selon les différents types de court-circuit [10]

a) Court-circuit triphasé

C'est le défaut qui correspond à la réunion des trois phases. L'intensité de courant de court-circuit triphasé est : $\left(I_{cc_3} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{cc}} \right)$, avec U (tension composée entre phases) correspondant à la tension à vide du transformateur, laquelle est supérieure de 3 à 5 % à la tension aux bornes en charge.

Par exemple, dans les réseaux 400 V, la tension composée adoptée est $U = 420$ V, avec comme tension simple $U / \sqrt{3} = 243$ V .

Le calcul de l'intensité de court-circuit se résume alors au calcul de l'impédance Z_{cc} , impédance équivalente à toutes les impédances parcourues par le courant de court-circuit du générateur jusqu'au point de défaut

- de la source et des lignes - (cf. **fig. 2**). C'est en fait l'impédance «directe» par phase :

$$Z_{CC} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X)^2}$$

$\sum R$ = somme des résistances en série,

$\sum X$ = somme des réactances en série.

Le défaut triphasé est généralement considéré comme celui provoquant les courants de défaut les plus élevés. En effet, le courant de défaut dans le schéma équivalent d'un système polyphasé, n'est limité que par l'impédance d'une phase sous la tension simple du réseau.

Le calcul de courant de court-circuit triphasé est donc indispensable pour choisir les matériels (intensités et contraintes électrodynamiques maximales à supporter).

b) Court-circuit biphasé isolé :

Il correspond à un défaut entre deux phases, alimenté sous une tension composée U.

L'intensité de courant de court-circuit biphasé débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé :

$$I_{cc2} = \frac{U}{2 \times Z_{cc}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{cc3} = 0,86 \times I_{cc3}$$

Dans le cas d'un défaut proche des machines tournantes, les impédances de celles-ci sont telles que le courant de court-circuit biphasé est proche de courant de court-circuit triphasé.

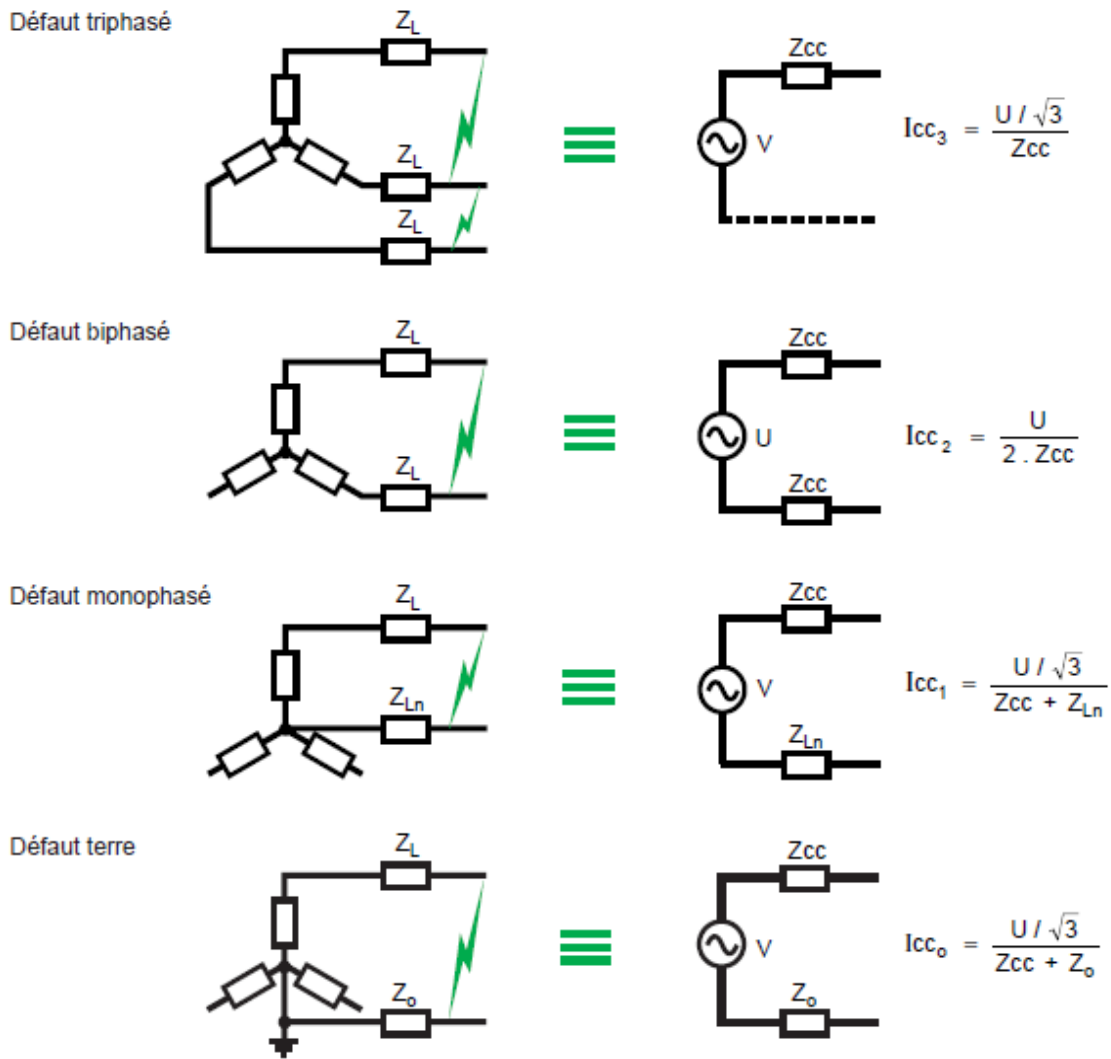


Tableau récapitulatif des différents courants de court-circuit (fig. V.2).

C) Court-circuit monophasé isolé :

Il correspond à un défaut entre une phase et le neutre, alimenté sous une tension simple

$$V = U / \sqrt{3} .$$

L'intensité de courant de court-circuit débitée est alors :

$$I_{CCI} = \frac{U / \sqrt{3}}{Z_{CC} + Z_{Ln}}$$

Dans certains cas particuliers de défaut monophasé l'impédance homopolaire de la source est plus faible que Z_{cc} (par exemple aux bornes d'un transformateur à couplage étoile-zig-zag ou d'un alternateur en régime subtransitoire).

L'intensité monophasée peut être alors plus élevée que celle du défaut triphasé.

d) Court-circuit à la terre (monophasé ou biphasé) :

Ce type de défaut fait intervenir l'impédance homopolaire Z_0 .

Sauf en présence de machines tournantes où l'impédance homopolaire se trouve réduite, l'intensité I_{cc0} débitée est alors inférieure à celle du défaut triphasé.

Son calcul peut être nécessaire, selon le régime du neutre (schéma de liaison à la terre), pour le choix des seuils de réglage des dispositifs de protection homopolaire (HT) ou différentielle (BT).

V.5.2. Détermination d'impédances interne du transformateur:

❖ l'impédance se calcule à partir de la tension de court-circuit U_{CC} exprimée en %.

$$Z_T = \frac{U_{CC}}{100} \times \frac{U^2}{S_n}$$

Avec :

U : tension composée à vide du transformateur,

S_n : puissance apparente du transformateur.

$U \times \frac{U_{CC}}{100}$ = tension qu'il faut appliquer au primaire du transformateur pour que le secondaire soit

parcouru par l'intensité nominale I_n , les bornes secondaires BT étant court-circuitées.

Pour les transformateurs HTA / BT de distribution publique des valeurs de U_{CC} sont fixées par **CEI**. (Tableau.V.1)

puissance du transformateur HTA/BT	≤360	800	1000	1250	1600	2000
Tension de court-circuit U_{CC} (%)	4	4,5	5	5,5	6	7

Fig. tension de court-circuit U_{CC} normalisée pour les transformateur HTA/BT de distribution publique.

A ce sujet il faut noter que la précision de ces valeurs influe immédiatement sur le calcul de I_{cc} puisque une erreur de x % sur U_{CC} induit une erreur du même ordre (x %) sur Z_T .

❖ En général $R_T \ll X_T$, de l'ordre de $0,2 X_T$, et l'impédance interne des transformateurs peut être assimilée à la réactance X_T .

Cependant pour les petites puissances le calcul de Z_T est nécessaire car le rapport R_T / X_T est plus élevé.

Cette résistance se calcule alors à partir des pertes joules (W) dans les enroulements :

$$W = 3 \times R_T \times I_n^2 \Rightarrow R_T = \frac{W}{3 \times I_n^2}$$

❖ lorsque n transformateurs sont en parallèle et de puissances identiques, leurs valeurs d'impédance interne ainsi que de résistance ou de réactance sont à diviser par n.

V.6. Calcul d'I_{cc} dans les réseaux radiaux à l'aide des composantes symétriques [11] :

v.6.1. Courants calculés suivant la norme CEI 60909 :

a) Courant de court-circuit symétrique initial :

C'est la valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit lors de l'apparition du courant de défaut. Lorsque le défaut est proche des générateurs, étant un courant dans le domaine temporelle subtransitoire, il est aussi appelé simplement courant de court circuit subtransitoire ou initial. Lorsque le défaut est loin des générateurs, ce courant est le même que le courant de court-circuit permanent car les phénomènes subtransitoires sont négligeables.

b) Crête du courant de court-circuit :

La valeur de crête I_p de courant de court-circuit, dans le réseau non maillés, peut être calculée, quelque soit la nature de défaut, à partir de la formule approchée suivant : $I_p = k \times \sqrt{2} \times I_K''$

I_K'' : Courant de court-circuit initial.

K : facteur fonction des rapports $\left(\frac{R}{X}\right)$ défini sur les abaques de la figure 9, ou calculé par la

formule approchée suivante : $k = 1,02 + 0,98 \times e^{-3 \times \frac{R}{X}}$.

c) Courant de court-circuit coupé :

Le courant de court-circuit coupé est le courant que devra couper le disjoncteur. C'est la valeur du courant de court-circuit au moment de la coupure. Sa valeur est linéaire avec le courant de court-circuit initial (ou subtransitoire) $I_b = \mu \times I_k''$,

Le coefficient μ dépend des caractéristiques du générateur ainsi que du temps minimal pour que le disjoncteur agisse. Sa valeur peut être trouvée grâce à des abaques et aux formules de la norme CEI 60909. Pour un défaut loin du générateur, $\mu = 1$ car il n'y a pas d'effet transitoire symétrique.

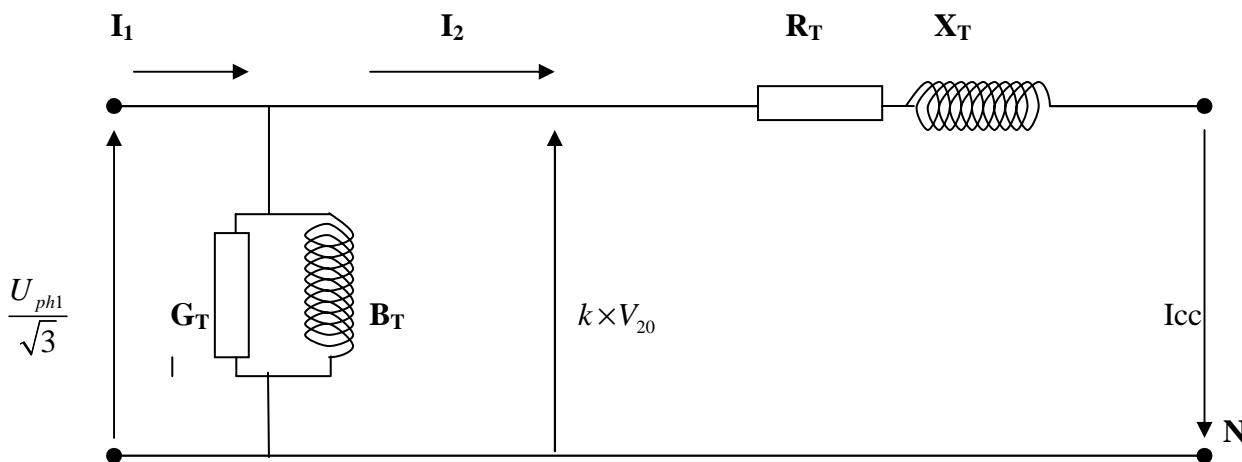
d) Courant de court-circuit permanent :

C'est la valeur efficace du courant de court-circuit en régime permanent lorsque les phénomènes subtransitoires et transitoires sont négligeables. Comme on se situe dans le régime permanent, sa valeur se trouve en appliquant la loi d'ohm avec les valeurs usuelles du régime permanent pour les résistances et les réactances du système et avec une impédance nulle pour le défaut si le court-circuit est franc ou non nulle pour un court-circuit impédant. Le temps afin d'arriver au régime permanent après un court-circuit dépend des caractéristiques du générateur pour un court-circuit proche du générateur ou de la valeur instantanée de la tension pour un court-circuit loin d'un générateur

V.7. Calcul de courant de court-circuit dans un transformateur avec la méthode des impédances :

Considérons le calcul des paramètres du schéma équivalent des transformateurs à 2 enroulements ;

Schéma équivalent du transformateur à 2 enroulements [12]:



Les paramètres du schéma équivalent sont 4 ; G_T , R_T , B_T , X_T .

Considérons les calculs de ces paramètres :

Calcul de R_T : [12]

On calcule R_T ; la résistance de l'enroulement d'après les pertes de puissances de cet enroulement, dans le régime de CC :

$$\Delta P_{cc} = 3 I_n^2 R_T$$

- ΔP_{cc} : pertes de puissance dans le régime en CC

- I_n le courant normal
- R_T : résistance de l'enroulement

Exprimant le courant par la puissance et la tension : $I_n = \frac{Sn}{\sqrt{3}Un}$

$$\text{D'où } R_T = \frac{\Delta P_{cc}}{3I_n^2} = \frac{\Delta P_{cc}}{3 \left(\frac{Sn}{\sqrt{3}Un^2}\right)^2} = \frac{\Delta P_{cc} Un^2}{Sn^2}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{cc} Un^2}{Sn^2} = \frac{2340 \times (400)^2}{(100 \times 10^3)^2}$$

$$R_T = 61,5 \times 10^{-3} \Omega$$

Calcul de X_T : [13]

On calcule X_T d'après l'expression de la chute de tension réductive

$$U_r = \sqrt{3} I_n X_T$$

$$U_r = \sqrt{3} \times I_n \times X_T \Rightarrow 100 \times \frac{U_r}{Un} = \frac{\sqrt{3} \times I_n \times X_T}{Un} \times 100\%$$

D'habitude;

$$X_T \gg R_T \Rightarrow U_r \gg U_a \quad \left(\begin{array}{l} U_r : \text{chute de tension sur X} \\ U_a : \text{chute de tension sur R} \end{array} \right)$$

Dans le régime en CC, on a $U_{cc} = \sqrt{U_a^2 + U_r^2} = U_r$

$$U_{cc} [\%] = \frac{\sqrt{3} \times \frac{Sn}{\sqrt{3} \times Un} \times X_T}{Un} \times 100$$

$$\text{D'où : } X_T = \frac{U_{cc} \times Un^2}{100 \times Sn}$$

$$X_T = \frac{3,843 \times (400)^2}{100 \times 10^5}$$

$$X_T = 0,0615$$

Calcul de G_T : [13]

Dans le régime à vide les pertes de puissance du transformateur et les pertes dans le noyau sont données par :

$$P_0 = Un^2 \times G_T \Rightarrow G_T = \frac{\Delta P_0}{Un^2}$$

$$G_T = \frac{3 \times 380}{(30 \times 10^3)^2}$$

$$G_T = 12,66 \times 10^{-7} W$$

P_0 : Pertes de puissance dans le régime à vide.

G_T : conductibilité réactive

Calcul de B_T : [13]

$$Q_0 = Un^2 \times B_T$$

Q_0 : Pertes de puissance réactive

$$Q_0 = \frac{I_0}{100} \times Sn \Rightarrow Un^2 \times B_T = \frac{I_0 \times Sn}{100}$$

$$D'où : B_T = \frac{I_0 \times Sn}{Un^2 \times 100}$$

$$B_T = \frac{3 \times 4,4 \times (100 \times 10^3)}{100 \times (30 \times 10^3)^2}$$

$$B_T = 14,66 \times 10^{-6} \Omega$$

I_0 : courant dans le régime à vide

G_T, B_T sont négligeable devant R_T et X_T .

Calcul de l'impédance de transformateur : [13]

$$Z_T = \sqrt{(R_T)^2 + (X_T)^2}$$

$$Z_T = \sqrt{(61,5 \times 10^{-3})^2 + (141,522 \times 10^{-3})^2}$$

$$Z_T = 0,154 \Omega$$

La tension simple à vide au secondaire :

$$V_{20} = \frac{U_{ph1} \times k}{\sqrt{3}}$$

$$V_{20} = \frac{30 \times 10^3 \times 0,013}{\sqrt{3}} = 225,16V$$

Le courant de court circuit au secondaire :

$$I_{cc2} = \frac{V_{20}}{Z_T}$$

$$I_{cc2} = \frac{225,16}{0,154} = 1462,078 A$$

$$I_{cc2} = 1462,078 A$$

Calcul de rapport de transformation :

$$k = \frac{U_{PH2}}{U_{PH1}} = \frac{I_{PH1}}{I_{PH2}} = \frac{1,92}{144,32} = 0,013$$

Le courant de court circuit au primaire :

$$I_{cc1} = k \times I_{cc2} = 0,013 \times 1462,078$$

$$I_{cc1} = 19,00 A$$

[Ce courant de court-circuit a une valeur plus élevée presque 10 fois le courant nominal ce que va engendrer des conséquences fatales sur le transformateur]

V.8. Conséquences des défauts de court-circuit :

Elles sont variables selon la nature et la durée des défauts, le point concerné de l'installation et l'intensité de courant :

- au point de défaut, engendre un arc, avec :
 - Détérioration des isolants,
 - Fusion des conducteurs,
 - Incendie et danger pour les personnes ;
- Pour le circuit défectueux :
 - Les efforts électrodynamiques, avec
 - Déformation des JdB (jeux de barres).
 - Arrachement des câbles ;
 - Sur échauffement par augmentation des pertes joules, avec risque de détérioration des isolants ;
- Pour les autres circuits électriques du réseau concerné ou des réseaux situés à proximité :
 - Les creux de tension pendant la durée d'élimination du défaut, quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes,

- La mise hors service d'une plus ou moins grande partie du réseau suivant son schéma et la sélectivité de ses protections,
- L'instabilité dynamique et/ou la perte de synchronisme des machines,
- Les perturbations dans les circuits de contrôle commande,

V.9. Protection contre les courants de court-circuit :

V.9.1. Un disjoncteur :

a) Définition :

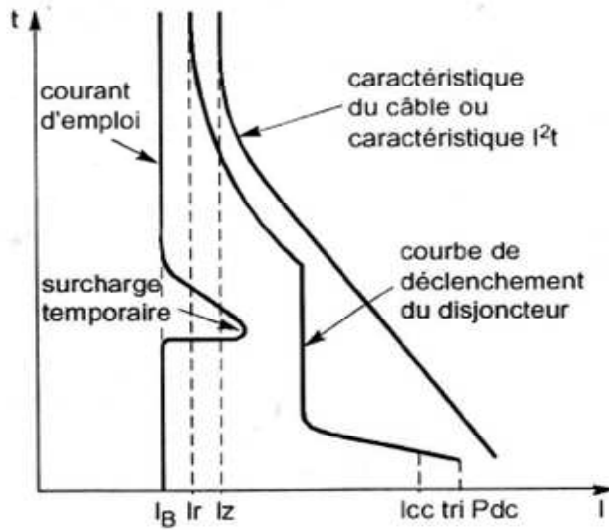
C'est un dispositif électromécanique, de protection dont la fonction est d'interrompre le courant électrique en cas d'incident sur un circuit électrique. Il est capable d'interrompre un courant de surcharge ou un courant de court-circuit dans une installation. Suivant sa conception, il peut surveiller un ou plusieurs paramètres d'une ligne électrique.

b). Composants

1. manette servant à couper ou à réarmer le disjoncteur manuellement. Elle indique également l'état du disjoncteur (ouvert ou fermé). La plupart des disjoncteurs sont conçus pour pouvoir disjoncter même si la manette est maintenue manuellement en position fermée ;
2. mécanisme lié à la manette, sépare ou approche les contacts ;
3. contacts permettant au courant de passer lorsqu'ils se touchent ;
4. connecteurs ;
5. bilame (2 lames soudées à coefficients de dilatation différents) : relais thermique (protection contre les surcharges) ;
6. vis de calibration, permet au fabricant d'ajuster la consigne de courant avec précision après assemblage ;
7. bobine ou solénoïde : relais magnétique (protection contre les courts-circuits) ; chambre de coupure de l'arc électrique.

d). Utilisation :

Ces modèles sont destinés à remplacer les fusibles gG (notamment utilisés en domestique), en offrant l'avantage d'être réarmables (une manette à actionner, aucune cartouche à remplacer) et en cumulant dans un même boîtier une détection thermique contre les surcharges prolongées et magnétique contre les augmentations rapides de courant.



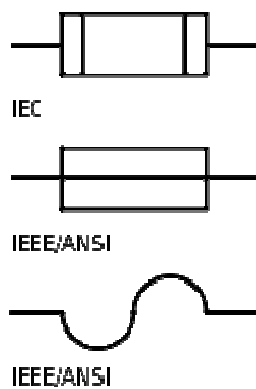
(fig.V.4) protection d'un circuit par disjoncteur.

V.9.2.Fusible :

a).Définition :

C'est un organe de sécurité dont le rôle est d'ouvrir un circuit électrique lorsque le courant électrique dans celui-ci atteint une valeur d'intensité dangereuse (ou plus généralement une valeur d'intensité donnée) pendant un temps déterminé, ramenant ainsi l'intensité de ce courant à zéro.

b).Symboles du fusible

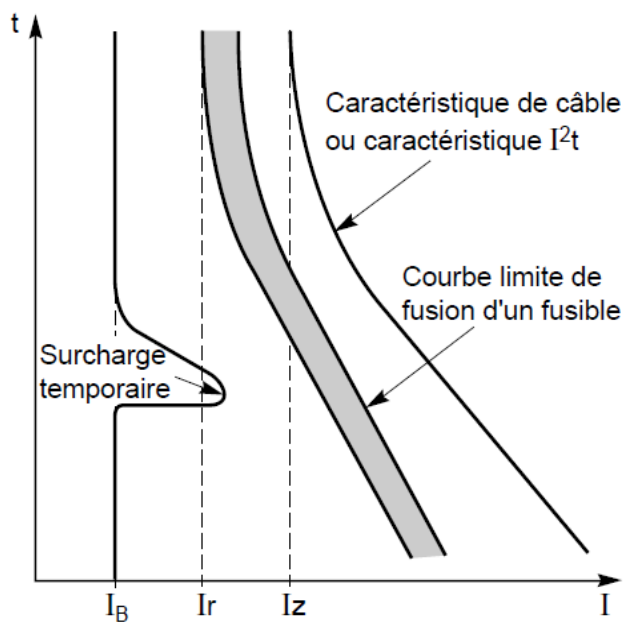


(fig.V.6) Symboles du fusible

c).Utilisation :

Le courant demandé par la charge traverse entièrement le fusible. Lorsque ce courant dépasse le calibre, à savoir une valeur spécifique pendant un temps précis, la partie conductrice du

fusible fond et ouvre le circuit. Certains modèles sont munis d'un témoin mécanique indiquant que le fusible a fondu.



(fig.V.7) Protection d'un circuit par fusible aM.

Notre transformateur à un courant nominal de $I_{n2} = 144,32A$, ce dernier doit être protégé par un fusible 210 A et un disjoncteur de 200A qui à un courant de coupure de 1500A.

Conclusion

Pour le calcul du courant de court-circuit, différentes méthodes ont été développées et ont trouvé place dans les normes... et ainsi dans le Cahier Technique.

Plusieurs de ces méthodes normalisées ont été conçues de telle sorte que le courant de court-circuit puisse être calculé à la main ou à l'aide d'une calculatrice. La révision de ces normes a souvent conduit à faire évoluer ces méthodes pour les rendre plus précises et représentatives de la réalité mais a eu pour conséquence de les rendre moins pratiques, comme le montrent les évolutions récentes de la CEI 60909, réservant un calcul manuel aux cas les plus simples.

Avec le développement d'outils informatiques sans cesse plus performants, les concepteurs d'installations électriques ont conçu des logiciels pour leurs propres besoins. Ainsi de nombreux logiciels conformes aux normes sont disponibles, tel Ecodial en basse tension créé et commercialisé par Schneider Electric.

Tous ces logiciels de calcul des courants de court-circuit servent essentiellement à :

- déterminer des pouvoirs de coupure et de fermeture des appareils ainsi que les tenues électromécanique et thermique des équipements,
- calculer les réglages des relais de protection et les calibres des fusibles, afin d'assurer une bonne sélectivité dans le réseau électrique.

Enfin d'autres logiciels de calcul sont utilisés par les spécialistes concepteurs de réseaux, par exemple pour les études de comportement dynamique des réseaux électriques.

De tels logiciels permettent des simulations précises des phénomènes dans le temps, leur utilisation s'étend au comportement électromécanique complet des réseaux et des installations. Il n'en demeure pas moins vrai que tous les logiciels, bien que très performants, ne sont que des outils. Leur exploitation, pour être efficace, nécessite donc une compétence professionnelle d'expertise préalablement acquise par des études, un savoir-faire et une expérience.

Normes

➤ **CEI : commission électrotechnique internationale**

- CEI 60909 : Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif.
 - Partie 0 : Calcul des courants.
 - Partie 1 : Facteurs pour le calcul des courants de court-circuit.
 - Partie 2 : Matériel électrique - Données pour le calcul des courants de court-circuit.
 - Partie 3 : Courants durant deux court-circuit monophasés simultanés séparés à la terre et courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre.
 - Partie 4 : Exemples pour le calcul des courants de court-circuit.
- NF C 15-100 : Installations électriques à basse tension.
- UTE C 15-105 : Guide pratique. Détermination des sections de conducteurs et choix des dispositifs de protection.

Conclusion générale

L'élaboration de ce travail, nous a permis d'approfondir et d'enrichir nos connaissances dans le domaine de l'électrotechnique en général et de la technologie de fabrication des transformateurs en particulier.

L'exploitation réelle de transformateur au sien de l'entreprise Electro-Industrie d'AZAZGA ou nous avons eu l'honneur d'effectuer notre stage, nous a permis de prendre connaissance du processus de fabrication des transformateurs dans ces différentes étapes mais aussi de nous familiariser avec le milieu industriel.

Le cas que nous avons retenu est le dimensionnement d'un transformateur émergé dans l'huile, où l'ensemble des pertes (pertes fer et pertes joule) calculées sont inférieures à 5%. Les valeurs trouvées du rendement correspondent à celles recommandées pour la classe d'isolation A.

Ce travail nous a permis de cernés la majorité des problèmes rencontrés dans la construction des transformateurs, tels que le calcul des efforts électrodynamiques, du rendement, de l'isolation et du courant de court-circuit.

En fin, nous souhaitons vivement que ce modeste travail puisse servir d'orientation pour les promotions futures.

Bibliographie

- [1]- GUY SEGUIER et FRANCIS NOTELET, « Electrotechnique Industrielle », Edition LA VOISIER (2^{ème} Edition), 1982.
- [2]- THEODORE WILDI, GILBERT SYBILLE, « ÉLECTROTECHNIQUE », 4^{ème} Edition.2005
- [3]- JEAN CHATELAIN, « Machines Electriques », traite d'électricité, Edition GEORGI, suisse, 1982.
- [4]- A-KASSATKINE, «Electrotechnique élémentaire », Edition MIR MOSCOU, 1981.
- [5]- HENRI FOCH et YVON CHÉRON, technique d'ingénieur, D 3 167 – 2,« Convertisseurs de type forward »,1996.
- [6]- FRANCIS MILSANT, « Machine Electrique », Edition BERTI.
- [7]-M^{elle} BOUDJNAH NOUARA, M^{elle} AKEB OURIDA, « Calcul et réalisation d'un transformateur triphasé de distribution MT/BT immergé dans l'huile 50kVA/ 30kV/0,4kV »DEUA, UMMT, 2005.
- [8]-JEAN-LUC DIO « Électromagnétisme ; propagation, ligne électrique », Edition-Dion.
- [9]-M.ABDARAHMANI, S.BENNANE « Calcul d'un transformateur de distribution 500kVA/55kV/0.4kV », DUEA, UMMT, 1996.
- [10]-H.AGHBEICHE, F HAMANA, S.DAHMANE, « Etude d'un transformateur de distribution immergé dans l'huile MT/BT 50kVA/11kV/0,4kV », DEUA, UMMT, 2008.
- [11]- MERLIN GERIN, Cahier technique n° 158 « Calcul des courant de court-circuit ».
- [12]- MOFID ZADA, « cahier de cour », Électrotechnique, 4^{ème} année ING.
- [13]- HENRI FOCH, technique d'ingénieur D 3 164 – 2 « Alimentations à découpage ; le transformateur », 1996.

Le transformateur est une machine statique et constituée d'une partie active : les joints, les enroulements, les isolants, les diélectriques, et une partie constructive : La cuve, le cadre, le couvercle, conservateur de huile.

Le dimensionnement électromagnétique est essentielle :le diamètre de la colonne, la hauteur des bobines et le canal de fuite ,le calcul des pertes qui sont localisées essentiellement dans le fer est dans le cuivre ,une fraction de la puissance active passe sous la forme calorifique que nous avons fait par le calcul thermique ,

Le dimensionnement d'un transformateur émergé dans le huile ou l'ensemble des pertes (pertes fer et pertes joule) calculés sont inférieur à 5% . Les valeurs trouvées du rendement correspondant à celle recommandée par la classe d'isolation