

N° Ordre...../Faculté/UMBB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :**

MASTER 2

Présenté par

**AIDER Youcef
KHELIL Farouk Abdeldjalil**

Filière : **Génie Electrique**

Option : **Electricité industrielle**

Thème

**Les essais électriques d'un transformateur triphasé
630 KVA d'isolement type immergé dans l'huile**

Devant les jurys :

Mr. CHAIB Ahmed	Prof	FHC	Président
Mr. HAMADECHE Mohamed	MCB	FHC	Examineur
Mr. KESRAOUI Mohamed	Prof	FHC	Encadreur

Année Universitaire : 2021/2022



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département : Automatisation et électrification
Filière : Génie Electrique
Option : Electricité industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER 2

Thème

**Les essais électriques d'un transformateur triphasé
630 KVA d'isolement type immergé dans l'huile**

Présenté par :

AIDER Youcef
KHELIL Farouk Abdeldjalil

Avis favorable de l'encadreur :

M. KESRAOUI signature

Avis favorable du Président du jury

Signature

Cachet et signature

Remerciements:

Nous tenons à remercier profondément Dieu, le tout puissant de nous avoir donné le Courage, la volonté, ainsi que la santé pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à

Mr KESRAOUI Mohamed, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, ses directives et ses orientations concernant notre projet de fin d'étude, tout en nous accordant sa confiance et en nous faisant profiter de sa large expérience tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements **Mr ZEKRI Mouloud** pour ses conseils et ses orientations.

Nous remercions les membres de jury qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de ce projet de fin d'étude :

- A tous les professeurs de la faculté des hydrocarbures et de la chimie pour leurs conseils et leurs orientations.
- Aux personnels du département.
- A nos parents et à toute la famille **KHELIL** et **AIDER**.
- A nos frères et sœurs.
- A tous nos amis.

Et enfin nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Sommaire :

Introduction générale :	1
CHAPITRE I :PRESENTATION DE L'ENTREPRISE (ELECTRO-INDUSTRIE)	3
I.1 L'historique d'Electro-Industries :	4
I.2 Présentation de l'entreprise :	4
I.2.1 Unité de fabrication de transformateurs de distribution :	5
I.2.2 Unité de fabrication de moteurs électroniques, alternateur et prestation techniques :	5
I.3 Les missions de l'Electro-industrie :	6
I.3.1 La conception :	6
I.3.2 La production :	6
I.3.3 La commercialisation :	7
I.4 Les objectifs d'Electro-industrie :	7
I.4.1 Les objectifs institutionnels qui se distinguent comme suit :	7
I.4.2 Les objectifs commerciaux :	7
I.5 Missions et objectifs des différentes directions :	7
I.5.1 L'unité des transformateurs (UTR) :	7
I.5.2 L'unité motrice prestations (UMP) :	8
I.5.3 La direction des ressources humaines et de l'organisation (DRHO) :	8
I.5.4 La direction technico-commercial (DTC) :	9
I.5.5 La direction finance et comptabilité (DFC) :	9
I.5.6 La direction d'approvisionnements (DAP) :	9
I.5.7 Assistant de charge des affaires juridiques contentieux et recouvrements :	10
I.5.8 Assistant de charge de contrôle de gestion :	10
I.5.9 Chef de départements informatiques :	10
CHAPITRE II : Généralités sur les transformateurs.	11
II.1 Introduction :	12
II.2 Définition :	12
II.3 Symboles électriques du transformateur :	12
II.4 Circuit équivalent du transformateur :	13
II.5 Principe de fonctionnement :	13
II.6 Constitution générale d'un transformateur :	14
II.6.1 Partie active :	14
II.6.1.1. Le noyau (circuit magnétique) :	14
II.6.1.2 les enroulements :	16
II.6.2 Partie constructive :	16

II.6.2.1 La cuve :	16
II.6.2.2 Le couvercle :	16
II.6.2.3 les traversées :	17
II.6.2.4 Le conservateur d'huile :	18
II.6.2.5 Le liquide diélectrique :	18
II.7 Les couplages :	18
II.7.1 Mode du couplage :	18
II.7.2 Désignation :	19
II.7.3. Choix du couplage :	20
II.7.4 Indice horaire et rapport de transformation :	20
II.7.4.1 L'indice horaire :	20
II.7.4.2 Rapport de transformation :	21
II.8 Les différents types de transformateurs :	21
II.8.1 Transformateur de puissance :	21
II.8.2 Le transformateur de mesure :	22
II.8.3 Transformateur déphaseur :	23
II.8.4 Le transformateur d'essai :	23
II.8.5 L'autotransformateur :	24
II.8.6 Le transformateur d'isolement :	24
II.9 Les pertes dans le transformateur :	25
II.9.1. Pertes fer :	25
II.9.2 Les Pertes Joule :	26
II.9.3 Autres pertes :	26
II.10 Les contraintes :	26
II.10.1 Les Surtensions :	26
II.10.2 Le court-circuit :	27
II.10.3 Les Surcharges :	27
II.11 Protection des transformateurs :	28
II.11.1 Relais Buchholz :	28
II.11.2 Thermomètre :	29
II.11.3 L'Assécher d'air :	29
II.11.4 Soupape de sécurité :	29
II.12 Schéma global d'un transformateur de puissance :	29
Conclusion :	30
CHAPITRE III : CALCUL ÉLECTROMAGNÉTIQUE	31
III.1 Introduction :	32
III.2 Calculs préliminaires des dimensions principales :	32

III.2.1 Puissance apparente par colonne :	34
III.2.2 Tension dans les enroulements :	34
III.2.2.1 Enroulement primaire BT :	35
III.2.2.2 Enroulement secondaire (BT) :	35
III.2.3 Courants dans les enroulements :	36
III.2.3.1 Courant dans l'enroulement primaire :	36
III.2.3.2 Courant dans l'enroulement secondaire :	36
III.2.4 Tension de court-circuit :	36
III.2.5. Diamètre et section de la colonne :	37
III.2.6. Epaisseur rapporté du canal de fuite ar :	37
III.2.7. Calcul du diamètre de canal de fuite D12 :	38
III.2.8. Section du fer :	38
III.3. Calcul des enroulements :	39
III.3.1 Calcul de la tension de spire :	39
III.3.2 Calcul du nombre de spires au secondaire :	39
III.3.3 Calcul du nombre de spires au primaire :	39
III.3.4 Recalcule de la tension de spire secondaire :	39
III.3.5 Recalcule de l'induction B :	40
III.3.6 Calcul des sections des conducteurs :	40
III.3.6.1 Calcul de densité du courant :	40
III.3.6.2 Tableau des dimensions des enroulements méplats :	41
III.3.6.3 Les sections des conducteurs au secondaire :	41
III.3.6.4 Les sections des conducteurs au primaire :	42
III.4 Calcul des hauteurs des bobinage :	43
III.4.1 Hauteur de bobinage au secondaire :	43
III.4.2 Hauteur de bobinage au primaire :	43
III.4.3 Calcul de la hauteur du montage :	44
III.4.4 Dimensionnement de la cale de progression :	44
III.5 Calcul définitif des épaisseurs des enroulements :	45
III.6 Dimensionnement radial des enroulements :	46
III.6.1 Diamètre intérieur de la bobine secondaire :	46
III.6.2 Diamètre extérieur de la bobine secondaire :	46
III.6.3 Diamètre inférieur de la bobine primaire :	46
III.6.4 Diamètre extérieur de la bobine primaire :	46
III.7 Calcul définitif de l'épaisseur rapporté de canal de fuite ar :	46
III.8 Dimensionnement du circuit magnétique :	46
III.8.1 Nombre et dimensions des gradins :	46

III.8.2 Longueur de la fenêtre :.....	47
III.8.3 Hauteur de la fenêtre :	48
III.8.4 Hauteur du noyau :	48
III.8.5 Longueur entre axes des colonnes :.....	48
III.8.6 Longueur de noyau :.....	48
III.8.7 Section de la culasse :.....	48
III.8.8 Induction dans la culasse :.....	49
Conclusion :.....	50
CHAPITRE IV : Etude théorique des essais électriques	51
IV.1 Introduction :	52
IV.2 Généralités :	52
IV.3 Description d'un banc d'essais :	53
IV.3.1 Définition des tâches :	53
IV.3.2 Construction mécanique générale :	53
IV.4 Essais individuels :.....	53
IV.4.1 Epreuve diélectrique ou essai d'isolement par tension appliquée à fréquence industrielle :..	53
IV.4.2 Mesure du rapport de transformation et vérification du groupe de couplage :	54
IV.4.3 Mesure de la résistance des enroulements :	54
IV.4.4 Epreuve diélectrique par tension induite ou essai entre spires :.....	54
IV.4.5 Mesure des pertes et du courant à vide :	55
IV.4.6 Mesure de la tension de court-circuit et des pertes dues à la charge :.....	55
IV.4.6.1 Procédé d'essai :.....	55
IV.5 Essai de types :.....	57
IV.5.1 Essai d'échauffement :.....	57
IV.5.2 Essai de tenue aux chocs de foudre :.....	58
Conclusion :.....	59
CHAPITRE V : MESURES ET ESSAIS ELECTRIQUES PRATIQUES	60
V.1 Introduction :	61
V.2 Généralités :.....	61
V.3 Le banc d'essai :.....	61
V.3.1 Définition :	61
V.3.2 Construction mécanique générale :.....	62
V.4 Essais individuels :.....	62
V.4.1 Mesure de la résistance d'enroulement :	62
V.4.1.1 Mesure de la résistance moyenne de l'enroulement :.....	63
a. Enroulement primaire	63
b. Enroulement secondaire :	63

V.4.2 Mesure de rapport de transformation et vérification du type de couplage :	63
V.4.3 Mesure de pertes et du courant à vide :	64
V.4.3.1 Calcul du courant moyen à vide :	64
V.4.3.2 Calcul du rapport $I_{0\text{moy}}/I_N$:	65
V.4.3.3 Calcul des pertes à vide :	65
V.4.4 Mesure de la tension en court-circuit et des pertes en charge :	65
V.4.4.1 Calcul de la tension appliqué :	65
V.4.4.2 Calcul des pertes en court-circuit :	66
V.4.4.3 Calcul en court-circuit à la température ambiante :	66
A. Tension de court-circuit :	66
B. Calcul des pertes joules P_j :	66
C. Calcul des autres pertes :	67
V.4.5. Épreuves diélectriques :	67
V.4.5.1 Epreuve diélectrique par tension appliqué à fréquence Industrielle :	67
V.4.5.2 Epreuve diélectrique par tension induite (Pertes à vide) :	67
A. Calcul de la tension d'essai :	67
B. Calcul de la fréquence d'essai :	67
C. Calcul de temps d'essai :	68
V.5 Calcul en court-circuit à la température de référence 75 °C :	68
V.5.1 Calcul des pertes P_j :	68
V.5.2 Calcul des autres pertes P_s :	68
V.5.3 Calcul des pertes en court-circuit P_{cc} :	68
V.5.4 Calcul de la tension de court-circuit U_{cc} :	68
V.6 Essais de type :	69
V.6.1 Mesure de l'échauffement de l'enroulement :	69
V.6.2 Essai en onde pleine :	69
V.7 La rigidité diélectrique	69
V.8 Tension de claquage dans l'huile	70
V.9 PCB dans les transformateurs.....	71
V.9.1 Propriété	71
V.9.2 Applications.....	71
Conclusion :	72
Conclusion générale :	74
Références Bibliographiques :	75

Listes des figures.

Chapitre II : Génitalités sur les transformateurs.

Figure II-1 Symboles des transformateurs monophasés.....	12
Figure II-2 Symboles des transformateurs triphasés.	12
Figure II-3 Circuit équivalent d'un transformateur.....	13
Figure II-4 Schéma de principe de fonctionnement de transformateur	14
Figure II-5 Circuit magnétique du transformateur.	14
Figure II-6 Type cuirassé.	15
Figure II-7 Type à colonne.....	15
Figure II-8 Les enroulements primaire et secondaire.....	16
Figure II-9 Couvercle d'un transformateur	17
Figure II-10 La traversée.....	17
Figure II-11 Le conservateur d'huile.....	18
Figure II-12 Couplage étoile sans neutre	Figure II-13 Couplage étoile avec neutre..... 19
Figure II-14 Connexion triangle.....	19
Figure II-15 Connexion zigzag.....	19
Figure II- 16 Relation entre indice horaire et couplage.....	21
Figure II-17 Transformateur de puissance.	22
Figure II-18 Transformateur de mesure.	22
Figure II-19 Schéma transformateur déphaseur	23
Figure II-20 Transformateur déphaseur.....	23
Figure II-21 Le transformateur d'isolement.....	23
Figure II-22 L'autotransformateur	24
Figure II-23 Le transformateur d'isolement.....	25
Figure II-24 Graphe de pertes par hystérésis.....	25
Figure II-25 Pertes par courants de Foucault.	26
Figure II-26 Relais Buchholz	28
Figure II-27 Schéma global d'un transformateur de puissance.....	29

Chapitre III : Calcul électromagnétique.

Figure III-1 Dimensions principales d'un transformateur.....	28
Figure III-2 Couplage des enroulements	34
Figure III-3 Couplage de l'enroulement primaire en triangle	28
Figure III-4 Couplage de l'enroulement secondaire en étoile	35
Figure III-5 Cale de progression.....	44
Figure III-6 Représentation des gradins	47
Figure III-7 Coupe générale de la colonne	49
Figure III-8 Représentation de la partie active	50

Chapitre IV : Etude théorique des essais électriques

Figure IV-1 Représentation schématique de l'essai en court-circuit (méthode de deux wattmètres) ... 56

Chapitre V : Mesures et essais électriques pratiques.

Figure V-1 Banc d'essai 62

Figure V-2 La méthode de deux wattmètres 64

Listes des tableaux.

Chapitre III : Calcul électromagnétique

Tableau III-1 Tableau de référence	33
Tableau III-2 Largeur de canal de fuite	37
Tableau III-3 Valeurs de facteur K des pertes supplémentaire	38
Tableau III-4 Valeurs de facteur K_{pcc}	40
Tableau III-5 Dimensions des conducteurs méplats.....	41

Chapitre V : Mesures et essais électriques pratiques

Tableau V-1 Rapport de transformation.....	64
--	----

Introduction générale

Introduction générale :

L'approvisionnement en énergie électrique est assuré par un ensemble d'infrastructures qui garantit le transfert de cette énergie du point de production jusqu'au client. Parmi ces équipements on trouve le transformateur qui est un élément très important dans le réseau électrique.

Le calcul électromagnétique d'un transformateur et leur dimensionnement est réalisé en deux étapes.

La première est basée sur un calcul préliminaire permettant de déterminer à partir du cahier de charge, les dimensions principales.

La deuxième étape est un calcul définitif, qui à partir des résultats précédents permet de dimensionner les enroulements, d'établir toutes les caractéristiques géométrique et électromagnétiques du transformateur.

Malgré le progrès des méthodes numériques du calcul des champs électriques, des essais pratiques en temps réel, combinés avec de calculs théoriques sont plus que nécessaires pour comprendre ces phénomènes. Pour cela, il faut recourir à des essais dans un laboratoire à haute tension. On essaie de se rapprocher au maximum des conditions de fonctionnement réelles des transformateurs. Ces essais sont réalisables à l'aide de différents équipements, à savoir générateur de tension continu, condensateur de charge et un générateur de tension de choc.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres qui sont exposés de manière séquentielle :

Chapitre I : Est consacré à la description de l'entreprise Electro-Industrie.

Chapitre II : Est consacré aux généralités sur les transformateurs.

Chapitre III : Est consacré au calcul électromagnétique et le dimensionnement des différents paramètres de transformateur.

Chapitre IV : Est consacré à l'étude théorique des essais électriques.

Chapitre V : Est consacré à l'essai pratique à sur un prototype de transformateur fabriqué à l'électro-industrie.

Enfin, notre travail est terminé par une conclusion générale.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE (ELECTRO- INDUSTRIE)

I.1 L'historique d'Electro-Industries :

Electro-industries est une entreprise publique, économique et commerciale. Elle bénéficie d'une identité morale et d'une autonomie financière.

L'origine de l'entreprise **Electro-industries** remonte à la restructuration de **SONALEC** (société nationale d'électronique) qui a connue des problèmes de gestion dues à sa taille, comme toutes les grandes sociétés qui sont nées pendant les années 70 avec la politique industrielle menée en Algérie, ce qui à donner naissance à l'entreprise mère ENEL (Entreprise nationale des industries électronique) en 1983.

L'ENEL est réalisée avec des partenaires allemands (SIEMENS) pour les moteurs et pour les transformateurs, ces derniers ont contribué à l'organisation de cette entreprise en formant même le personnel, ils ont placé un complexe intégré qui produit et commercialise des moteurs, alternateurs et transformateurs depuis 1986.

En raison d'extension des besoins du marché et la nécessité d'accroître l'autonomie de production nationale, il a été convenu d'augmenter le programme de production ainsi que le taux d'intégration. A l'issue, une convention qui a été signée en 1985 pour la réalisation du complexe MEI-AZAZGA qui se développera et se détachera pour prendre la forme d'une entreprise autonome appelée aujourd'hui « ELECTRO-INDUSTRIE ».

L'usine a été réalisée dans le cadre d'un contrat produit en main avec des partenaires allemands, en l'occurrence.

- **Siemens** : pour les produits (alternateurs, générateurs, groupe électrogène).
- **Trafo-union** : pour les transformateurs.
- **Fritz Werner** : pour la partie engineering du projet.

En matière de qualité **Electro-industries** dispose de ses propres laboratoires à l'essai et mesure de ses produits ainsi que pour le contrôle des principaux matériaux utilisés dans sa fabrication. S'agissant du système documentaire il utilise t252 normes internes en plus des normes DIV/VDE.

Aujourd'hui **Electro-industrie** est le leader national dans le domaine de l'industrie électronique.[9]

I.2 Présentation de l'entreprise :

Electro-industrie est implantée dans une zone agricole de 39.5 hectares, située sur la route nationale n° 12, distante de 30 km du chef-lieu de la wilaya de TIZI-OUZOU et de 08 km de chef-lieu de la daïra d'Azazga.

Electro-industrie est une société par action au capital de 4 753 000 000DA. Elle a été créée sous sa forme actuelle en janvier 1999, après la cession de l'entreprise mère ENEL (entreprise nationale des industries Electroniques). Son activité de production remonte à 1986, dans les domaines de fabrication de moteurs Electriques, Alternateurs et transformateurs de distribution.

L'Electro-industrie est composée de trois unités ; toutes situées sur un même site :

- ✓ Unité transformateur.
- ✓ Unité moteurs électriques et prestations techniques.

I.2.1 Unité de fabrication de transformateurs de distribution :

Sa capacité de production est de 4000 à 5000 transformateurs par an et l'objectif tracé par l'entreprise pour l'année 2011 est de 5500 transformateurs.

- La puissance de transformateurs 25 à 2000 kVa
- La tension usuelle en moyennes tension 5.5, 10 et 30kv
- La tension usuelle en basse tension 400v

➤ Les moyens matériaux :

L'unité de transformateurs dispose de l'ensemble des équipements nécessaires à la fabrication et aux essais des produits finis qui sont réalisés avec un niveau d'intégration équivalente à celui existant dans les entreprises étrangères intervenant dans le même domaine d'activité pour la fabrication des transformateurs, les technologies suivantes sont mises en application :

- Travaux de chaudronnerie.
- Usinage mécanique.
- Traitement de surface.
- Echange BT/MT (base tension/moyen tension).
- Découpage de tôle mécanique.
- Essais d'électricité en BT et MT.

I.2.2 Unité de fabrication de moteurs électroniques, alternateur et prestation techniques :

La capacité théorique de production de cette unité est de :

- 45000 Moteurs de 0.25 à 15 kW.
- 45000 moteurs de 18.5 à 400 kW.
- 2000 Alternateurs de 16 à 180kVA.
- Montage de 400 groupes électrogènes (22-35 et 52 kVa).

L'unité dispose aussi des moyens humains et matériels pour la prise en charge des études et réalisation des outillages, dispositifs et moules, de même qu'elle assure la maintenance de ses propres équipements de production ainsi que ceux de l'unité transformateurs et l'exploitation de toutes les installations d'énergie et fluide.

Cette unité dispose aussi d'un laboratoire central qui assure les essais physicochimiques pour les matières destinées à la fabrication des moteurs et transformateurs.

L'unité motrice et prestations sont dotées de l'ensemble des équipements nécessaires à la fabrication et aux essais des produits finis.

Les produits sont réalisés avec un niveau d'intégration équivalent à celui existant dans les usines du donneur de licence (SIEMENS).

Pour la fabrication des moteurs / alternateurs les technologies suivantes sont mises en application :

- Usinage mécanique.

- Découpage de tôle
- Couler l'aluminium.
- Travaux de tôle.
- Bobinage.
- Traitement de surface.
- Essais électriques.

La capacité de production de transformateurs de cette entreprise couvre les besoins du marché à 70% environ. Les ventes de moteurs représentent 30% environ de sa capacité de production, il est à signaler qu'ELECTO-INDUSTRIES est le seul fabricant de ces produits en Algérie. L'entreprise emploie un effectif de 804 travailleurs dont 19% de cadres, 34% d'agents maîtrise et 47% d'agents d'exécution pour l'année 2018.[9]

I.3 Les missions de l'Electro-industrie :

Etant donné qu'**Electro-industrie** est une entreprise publique économique et commerciale, elle doit assurer plusieurs fonctions, parmi elles la production et la commercialisation, la conception des produits électroniques.

I.3.1 La conception :

La conception est basée sur l'amélioration continue de ses processus produits et services, l'entreprise dispose de ses propres laboratoires qui assurent l'analyse physique et chimique de ses produits et maintenance ainsi que le contrôle de ses équipements utilisés. En matière de qualité électro-industrie a procédé à la mise en place de son système qualité en 2002 elle a acquis la certification du système engagement qualité ISO9001 :2000 par QMI canada le 24 juillet 2004.

A présent, une autre édition (901 version 2008) annule et remplace l'ISO9001 :2000 qui a été modifié pour clarifier des éléments du texte et améliorer la comptabilité et encourage l'adoption d'une approche processus lors du développement de la mise en œuvre et de l'amélioration de l'efficacité d'un système de management de la qualité. Donc l'objectif essentiel d'**Electro-industrie** est d'accroître la satisfaction des clients par le respect de leurs exigences.

I.3.2 La production :

Electro-industrie est la principale entreprise dans le domaine de l'industrie électronique, son activité s'adresse au marché des biens d'équipements avec une production de :

- Transformateurs de distribution ;
- Moteurs Electroniques asynchrones.
- Alternateurs triphasés.
- Montage de groupe Electrogène.

La capacité de production de transformateurs de cette entreprise couvre les besoins du marché à 70% et celle de moteurs à 30% environs.

I.3.3 La commercialisation :

Il est bien à signaler qu'**Electro-industrie** est le seul fabricant en Algérie de ces produits cités ci-dessous dont elle assure leur commercialisation et les services après-vente afin d'élargir son champ d'activité et d'assurer la fidélisation de ses clients.

En matière de transformateurs le principal marché d'**Electro-industrie** est SONELGAZ en plus de divers clients qui activent dans le secteur de l'électricité.

Et pour la gamme de moteurs les marchés concernés sont divers et touchent essentiellement :

- Marché de bien de consommation.
- Les administrations.
- Marché des biens d'équipements.
- Marché industriel.

La production actuelle d'électro- industrie est écoulee sur le marché Algérien et généré un chiffre d'affaires de 1.8 milliaires de dinars pour l'année 2017.[9]

I.4 Les objectifs d'Electro-industrie :

Il existe plusieurs objectifs, les principaux sont :

I.4.1 Les objectifs institutionnels qui se distinguent comme suit :

- Promouvoir son image de marque.
- Faire valoir le côté positif de l'entreprise dans la société.

I.4.2 Les objectifs commerciaux :

Les objectifs commerciaux pour les produits transformateurs sont les suivants :

- Recherche de nouveau client.
- Accroître la part de marché.
- Fidéliser et accroître la confiance des clients pour le produit moteur.
- Réduire les stocks énormes évalués à 24000 moteurs.
- Maintenir les clients actuels.

I.5 Missions et objectifs des différentes directions :

Les missions et les objectifs des différentes directions peuvent se résumer comme suit :

I.5.1 L'unité des transformateurs (UTR) :

Les taches principales d'UTR (direction d'UTR) sont :

- Préparer les budgets de l'unité de production, approvisionnements et investissements.
- Planifier, organiser et surveiller la production, définir les quantités et les qualités requis, suivre la fabrication dans les meilleures conditions de délais et cours ;
- Se tenir au courant de la concurrence dans le domaine des transformateurs, œuvre à fidéliser la clientèle, augmenter sa part de marché (marché local, exportation).
- Susciter l'initiative de nouveaux projets concernant ;
- L'introduction de technique, procédés nouveaux différents stades de la production ;
- L'adaptation des installations/ équipements aux nouveaux besoins de la production.

- L'introduction de nouvel intrant visant la production de plus en plus performante et moins couteuse.

Son objectif :

Est de diriger, coordonner et contrôler les activités de son unité.

I.5.2 L'unité motrice prestations (UMP) :

C'est la deuxième unité dont l'**Electro-industrie** est composée.

Ses tâches principales sont :

- La préparation du budget annuel de l'unité et il veille à l'évolution du chiffre d'affaires, à la satisfaction des clients et à l'atteinte des objectifs qui sont fixée par la direction générale.
- Approuver les programmes annuels d'approvisionnements.
- Veiller à la sensibilisation du personnel de son unité.

Son objectif :

Est de diriger, coordonner et contrôler les activités de son unité.

I.5.3 La direction des ressources humaines et de l'organisation (DRHO) :**Ses missions :**

La direction des ressources humaines est chargée de :

- Définir et mettre en œuvre la politique d'emploi de recrutements et de la formation.
- Veiller à l'application à la réglementation en vigueur en matière de relation de travail
- Mettre en œuvre et veiller à l'application de la convention collective des procédures et respect du règlement intérieur de l'entreprise.
- Assurer la mise en place et le fonctionnement des différentes commissions spécialisées en matière du personnel.
- Assurer le suivi le contrôle, l'analyse et la consolidation des prévisions en matière de ressources humaines de l'entreprise.
- Tenir à jour les dossiers relatifs à la gestion du personnel ainsi que leurs carrières.
- Elaborer la paie les déclarations sociales et fiscales.
- Assurer la définition, la mise en œuvre et le suivi des plans de besoins de l'entreprise.
- Elaborer des rapports périodiques, ainsi qu'un bilan annuel d'activité.
- Elaborer et mettre en œuvre les mesures de prévention prévues par la législation et la réglementation en vigueur en matière et de sécurité en milieu de travail.
- Définir la politique des salaires.
- Assurer l'application des règles et procédures.
- Superviser l'élaboration des tableaux de bord consolidant l'activité des ressources humaines et faisant ressortir les principaux agrégats de gestion (absentéismes rotation du personnel statistique des effectifs).

Ses objectifs :

- Assurer la préparation et l'exploitation de la paie aux plans des éléments variables de la restitution des documents du paie, et de traitement des réclamations.

- Veiller à l'établissement de la paie de personnel.
- Assurer la gestion administrative du personnel et des cadres de l'électro-industrie.
- Assurer le suivi et la mise à jour du fichier informatisé du personnel.
- Assurer la tenue des dossiers administratifs du personnel.
- Assurer, suivi et contrôler les conditions d'application des règles de gestion du personnel.
- Veiller à l'application uniforme de la réglementation et contrôler sa mise en œuvre.
- Etablir le budget, le contrat de gestion et le tableau de bord en matière de GRH.

I.5.4 La direction technico-commercial (DTC) :

Elle assure le développement technique des activités de l'entreprise par la mise en place de nouveaux moyens de production, elle veille au bon fonctionnement des systèmes de managements de la qualité de l'environnement et de la santé et sécurité au travail, comme elle prospect les marchés pour l'écoulement des produits de l'entreprise.

I.5.5 La direction finance et comptabilité (DFC) :

Son principal objectif c'est de coordonner et superviser les activités des différents départements et services comptables et financiers.

Ses tâches principales consistent en :

- Optimisation des ressources financières pour l'atteinte des objectifs.
- Vérification et contrôle de tous les états de dépense et recette.
- Participation à l'élaboration du budget et du plan de financement prévisionnel.
- Vérifie et approuve les déclarations d'ordre fiscal et social.
- Approuve les écritures d'inventaire relatives à l'investissement et au bilan de fin d'exercice.
- Aide à l'élaboration du budget annuel de trésorerie et du plan de financement.
- Elabore tous les documents de trésorerie dans les délais ;
- Participe à l'élaboration du dossier court et prix de revient.
- Participer à la prise de décision sur demande de la direction générale.
- Pilotage des opérations d'inventaire de fin d'année.
- Veille au respect de la réglementation et des procédures en vigueur en matière de trésorerie.

I.5.6 La direction d'approvisionnements (DAP) :

Son objectif est de veiller au bon état de marchandise lors de dédouanement à l'import comme à l'export et à l'expertise en cas de navarrais ou difficile, dédouanement et enlèvement de marchandise dans les délais réglementaires pour éviter la mise en fourrière et toutes autres dépenses qui engendrent d'autres frais supplémentaires.

Ses missions peuvent se résumer comme suit :

- Récupérer l'avis d'expédition et procéder à l'ouverture de dossier transit.
- Règlement de la compagnie maritime.
- Opération de vue acquise et déclenchement de l'expertise en cas de nécessité.
- Liquidation sur réserve.
- Règlement des droits de taxe.

I.5.7 Assistant de charge des affaires juridiques contentieux et recouvrements :

Ses missions sont :

- Défendre les intérêts de l'entreprise devant les instances judiciaires.
- Conseiller le directeur générale et l'ensemble des directeurs et responsables sur toutes les questions juridiques.
- Elaborer le contrôle et étudier et exprimer un suivi sur tous projet se contrôle.

I.5.8 Assistant de charge de contrôle de gestion :

Ses tâches principales sont :

- Consolider les rapports de tous les travaux externes liés aux fonctions de l'entreprise.
- Analyser les résultats fournis par la DFC, le contrôle budgétaire afin de déceler les problèmes éventuels des changements dans les politiques de l'entreprise.
- Etablir les documents de synthèse que représente l'activité d'ensemble.

Les objectifs :

- Traduire en terme économique la stratégie globale adopté par l'entreprise en établissant sa prévision à moyen et à long termes justifié et révisables ;
- Contrôler l'adéquation plan-budget.

I.5.9 Chef de départements informatiques :

Ses missions sont :

- Coordonner les activités des cadres placés sous son autorité, impulser leurs efforts et les orienter dans le développement d'application adaptée aux besoins des différentes fonctions de l'entreprise.
- Exécuter toutes les tâches qui lui sont demandées par sa hiérarchie en adéquation avec ses aptitudes professionnelles.

Ses objectifs sont :

- Définir le plan de directeur informatique de l'entreprise (objectifs, moyen, étapes et réseau matériels et applications) tenant compte des politiques et stratégies de la direction générale, le mettre en œuvre dans les meilleures conditions d'exploitation et d'efficacité.[9]

CHAPITRE II : Généralités sur les transformateurs.

II.1 Introduction :

Le transformateur est un appareil électrique très simple, mais il est très important dans un réseau électrique car c'est une machine de base pour le transport d'énergie électrique. Le transformateur permet de modifier la tension et le courant dans un circuit.

Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique et distribuée dans les usines et les maisons.

II.2 Définition :

Le transformateur est un appareil électrique statique à induction électromagnétique qui permet de transformer une tension ou un courant d'une certaine fréquence en une autre tension ou courant de même fréquence. Il est composé d'un circuit magnétique sur lequel sont placés deux bobinages au moins.

Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, nombre de phases de l'énergie électrique a courant alternatif).

II.3 Symboles électriques du transformateur :

Le transformateur peut être représenté par l'un des symboles reportés sur les figures (I.1) et (I.2).

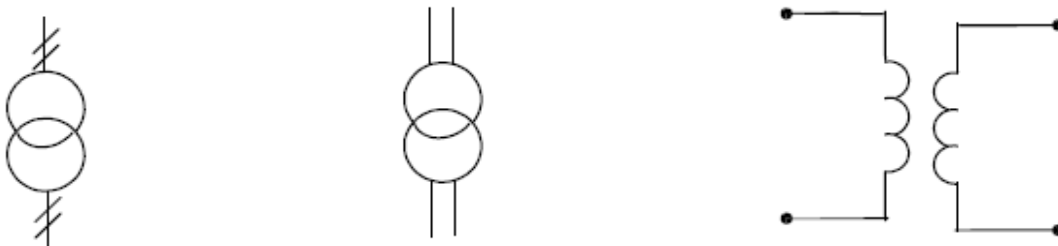


Figure II-1 Symboles des transformateurs monophasés.

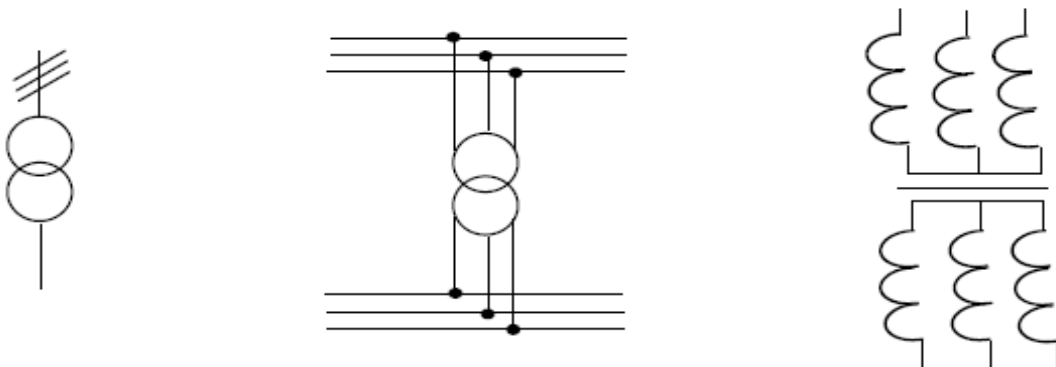


Figure II-2 Symboles des transformateurs triphasés.

II.4 Circuit équivalent du transformateur :

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

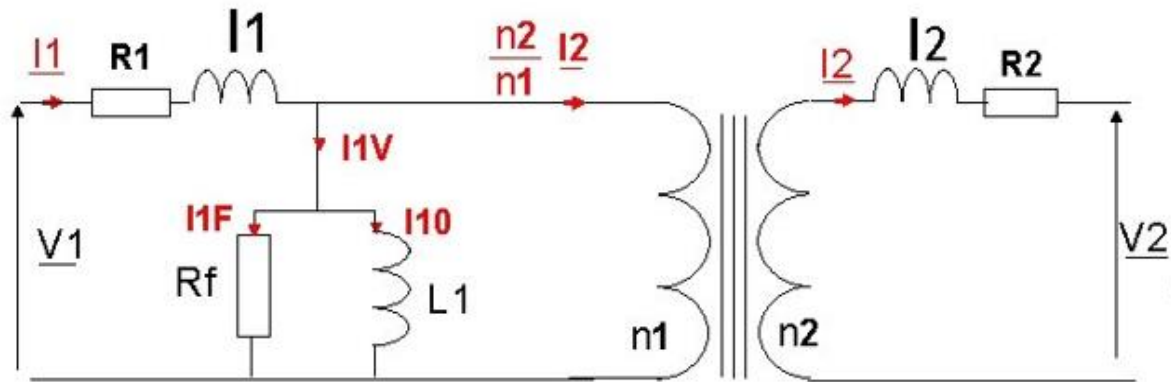


Figure II-3 Circuit équivalent d'un transformateur.

R1, R2 : Représentent les résistances respectives des enroulements primaire et secondaire.

L1, L2 : Représentent les réactances respectives des enroulements primaire et secondaire.

Rf : Résistance de circuit magnétique qui représente les pertes par hystérésis et par courant de Foucault.

L1 : La réactance de circuit magnétique (tient compte du courant d'excitation nécessaire pour produire le flux).

V1 : La tension d'alimentation.

V2 : La tension secondaire.

II.5 Principe de fonctionnement :

Le transformateur exploite le phénomène de l'induction électromagnétique des conducteurs enroulés. Lorsque l'un des bobinages est alimenté sous tension variable, donne naissance à un flux variable dans le circuit magnétique. A son tour, ce flux induit une force électromotrice dans le deuxième bobinage appelé secondaire du transformateur. Les deux bobinages étant électriquement indépendants, le transformateur réalise l'isolation galvanique entre les circuits primaire et secondaire.

Remarque : Le transformateur ne peut pas fonctionner en régime de tension continue puis que les forces électromotrices dans les bobinages sont induites par les variations de flux [1]. Le transformateur est réversible, chaque bobinage peut jouer le rôle du primaire ou secondaire.

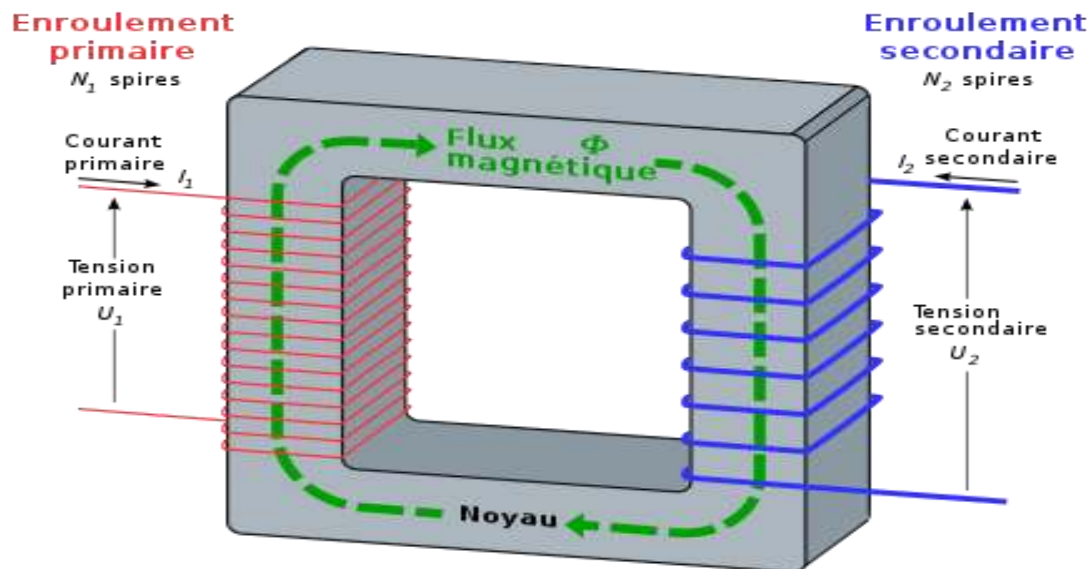


Figure II-4 Schéma de principe de fonctionnement de transformateur

II.6 Constitution générale d'un transformateur :

Le transformateur est un appareil d'induction qui est composé de deux parties principales qui sont :

- **Partie active** : Constituée essentiellement du circuit magnétique, électrique. Elle est destinée à conversion d'énergie électrique.
- **Partie constructive** : destinée à assurer l'isolement et la fixation de la partie active

II.6.1 Partie active :

II.6.1.1. Le noyau (circuit magnétique) :

Le circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôle d'acier de bonne qualité, de plus pour minimiser les pertes dans le fer, les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique, les tôles utilisées sont en acier doux et ont une faible épaisseur et sont isolées entre elles avec du vernis. Le circuit se présente sous forme de trois colonnes et deux culasses, son rôle essentielles de canaliser le flux et de présenter le minimum de pertes hystérésis et courant de Foucault [2].

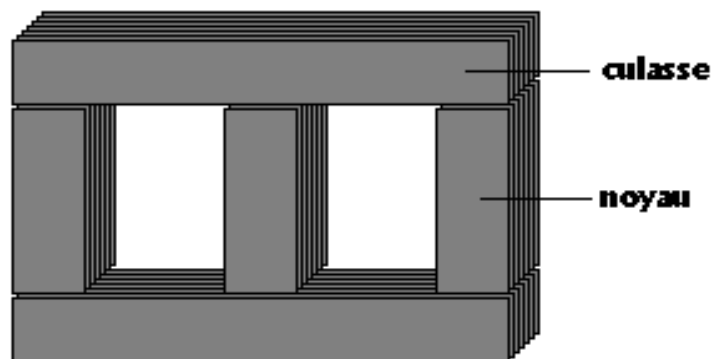


Figure II-5 Circuit magnétique du transformateur.

Suivant la forme du circuit magnétique, on distingue deux dispositions principales qui sont :

a. Transformateur cuirassé :

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux côtés. la cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobines.

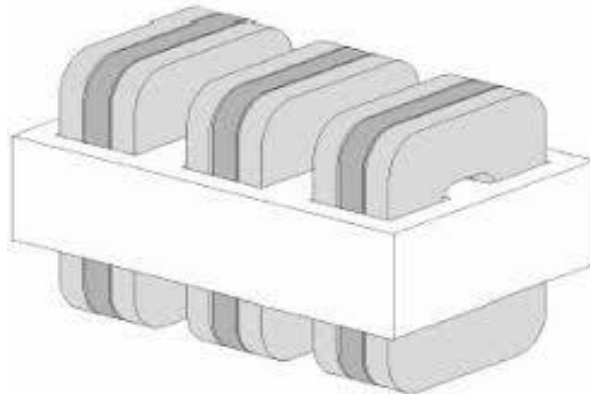


Figure II-6 Type cuirassé.

b. Transformateur à colonnes :

Le transformateur à colonne est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique.

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs [3]. Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances. Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé.

Si le déséquilibre est important, on utilise les transformateurs à quatre ou cinq colonnes, dont trois sont bobinées, les autres servent au retour des flux.

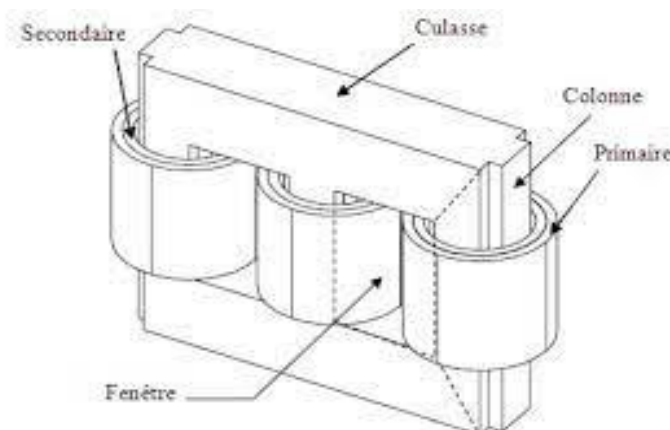


Figure II-7 Type à colonne.

II.6.1.2 les 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 bobinage, les sections et les nombres de spires sont conditionnés par les contraintes à maîtriser en termes électriques, mécaniques et thermiques. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement pour assurer la circulation d'huile du fait des échanges thermique.

- **L'enroulement primaire :** il doit avoir une section faible et un nombre de spires grand. Ceci est imposé par la tension élevée et le courant faible à laquelle il est soumis.
- **L'enroulement secondaire :** pour cet enroulement, la section du fils doit être importante et le nombre de spires est petit, ce qui correspond au courant fort et la tension moins élevée qui sont délivrés par cet enroulement.

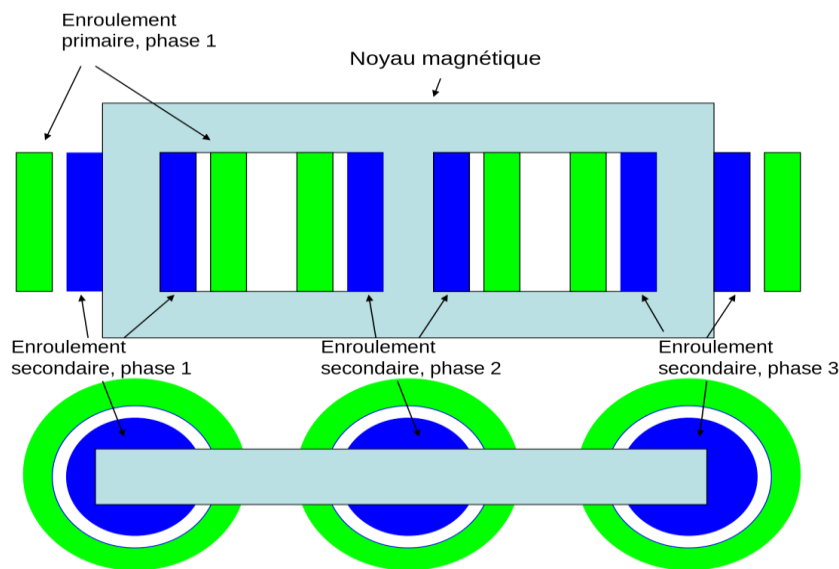


Figure II-8 Les enroulements primaire et secondaire

II.6.2 Partie constructive :

Cette partie comporte des éléments mécaniques qui sert à la protection, la fixation et le refroidissement de la partie active du transformateur. Ces éléments sont les suivants :

II.6.2.1 La cuve :

Elle est destinée à contenir la partie active baignant dans l'huile, et assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. Dans le fond de la cuve se trouve un dispositif d'écoulement du liquide de refroidissement et d'isolement pour favoriser le refroidissement des bobinages. [4]

II.6.2.2 Le couvercle :

C'est un élément important de la cuve il représente la partie supérieure du transformateur, sur lequel sont disposés plusieurs éléments :

- Borne HT.
- Borne BT.
- Pattes de suspension.
- Tours de l'emplacement.
- Prise de terre.
- Poches thermomètres.
- Manette de réglage de la tension et dispositifs de fixation des éclateurs.

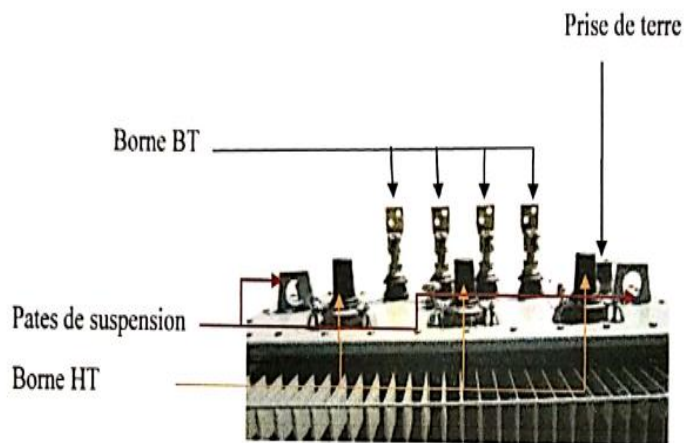


Figure II-9 Couvercle d'un transformateur

II.6.2.3 les traversées :

Les traversées ont pour rôle d'assurer à travers le couvercle la liaison électrique entre les extrémités des enroulements d'une part, et les lignes d'arrivée d'autre part. Elles permettent d'avoir une bonne répartition du champ électrique et une fixation étanche et robuste sur le couvercle.



Figure II-10 La traversée.

II.6.2.4 Le conservateur d'huile :

Il appartient à la partie supérieure du transformateur. Il est placé sur le couvercle à l'aide des éclisses et sur sa face frontale est placé un indicateur d'huile qui est transparent. Sur l'autre face une bride, sur laquelle l'Assécheur d'air est fixé et soudé.

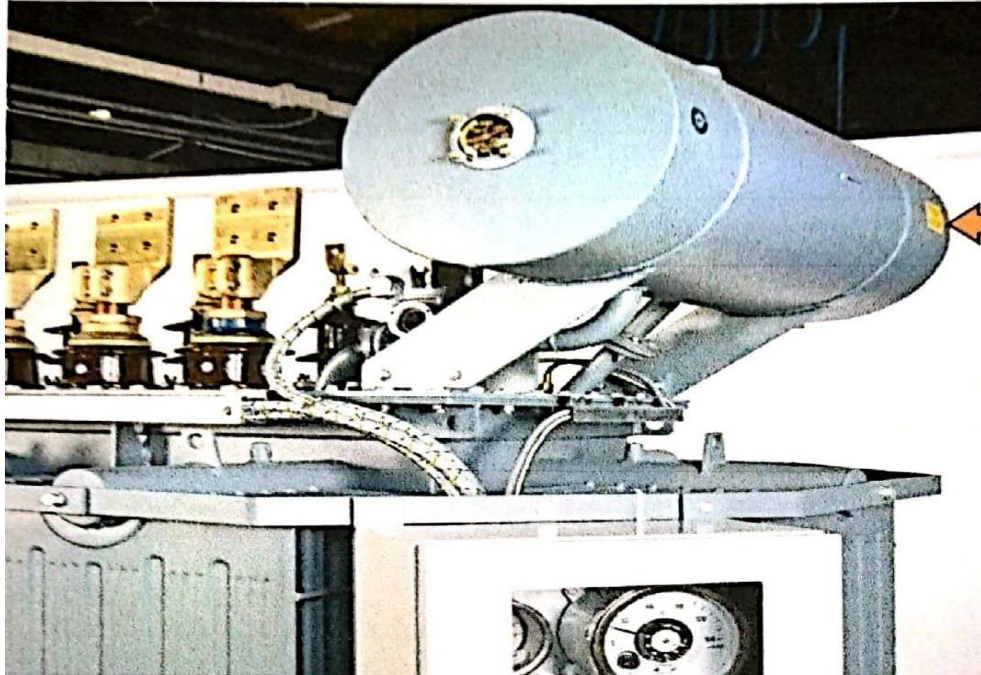


Figure II-11 Le conservateur d'huile.

II.6.2.5 Le liquide diélectrique :

C'est un mélange d'hydrocarbures provenant de la distillation du pétrole brut, après extraction des produits volatiles. On obtient ainsi l'huile pour transformateurs, qui est un liquide dont l'immersion de la partie active a non seulement l'avantage d'une meilleure isolation, mais aussi celui de la facilité de refroidissement par circulation naturelle de l'huile.

II.7 Les couplages :

II.7.1 Mode du couplage :

Les enroulements du primaire du transformateur peuvent être connectés soit en étoile (Y), soit en triangle (D). Au secondaire, les enroulements peuvent être connectés de trois manières : étoile (y), triangle(d) et zigzag (z).

- **Couplage étoile :** Il permet la sortie du point neutre, très utile en basse tension. Deux tensions sont disponibles (simple et composée). Il peut être avec ou sans neutre.

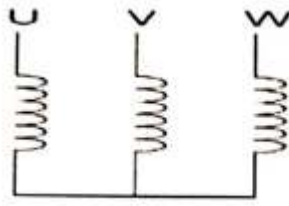


Figure II-12 Couplage étoile sans neutre

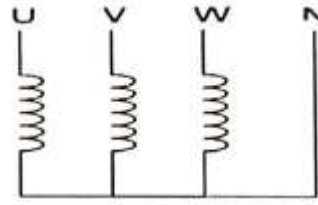


Figure II-13 Couplage étoile avec neutre

- **Couplage triangle** : Il nécessite plus de spires par colonne que l'enroulement étoile, il n'y a pas de neutre possible.

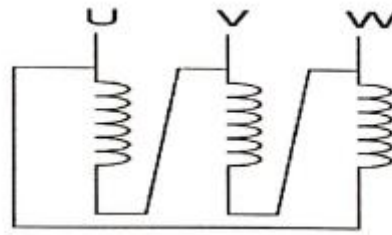


Figure II-14 Connexion triangle.

- **Couplage zigzag** : On l'utilise lorsque la charge est déséquilibrée, afin de mieux répartir les déséquilibres sur les trois colonnes.

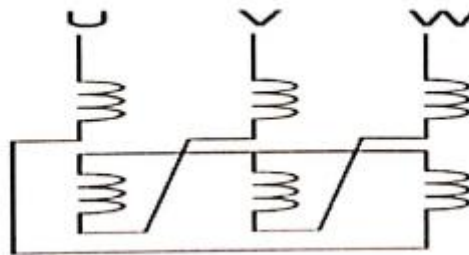


Figure II-15 Connexion zigzag.

II.7.2 Désignation :

On désigne le couplage par 2 lettres suivies d'un nombre.

- **1ere lettre** : majuscule indique la tension la plus haute (coté HT).
- **2ème lettre** : minuscule indique la tension la plus basse (BT).

Le chiffre ou nombres indique l'indice horaire :

Il représente l'angle de déphasage entre la tension primaire et la tension secondaire. Cet angle correspond (pour 360°) au 12 heures d'un cadran repérer de 0 à 11.

Chaque angle étant multiple de 30° .

Exemple : indice 4 $\Rightarrow$ déphasage de $4 \times 30 = 120^\circ$

- **Les 3 lettres :**

D ou d : couplage triangle.

Z : couplage Zig-Zag.

You y : couplage étoile. [6]

II.7.3. Choix du couplage :

On a intérêt à choisir :

- ✓ Un couplage étoile aux hautes tensions. Chaque enroulement supporte une tension : $V = U/\sqrt{3}$
- ✓ Un couplage triangle : aux forts courants. L'intensité par enroulement est : $J = I/\sqrt{3}$.

Si on souhaite disposer de deux tensions : une tension basse pour l'éclairage et une tension élevée pour le chauffage d'un moteur, on adoptera un couplage étoile au secondaire. Ce cas correspond aux transformateurs de distribution.

- ✓ Couplage étoile-étoile Yy : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs abaisseurs de tension qui assurent la liaison entre réseau haute tension/moyenne tension.
- ✓ Couplage triangle-étoile Dy : c'est un couplage utilisé dans des transformateurs de distribution utilisés comme élévateurs de tension.
- ✓ Couplage étoile zig-zag Yz : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution. [1]

II.7.4 Indice horaire et rapport de transformation :

II.7.4.1 L'indice horaire :

L'indice horaire ha représente un nombre entier compris de 0 à 11 qui traduit le déphasage θ entre deux tensions primaire et secondaire homologues avec :

$$h = \frac{\theta}{\pi/6}$$

On peut déterminer θ comme suit :

Soit à partir du schéma des connections.

Soit pratiquement par des essais.

Figure ci-après montre la relation entre l'indice horaire et les différents couplages. [1]

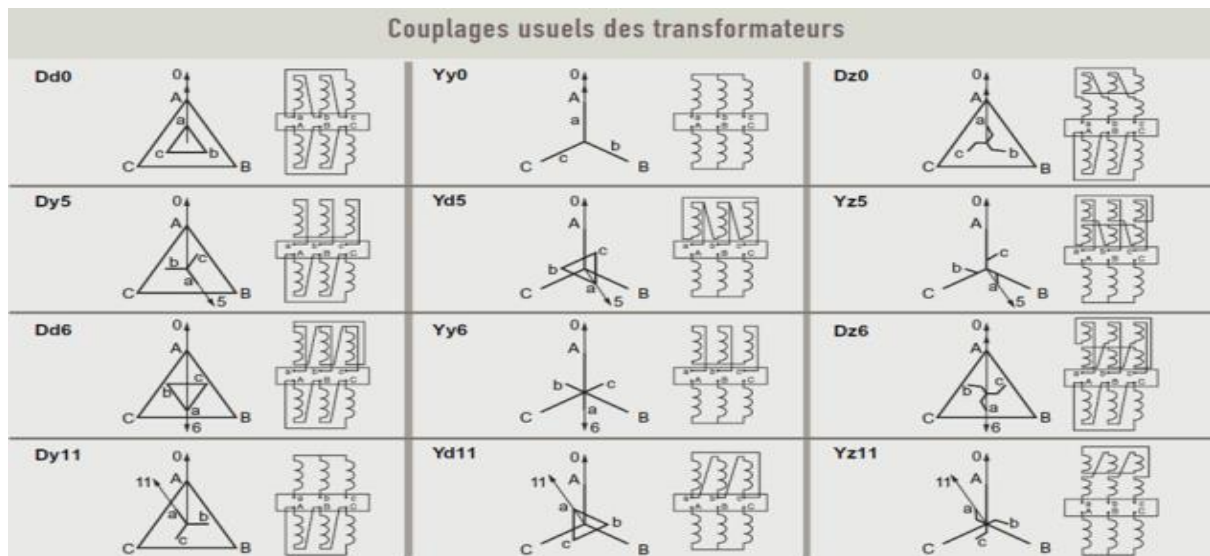


Figure II- 16 Relation entre indice horaire et couplage.

II.7.4.2 Rapport de transformation :

Le rapport de transformation qui relie les grandeurs analogues du primaire et du secondaire ne dépend pas uniquement du nombre de spires mais aussi du mode de couplage des enroulements. Lorsqu'on parle d'un transformateur triphasé, on doit préciser les différents couplages. [3]

Exemple : le groupe Dyn11

$$m = \frac{U_2}{U_1} \sqrt{3} = \frac{I_1}{I_2} \sqrt{3} = \frac{N_2}{N_1} \sqrt{3}$$

II.8 Les différents types de transformateurs :

Le domaine d'utilisation des transformateurs est très vaste. Selon le domaine d'utilisation, les appareils présenteront certaines différences dans les caractéristiques de construction. [4]

Il existe plusieurs types de transformateurs :

II.8.1 Transformateur de puissance :

Les transformateurs de puissances sont des machines électriques statiques dont la fonction est d'élever ou d'abaisser la tension d'un circuit électrique parcouru par un courant alternatif sans en modifier la fréquence. Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique à distance. En effet, les tensions de fonctionnement des machines génératrices n'excèdent pas une vingtaine de kilovolts en courant alternatif. Or le transport de grandes puissances sur des distances notables ne peut être réalisé de façon économique que s'il est effectué à très haute

tension, soit plusieurs centaines de kilovolts. Il est donc nécessaire d'installer, à proximité immédiate des groupes générateurs, des transformateurs « Élévateurs » de tension.

On devra trouver des appareils « abaisseurs » aux points de fourniture de l'énergie électrique, les tensions normales d'utilisation étant comprises entre quelques centaines et quelques milliers de volts. [4]



Figure II-17 Transformateur de puissance.

II.8.2 Le transformateur de mesure :

Selon la définition de la Commission électrotechnique internationale (CEI), un transformateur de mesure est un transformateur destiné à alimenter des appareils de mesure, des compteurs, des relais et autres appareils analogues. Ils sont utilisés pour permettre la mesure de la tension ou du courant quand ceux-ci sont trop élevés pour être mesurés directement.

Ils doivent transformer la tension ou le courant de manière proportionnelle et sans déphasage. Installé à proximité des compteurs électriques et autres appareils de mesure, il facilite le calcul de la tension ou du courant. [4]



Figure II-18 Transformateur de mesure.

II.8.3 Transformateur déphaseur :

Un transformateur déphaseur est une forme spéciale de transformateur électrique, ou plus exactement de transformateur de puissance, utilisée pour réguler le transit de puissance active entre plusieurs lignes électrique triphasés.

En effet dans une transmission de courant alternatif, la puissance active transmise est proportionnelle au sinus de l'angle de transport. Quand deux lignes sont en parallèle, un réglage de cet angle permet de régler la répartition du courant entre les deux lignes et d'optimiser la capacité de transmission tout en évitant les surcharges. [4]



Figure II-20 Transformateur déphaseur

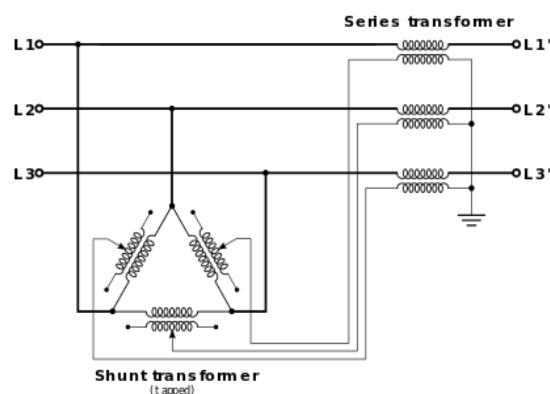


Figure II-19 Schéma transformateur déphaseur

II.8.4 Le transformateur d'essai :

Le transformateur d'essai est un type de transformateur électrique spécialement conçu pour atteindre de très hautes tensions alternatives. Il sert de source de tension dans les laboratoires de haute tension, où est testé le matériel électrique. Il permet notamment de mesurer la qualité de l'isolation électrique. [4]



Figure II-21 Le transformateur d'essai.

II.8.5 L'autotransformateur :

Il s'agit d'un transformateur sans isolement entre le primaire et le secondaire. Dans cette structure, le secondaire est une partie de l'enroulement primaire. Le courant alimentant le transformateur parcourt le primaire en totalité et une dérivation à un point donné de celui-ci détermine la sortie du secondaire.

Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie est identique à celui du type isolé. A rendement égal, un autotransformateur occupe moins de place qu'un transformateur ; cela est dû au fait qu'il n'y a qu'un seul bobinage, et que la partie commune du bobinage unique est parcourue par la différence des courants primaire et secondaire. L'autotransformateur n'est intéressant que lorsque les tensions d'entrée et de sortie sont du même ordre de grandeur (par exemple, 230V/115 V). [4]

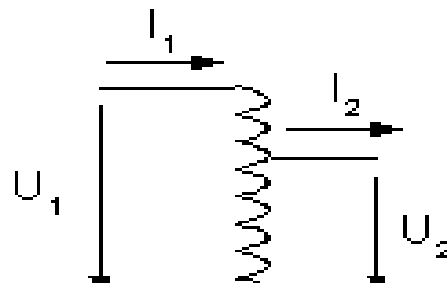
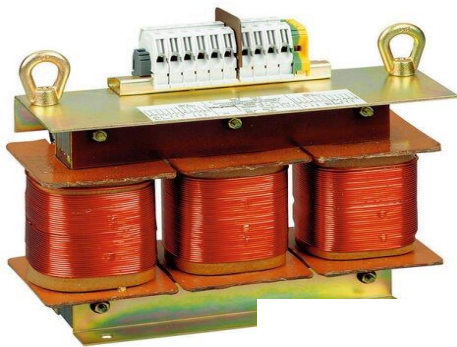


Figure II-22 L'autotransformateur

II.8.6 Le transformateur d'isolement :

Un transformateur d'isolement ou transformateur de séparation est un équipement de sécurité qui intègre une installation électrique afin de protéger d'un côté les personnes et de l'autre côté tous les appareils qui se trouvent en aval. En d'autres termes, cet appareillage électrique préserve tout dysfonctionnement notamment plusieurs circuits d'une même installation électrique. Son principal rôle est alors d'isoler toutes les parties actives qui pourront être sources de danger. Donc, un transformateur de séparation, comme son nom l'indique, est à recourir pour la séparation entre deux réseaux. En outre, un transformateur de séparation permet également de changer le régime de neutre. Il est même en mesure de baisser le voltage en dessous du seuil critique pour les usagers.

Le domaine d'utilisation des transformateurs est très vaste. Selon le domaine d'utilisation, les appareils présenteront certaines différences dans les caractéristiques de construction. [7]

Transformateur d'isolement

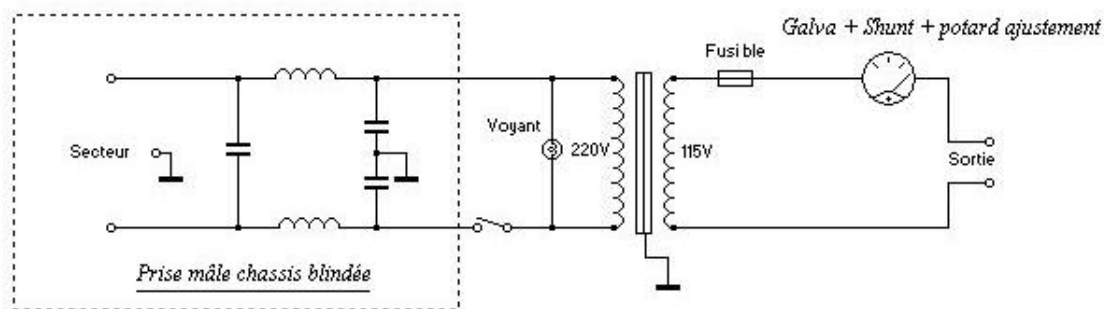


Figure II-23 Le transformateur d'isolement

II.9 Les pertes dans le transformateur :

II.9.1. Pertes fer :

La variation périodique du flux magnétique provoque des pertes d'énergie dans les tôles du circuit magnétique par courants de Foucault et par hystérésis.

- Pertes par hystérésis : Ces pertes sont causées par le champ alternatif qui parcourt le circuit magnétique. Elles sont dues au retard de l'aimantation par rapport au champ magnétique.

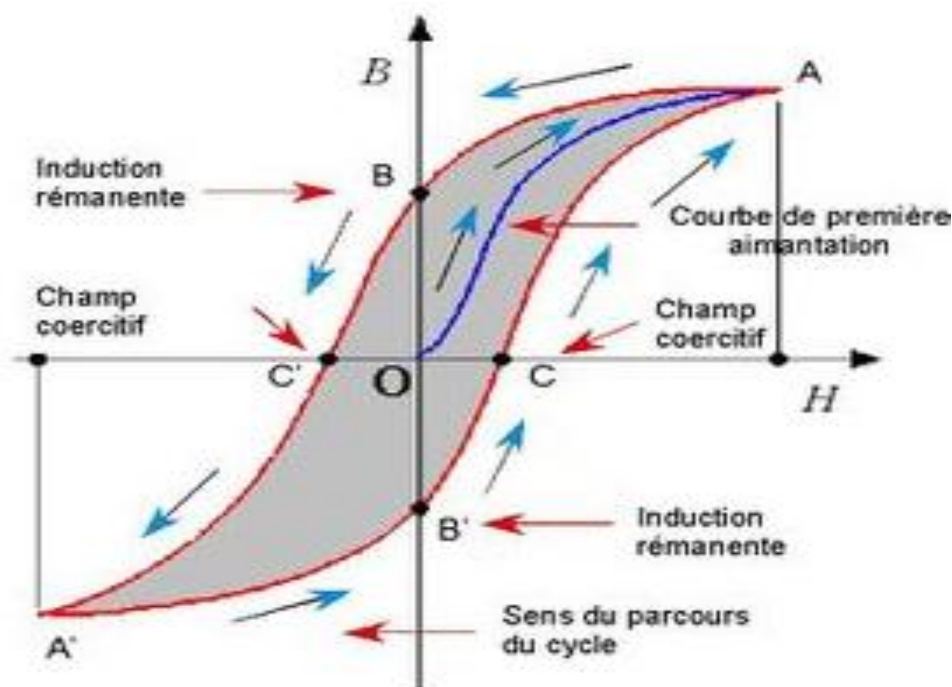


Figure II-24 Graphe de pertes par hystérésis.

➤ Pertes par courants de Foucault : Les masses métalliques qui se trouvent dans un champ magnétique subissent une variation de ce champ qui crée des courants de Foucault. Ces courants induits causent l'échauffement de ces masses. [1]

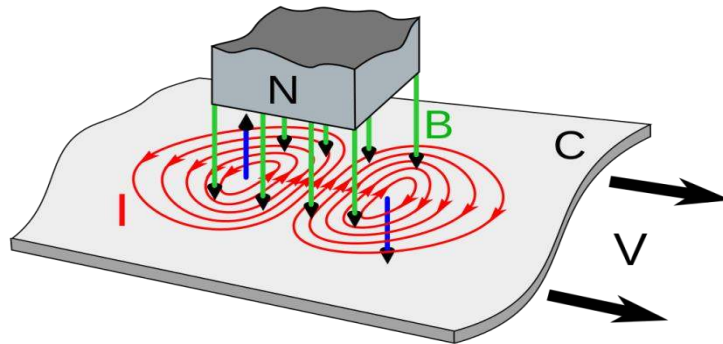


Figure II-25 Pertes par courants de Foucault.

II.9.2 Les Pertes Joule :

Le passage du courant dans les enroulements provoque des pertes d'énergie proportionnelles à la résistivité et au volume du conducteur ainsi qu'au carré de la densité du courant. Le transformateur présente aussi des pertes dans les connections et des pertes par effet pelliculaire.

II.9.3 Autres pertes :

Malgré que les conducteurs soient isolés par des isolants, il y a de faibles courants qui traversent ces isolants, ce sont généralement des courants négligeables. [1]

II.10 Les contraintes :

Un réseau électrique doit fournir une énergie avec une meilleure qualité possible. Cette dernière se dégrade avec l'apparition des anomalies dont la durée peut conduire à des arrêts de fonctionnement prolongé.

Nous passerons rapidement en revue dans cette analyse, les défauts que l'on rencontre couramment sur les transformateurs, leurs causes et leurs conséquences.

II.10.1 Les Surtensions :

Les surtensions sont dangereuses dans un réseau de distribution car elles soumettent les isolants à des contraintes qui risquent de les détruire. Les surtensions peuvent être causées par :

- Contact avec une ligne de plus forte tension.
- Coupure brutale d'une ligne.
- Coup de foudre direct ou indirect. Dans le cas où la surtension persiste, elle risque d'entraîner des surcharges dangereuses pour les récepteurs et même pour les générateurs.

En cas de claquage de l'isolant, les surtensions ont pour conséquence immédiate un court-circuit même s'il s'agit seulement d'un arc dans l'air. Celui-ci persiste sur les réseaux de tension supérieure à quelques milliers de volts, même après disparition de la surtension. On a alors le courant de fuite qui ne sera coupé que par isolement de la ligne ou de l'appareil atteint.

II.10.2 Le court-circuit :

Un court-circuit est la disparition intempestive de l'isolant relatif de deux conducteurs de tensions différentes, sans interposition d'une impédance convenable.

Le court-circuit peut être causés par les :

- Installations intérieures : frottement- écrasement - rupture de conducteurs - contact avec le conducteur voisin...etc.
- Lignes aériennes : Le coup de foudre - balancement de conducteurs - chute de branches...etc.
- Lignes souterraines : mouvement de terrain- infiltration d'humidité - coup de pioche...etc.
- Postes : avarie d'un appareil - vieillissement, détérioration ou claquage des isolants.

❖ Les conséquences des surintensités sont :

- La chaleur de l'arc ou celle dépensée dans le contact imprévu, peut faire fondre les métaux environnants, carboniser les isolants et même déclencher les incendies.
- Les efforts électrodynamiques des courants de court-circuit sont très dangereux, les enroulements des transformateurs sont véritablement secoués. Ils peuvent même causer un décalage de galettes.
- L'échauffement de tous les conducteurs traversés par le courant de court-circuit est très important. Il concentre ses effets sur les points faibles comme les bornes des transformateurs.
- Les effets de la chute de tension, s'ils font courir moins de danger au matériel, n'en sont pas moins gênants, la tension devient quasi nulle au voisinage du court-circuit.

II.10.3 Les Surcharges :

Les surcharges sont dues essentiellement à une augmentation de la demande d'énergie, parfois aussi à un dimensionnement incorrect des équipements qui composent les installations électriques. Les surcharges se caractérisent par des courants supérieurs aux courants maximums admissibles. Si ces courants se maintiennent trop longtemps ils peuvent d'une part endommager les matières isolantes et d'autre part provoquer la rupture des conducteurs par suite de la dégradation de leur résistance mécanique.

❖ Les conséquences des surcharges sont :

Un régime de charge des transformateurs au-delà des valeurs indiquées sur la plaque signalétique a les conséquences suivantes :

- Les températures des enroulements, des claquages, des connexions des isolants et de l'huile vont augmenter, et peuvent atteindre des niveaux inacceptables.
- L'induction magnétique du flux de fuite, en dehors du circuit magnétique, augmente et provoque un accroissement de l'échauffement par courants de Foucault dans la partie métallique embrassées par le flux de fuite.

- Comme la température varie, les taux d'humidité et la teneur en gaz dans l'isolation et dans l'huile sont modifiés.
- Les traversées, les changeurs de prises, les connexions d'extrémités de câble et les transformateurs de courants sont également soumis à des contraintes les plus élevées qui réduisent leurs marges de conception et d'application.

Par conséquent il y a un risque de défaillance prématurée lié à l'augmentation des courants et des températures. Ce risque peut être d'un caractère à court terme immédiat ou résulter de l'effet cumulatif du vieillissement thermique de l'isolant du transformateur sur des nombreuses années. [1]

II.11 Protection des transformateurs :

Le transformateur peut être confronté à de nombreux défauts qui peuvent affecter son fonctionnement et provoquer la détérioration et le vieillissement de ses constituants. Ainsi, des mesures de sécurité doivent être mises en place pour assurer le contrôle.

II.11.1 Relais Buchholz :

Le relais Buchholz intervient en cas d'une anomalie au niveau du transformateur. Il est installé sur tous les transformateurs de puissance immergés dans l'huile entre le haut de la cuve et le conservateur. Tout accident interne important se traduit par :

- ✓ un dégagement de gaz, qui fait descendre un flotteur et active une alarme (1^{er} stade),
- ✓ un mouvement d'huile important en partie supérieure de la cuve, où se place le relais, qui fait basculer un flotteur et provoque le déclenchement du transformateur (2^{ème} stade). [4]

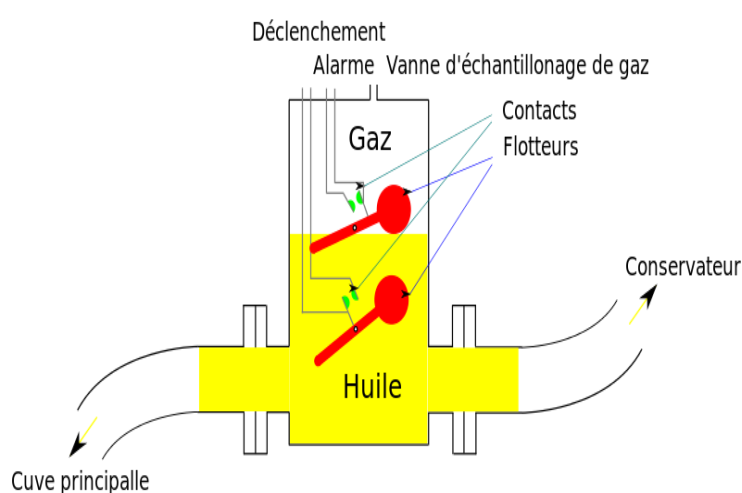


Figure II-26 Relais Buchholz

II.11.2 Thermomètre :

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

II.11.3 L'Assécher d'air :

C'est un équipement qui absorbe l'air qui afflue vers le conservateur d'huile lors du refroidissement du transformateur. On évite ainsi dans une large mesure la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile due à l'humidité de l'air ambiant et une formation de l'eau de condensation dans le conservateur d'huile. Donc l'assécher d'air augmente la sécurité de fonctionnement du transformateur.

II.11.4 Soupape de sécurité :

Elle est sensible à une surpression subite dans la cuve de l'appareil et l'élimine aussitôt grâce à sa rapidité d'ouverture. Elle est placée sur le couvercle du transformateur. Lors d'un incident, la pression d'ouverture est atteinte. La soupape s'ouvre et le diélectrique est éjecté tant que la soupape est ouverte. [1]

II.12 Schéma global d'un transformateur de puissance :

La figure suivante nous donne un récapitulatif de l'ensemble des constituants d'un transformateur de puissance.

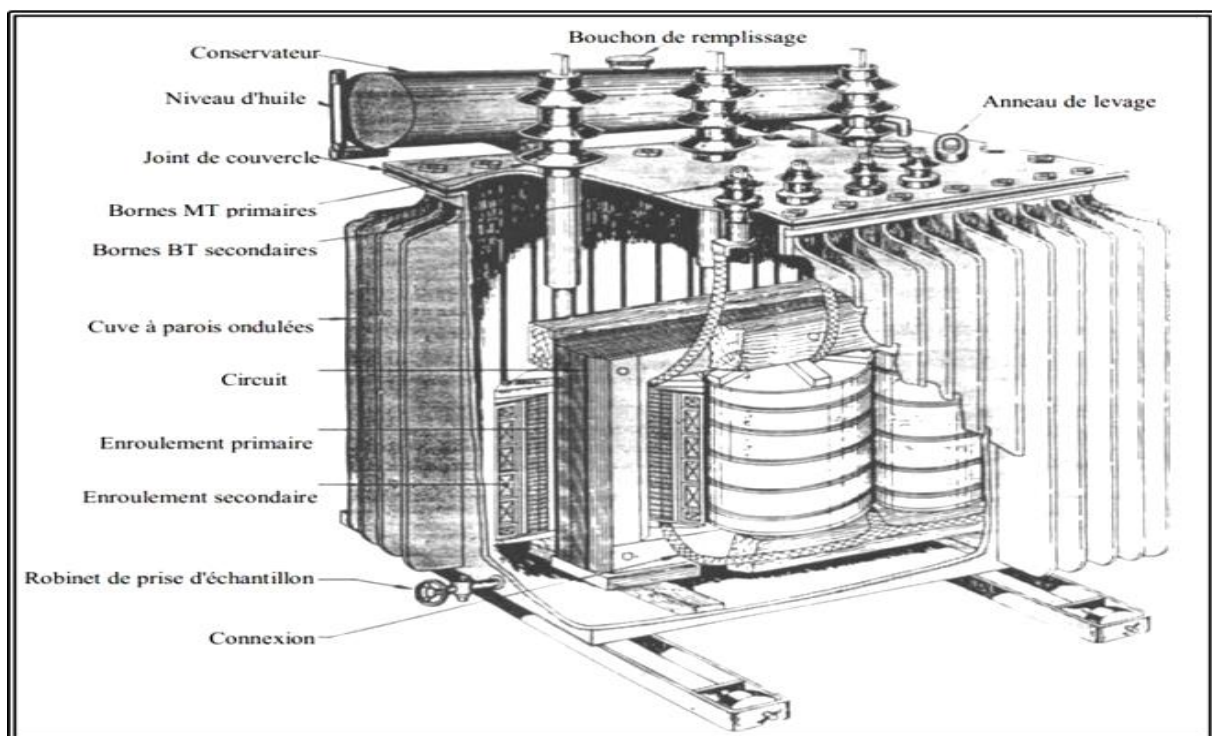


Figure II-27 Schéma global d'un transformateur de puissance

Conclusion :

Du point de vue technologique le transformateur est très simple. Alors que son étude théorique est assez compliquée, car on a affaire à deux circuits indépendants qui fonctionnent à des tensions différentes. Il est très utilisé en électrotechnique car c'est l'appareil de base pour le transport de l'énergie électrique. Il joue également un grand rôle en électronique soit avec un circuit magnétique pour les circuits couplés en haute fréquence.

CHAPITRE III : CALCUL ÉLECTROMAGNÉTIQUE

III.1 Introduction :

Le calcul électromagnétique d'un transformateur nécessite en premier lieu un calcul préliminaire permettant de déterminer à partir du cahier de charge, les dimensions principales, puis un calcul définitif, qui à partir des résultats précédents permet de dimensionner les enroulements, d'établir toutes les caractéristiques géométrique et électromagnétiques du transformateur. Dans ce chapitre, nous allons entamer le dimensionnement du transformateur BT/BT qui nous a été proposé. Ce transformateur sera calculé en conformité avec le cahier de charge ci-dessous.

Puissance nominale : 630 KVA

Tension primaire : 0,4 KV

Tension secondaire à vide : 0,4 KV

Groupe de couplage : Dyn11

Pertes à vide : 1,22 KW

Pertes en charges : 8,4 KW

Température ambiante : 40°C

Tension de court-circuit : Non exigé, du fait que ce transformateur n'est pas directement relié au réseau électrique.

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

Dans ce qui suit, nous calculons les dimensions des différents paramètres électriques et magnétiques d'un transformateur pour une tôle magnétique à grains orientés de 0,3 mm [M150-308]

Dimensionnement commun d'un transformateur avec des tôles magnétiques de 0.3mm d'épaisseur

III.2 Calculs préliminaires des dimensions principales :

Les dimensions principales du circuit magnétique d'un transformateur sont :

- Le diamètre de la colonne D .
- La distance entre colonnes L_f .
- La distance entre culasses H_c .

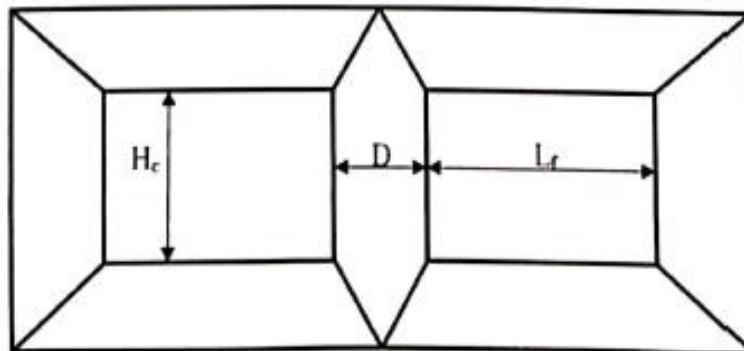


Figure III-1 Dimensions principales d'un transformateur.

Tableau III-1 Tableau de référence

Symbole	Définitions
a1	Epaisseur de l'enroulement primaire
a2	Epaisseur de l'enroulement secondaire
a12	Largeur du canal de fuite
ar	Epaisseur rapportée du canal de fuite
a20	Distance entre la colonne et l'enroulement secondaire
De	Diamètre de la colonne
Dex1	Diamètre extérieur de la bobine primaire
Dex2	Diamètre extérieur de la bobine secondaire
Di1	Diamètre intérieur de la bobine primaire
Di2	Diamètre intérieur de la bobine secondaire
Dm1	Diamètre moyen de la spire primaire
Dm2	Diamètre moyen de la spire secondaire
Lf	Longueur de la fenêtre
Lm1	Longueur moyenne de la spire primaire
Lm2	Longueur moyenne de la spire secondaire
L1	Longueur totale de l'enroulement
HM	Hauteur de montage
Hm	Hauteur magnétique
hc	Hauteur de la fenêtre
Hb1	Hauteur de la bobine primaire
Hb2	Hauteur de la bobine secondaire
Ec	Longueur entre axe des colonnes
Ln	Longueur du noyau
Hn	Hauteur du noyau
a11	Distance entre deux bobines primaire

III.2.1 Puissance apparente par colonne :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_c = S_n / n_c \text{ (KVA)}$$

[III -1]

S_n : Puissance apparente nominale du transformateur ;

n_c : Nombre de colonnes égal à 3.

$$AN: S_c = \frac{630}{3} = 210 \text{ KVA}$$

$$S_c = 210 \text{ KVA}$$

III.2.2 Tension dans les enroulements :

La tension de phase dépend du mode du couplage de l'enroulement. Le couplage de notre transformateur est Dyn11.

Où les lettres :

«D» indique que l'enroulement primaire est couplé en triangle.

«y » indique que l'enroulement secondaire est couplé en étoile.

«n» désigne que le neutre est distribué au niveau du secondaire.

«11» Indique que la tension secondaire est en retard de $\frac{11\pi}{6}$ sur la tension primaire.

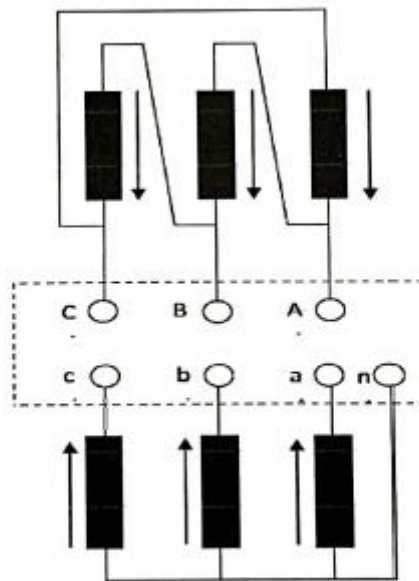


Figure III.2 Couplage des enroulements.

III.2.2.1 Enroulement primaire BT :

La tension de phase de l'enroulement primaire est :

$$U_{ph1} = U_{1n} = 0,4 \text{ KV} \quad [\text{III}-2]$$

$$U_{ph1} = 0,4 \text{ KV}$$

U_{1n} : Tension composée primaire nominale.

U_{ph1} : Tension par phase primaire

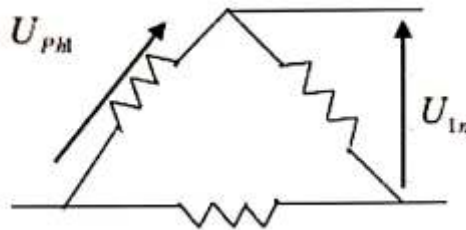


Figure III.3 Couplage de l'enroulement primaire en triangle.

III.2.2.2 Enroulement secondaire (BT) :

La tension de phase de l'enroulement secondaire est :

$$U_{ph2} = \frac{U_{n2}}{\sqrt{3}} \quad [\text{III}-3]$$

U_{n2} = Tension composée secondaire nominale

U_{ph2} = Tension par phase secondaire 400

$$U_{ph2} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ V}$$

$$U_{ph2} = 231 \text{ V}$$

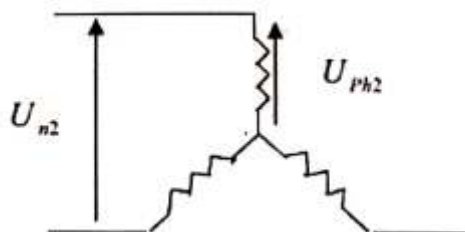


Figure III.4 Couplage de l'enroulement secondaire en étoile.

III.2.3 Courants dans les enroulements :

Le courant nominal dépend du mode de couplage, de la puissance nominale et de la tension appliquée aux bornes de chaque enroulement. [8]

III.2.3.1 Courant dans l'enroulement primaire :

Les courants dans l'enroulement primaire se calculent comme suit :

$$I_{c1} = \frac{S_n}{U_{1n}\sqrt{3}} \quad [\text{III- 4}]$$

$$\text{AN: } I_{c1} = \frac{630.10^3}{400\sqrt{3}} = 909,33A$$

$$\mathbf{I_{c1} = 909,33A}$$

I_{c1} : Courant dans le fil de ligne

$$I_{ph1} = \frac{S_n}{\sqrt{3}.U_{1n}.\sqrt{3}} \quad [\text{III-5}]$$

$$\text{AN: } I_{ph1} = \frac{630.10^3}{\sqrt{3}.400.\sqrt{3}} = 525A$$

$$\mathbf{I_{ph1} = 525A}$$

I_{ph1} : courant de phase primaire.

III.2.3.2 Courant dans l'enroulement secondaire :

Le courant dans l'enroulement secondaire est donné par l'expression suivante :

$$I_{ph2} = \frac{S_n}{\sqrt{3}.U_{2n}} \quad [\text{III-6}]$$

$$\text{AN: } I_{ph2} = \frac{630.10^3}{400\sqrt{3}} = 909,33A$$

$$\mathbf{I_{ph2} = 909,33A}$$

III.2.4 Tension de court-circuit :

La tension de court-circuit est la tension qu'il faut appliquer au primaire d'un transformateur, son secondaire étant court-circuité, afin de faire circuler les courants nominaux primaire et secondaire dans les enroulements. Elle s'exprime en pourcentage de la tension nominale U_{1n} . Elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2} \quad [\text{III-7}]$$

U_{cca} : composante active, elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{cca} = P_{cc} / S_n \times 100[\%] \quad [\text{III-8}]$$

$$\text{AN: } U_{cca} = 8400 / 630000 \times 100 = 1.33 [\%]$$

$$\mathbf{U_{cca} = 1.33 [\%]}$$

U_{ccr} : composante réactive, elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{ccr} = \sqrt{U^2_{cc} - U^2_{cca}} \quad [III-9]$$

$$AN : U_{ccr} = \sqrt{4.7^2 - 1.33^2} = 4.5 \text{ [%]}$$

$$U_{ccr} = 4.5 \text{ [%]}$$

III.2.5. Diamètre et section de la colonne :

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

$$D_c = \sqrt[4]{\frac{16\mu_0 \cdot ar \cdot \beta \cdot Kr \cdot Sc}{\pi^3 \cdot f \cdot K^2 \cdot u \cdot B^2 \cdot c \cdot U_{ccr}}} \quad [III-10]$$

Pour notre calcul la valeur est fixée par (électro industrie).

$$D_c = 194 \text{ mm}$$

III.2.6. Epaisseur rapporté du canal de fuite ar :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$ar = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \quad [III-11]$$

Le terme $\frac{a_1 + a_2}{3}$ est calculé en fonction de la puissance apparente par colonne du transformateur par la relation :

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{Sc} \quad [III-12]$$

K : coefficient donné en fonction de la puissance apparente par colonne et la tension la plus grande.

a₁ : Epaisseur de l'enroulement primaire.

a₂ : Epaisseur de l'enroulement secondaire.

a₁₂ : Largeur du canal de fuite principale ; elle est choisie en fonction de la tension la plus élevée du transformateur ; sa valeur est donnée par le tableau ci-dessous :

Tableau III.2 Largeur de canal de fuite.

Un[kV]	3	8	10	15	20	35	60	170	220
a ₁₂ [cm]	0.6 à 1.5		0.8 à 1.2	1 à 1.5	1.2 à 1.8	2.1 à 2.7	--	6 à 8	13 à 22

Pour des raisons d'ordre pratique l'électro-industrie nous a recommandé d'utiliser une valeur spécifique.

Pour notre travail on a **a₁₂ = 16mm**.

La valeur de K est donnée par le tableau suivant :

Tableau III.3 Valeurs du facteur K des pertes supplémentaires.

Sc [KVA]	<100	100 à 500	760 à 5600	7500 à 31500
K	0.6 à 0.8	0.48 à 0.6	0.4 à 0.5	0.44 à 0.64

D'où notre K = 0.53.

III.2.7. Calcul du diamètre de canal de fuite D12 :

Il est donné par l'expression suivante :

$$D12 = Dc + 2a20 + 2a0 + a12$$

Avec :

$$a20 = 2.5\text{mm pour } Dc \leq 140\text{mm}$$

$$a20 = 3\text{mm pour } 141 \leq Dc \leq 170\text{mm}$$

$$a20 = 4\text{mm pour } 171 \leq Dc \leq 200\text{mm}$$

$$a20 = 5\text{mm pour } 201 \leq Dc \leq 300\text{mm}$$

Pour notre cas on a **a20 = 4mm**

a12 = largeur de canal de fuite qui est égale à **16mm**

a2 = épaisseur de l'enroulement secondaire

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

$$a2 = Ka2 \sqrt[4]{Sc} \quad [III-13]$$

$$Ka2 = 0.55 \text{ pour } Un = 400V$$

$$Ka2 = 0.4 \text{ pour } Un = 110V$$

Ka2 : coefficient dépendant de la tension nominale. Dans notre cas on prend Ka2 = 0.55

$$a2 = 0.55 \sqrt[4]{210} = \mathbf{20.9mm}$$

D'où finalement :

$$D12 = 194 + 2 \times 4 + 2 \times 20.9 + 16 = 259.8\text{mm}$$

$$\mathbf{D12 = 259.8mm}$$

III.2.8. Section du fer :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$Sfer = \frac{\pi D^2}{4} \times Ku \quad [III-14]$$

Pour notre travail cette valeur est fixée pour **Sfer = 259.6mm²**

III.3. Calcul des enroulements :

III.3.1 Calcul de la tension de spire :

Etant donné que le flux magnétique utile passe essentiellement dans le fer de la colonne, la tension de spire du primaire et du secondaire sera la même. Elle est donnée par la relation suivante :

$$U_{sp} = 4.44 \times f \times B \times S_{fer} \quad [III-15]$$

Avec $B = 1.742T$; $S_{fer} = 259.6cm^2$; $f = 50Hz$

$$U_{sp} = 4.44 \times 50 \times 1.742 \times 259.6 \times 10^{-2} = 10.03V$$

$$U_{sp} = 10.03V$$

III.3.2 Calcul du nombre de spires au secondaire :

Le nombre de spire secondaire est exprimé de la façon suivante :

$$N_2 = \frac{U_2}{\sqrt{3} U_{sp}} \quad [III-16]$$

$$AN: N_2 = \frac{400}{10.03\sqrt{3}} = 23 \text{ spires}$$

$$N_2 = 23 \text{ spires.}$$

III.3.3 Calcul du nombre de spires au primaire :

Le nombre de spire primaire se calcule à travers la formule suivante :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{donc : } N_1 = N_2 \cdot \frac{U_1}{U_2} \quad [III-17]$$

Il s'agit d'un couplage triangle-étoile

$$\text{Donc : } U_{1n} = 400V = U_1 \quad \text{et } U_2 = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231V$$

$$AN: N_1 = 23 \times \frac{400}{231} = 39.84 \text{ spires}$$

$$N_1 = 40 \text{ spires.}$$

III.3.4 Recalcule de la tension de spire secondaire :

On a N_2 . $U_{sp} = U_2$

$$U_{sp} = \frac{U_2}{\sqrt{3} N_2} \quad [III-18]$$

$$AN: U_{sp} = \frac{400}{22\sqrt{3}} = 10.04V$$

$$U_{sp} = 10.04V$$

III.3.5 Recalcul de l'induction B :

$$U_{sp} = 4.44 \times f \times B \times S_{fer}$$

$$\rightarrow B = \frac{U_{sp}}{4.44 \times f \times S_{fer}} \quad [III-19]$$

$$A.N : B = \frac{10.04}{4.44 \times 50 \times 259.6 \times 10^{-4}} = 1.742T$$

$$B = 1.742T$$

III.3.6 Calcul des sections des conducteurs :

La section d'un conducteur est donnée par l'expression suivante :

$$S = \frac{I}{J_m} \text{ [mm}^2\text{]} \quad [III-20]$$

Où on désigne par :

S : section du conducteur en (mm²)

I : intensité du courant en (A)

J_m : densité moyenne du courant en (A/mm²)

III.3.6.1 Calcul de densité du courant :

$$J_m = \frac{P_{cc} \times U_{sp}}{2\pi \times \rho_t \times K_{pcc} \times S_n \times D_{12}} \quad [III-21]$$

Avec :

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha(T - 20)] \text{ [}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}\text{]}$$

ρ_t : résistivité du cuivre à la température considéré

ρ_{20} : résistivité du cuivre à 20°C avec $\rho_{20} = 0.0178 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

α : coefficient de température avec $\alpha = 3.81 \times 10^{-3}$

T : température moyenne de fonctionnement est 75 °C.

K_{pcc} : facteur tenant compte des pertes supplémentaires, il est en fonction de la puissance apparente du transformateur sa valeur est donnée par le tableau ci-dessous :

Tableau III.4 Valeurs du facteur K_{pcc}.

Sn[KVA]	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000
	1.02	1.025	1.05	1.06	1.07	1.075	1.08	1.09

Pour une puissance de 630KVA on prend K_{pcc} = 1.05

$$\text{Donc : } \rho_{75} = 0.0178 \cdot [1 + 3.81 \times 10^{-3}(75 - 20)] = 0.0215$$

$$J_m = \frac{8400 \times 10.04}{2\pi \times 0.0215 \times 1.05 \times 630 \times 10^{-3} \times 259.8 \times 10^{-3}} = 3.6 \text{ A/mm}^2$$

$$J_m = 3.6 \text{ A/mm}^2$$

Cette Valeur est acceptable, vu que la valeur maximale admissible de la densité moyenne de courant de cuivre est 4.5 A/mm² pour un transformateur immergé dans l'huile.

$$J_m = 3.6 < 4.5 \quad (\text{D'après Electro-industrie})$$

III.3.6.2 Tableau des dimensions des enroulements méplats :

A : épaisseur du conducteur en (mm).

B : largeur du conducteur en (mm).

En dessous du trait fort, prévoir une isolation de 0.45mm.

En dessous du trait fort, prévoir une isolation de 0.50mm.

Tableau II.5 Dimensions des conducteurs méplats

A/B	4.5	5.0	5.6	6.3	7.1	8.0	9.0	10.0	11.2	11.8	125.5	13.2	14.0	15.0	16
1.00			5.4	6.1	6.9										
1.12			6.1	6.8	7.78										
1.25	5.4	6.0	6.8	7.7	8.7										
1.40	6.1	6.8	7.6	8.6	9.7	11.0									
1.60	7.0	7.8	8.7	9.9	11.2	12.6									
1.80	7.7	8.6	9.7	11.0	12.4	14.0	15.8								
2.00	8.6	9.6	10.8	12.2	13.8	15.6	17.6								
2.24	9.7	10.8	12.2	13.8	15.5	17.6	19.8	22.0							
2.50		12.0	13.5	15.2	17.1	19.4	22.0	24.4							
2.80		13.4	15.5	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		
4.00				24.8	27.5	31.1	35.1	39.1	43.9	46.3	49.1	51.9	55.1	59.1	63.1
4.50					31.1	35.1	39.6	44.1	49.5	52.2	55.4	58.5	62.1	66.6	71.1
5.00					34.6	39.1	43.9	49.1	55.1	58.1	61.6	65.1	69.1	74.4	79.1
5.60						43.9	49.5	55.1	61.9	65.2	69.1	73.1	77.5	83.1	88.7
6.30						49.1	55.4	61.7	69.2	73.0	77.4	81.8	86.9	93.2	99.5
7.10							62.6	69.7	78.2	82.4	87.4	92.4	98.1	105	112.0
8.00									88.3			104	111.0	119	127.0
8.50											105.0		118.0		135.0

III.3.6.3 Les sections des conducteurs au secondaire :

a. La section :

Avec $I_{ph2} = 909.33 \text{ A}$

$$S_2 = \frac{I_{ph2}}{J_m} \quad [\text{III-22}]$$

$$\text{A.N : } S_2 = \frac{909.33}{3.6} = 252.59 \text{ mm}^2$$

On prend un fil méplat sur plane de dimensions :

$$\begin{cases} B2 = 12.5mm \\ B'2 = 13.2mm \end{cases} \begin{cases} A2 = 7.1mm \\ A'2 = 7.1mm \end{cases}$$

Qui convient avec une section de $259.6mm^2$

$$S2 = 259.6mm^2$$

b. Recalcule de la densité J2 :

$$S2 = \frac{I_{ph2}}{J2} \quad \text{donc} \quad J2 = \frac{I_{ph2}}{S2} \quad [III-23]$$

$$J2 = \frac{909.33}{367.3} = 3.4A/mm^2$$

c. Calcul de l'erreur relative de la densité :

$$\frac{\Delta j}{j} = \frac{j_m - j_2}{j_m} \times 100 \quad [III-24]$$

$$AN: \frac{3.6 - 3.4}{3.6} \times 10$$

$$\frac{\Delta j}{j} = 5.55\%$$

III.3.6.4 Les sections des conducteurs au primaire :

a. La section :

$$S1 = \frac{I_{ph1}}{J1} \quad [III-25]$$

$$A.N : S1 = \frac{525}{3.4} = 154.41mm^2$$

On prend un fil méplat sur plane de dimensions :

$$\begin{cases} B1 = 11.2mm \\ A1 = 8mm \end{cases}$$

Qui convient avec une section de $176.6mm^2$

$$S1 = 176.6mm^2$$

b. Recalcule de la densité :

$$S1 = \frac{I_{ph1}}{J1} \quad \text{donc} \quad J1 = \frac{I_{ph1}}{S1} \quad [III-26]$$

$$J1 = \frac{525}{176.6} = 2.97 \text{ A/mm}^2$$

$$J1 = 2.97 \text{ A/mm}^2$$

c. Calcul d'erreur relative de la densité :

$$\frac{\Delta j}{j} = \frac{j_m - j}{j_m} \times 100 \quad [\text{III-27}]$$

$$\frac{\Delta j}{j} = \frac{3.8 - 2.97}{3.8} \times 100 = 21.84\%$$

$$\frac{\Delta j}{j} = 21.84\%$$

III.4 Calcul des hauteurs des bobinage :

Les hauteurs de bobinage de l'enroulement primaire est égale à la hauteur magnétique. Elle doit être au maximum égale à la hauteur de l'enroulement magnétique.

III.4.1 Hauteur de bobinage au secondaire :

(Bobinage sur plane)

$$Hb2 = (2B2 + B'2 + 3 \times 0.5) \left(\frac{N2}{2} + 1 \right) \quad [\text{III-28}]$$

$$\text{A.N: } hb2 = (2 \times 12.5 + 13.2 + 3 \times 0.5) \left(\frac{23}{2} + 1 \right) = 496.25 \text{ mm}$$

$$Hb2 = 496.25 \text{ mm}$$

On déduit la hauteur magnétique qui est égale à la hauteur de bobinage diminuée d'une spire :

$$hm2 = (2B2 + B'2 + 3 \times 0.5) \left(\frac{N2}{2} \right) \quad [\text{III-29}]$$

$$\text{A.N: } hm2 = (2 \times 12.5 + 13.2 + 3 \times 0.5) \left(\frac{23}{2} \right)$$

$$hm2 = 456.55 \text{ mm}$$

III.4.2 Hauteur de bobinage au primaire :

(Bobinage sur plane)

$$Hb1 = (2B1 + 2 \times 0.5) \left(\frac{N1}{2} + 1 \right) \quad [\text{III-30}]$$

$$\text{A.N: } hb1 = (2 \times 11.2 + 2 \times 0.5) \left(\frac{40}{2} + 1 \right) = 491.4 \text{ mm}$$

$$Hb1 = 491.4 \text{ mm}$$

On déduit la hauteur magnétique qui est égale à la hauteur de bobinage diminuée d'une spire :

$$Hm1 = (2B1 + 2 \times 0.5) \left(\frac{N^2}{2} \right) \quad [III-31]$$

$$A.N: hm1 = (2 \times 11.2 + 2 \times 0.5) \left(\frac{40}{2} \right)$$

$$hm1 = 468 \text{ mm}$$

III.4.3 Calcul de la hauteur du montage :

$$hm = hb1 + 2d \quad [III-32]$$

Avec $hm = 506 \text{ mm}$ donnée par électro-industrie

$$d = \frac{hm - hb1}{2}$$

$$A.N : d = \frac{506 - 491.4}{2}$$

$$d = 7.3 \text{ mm}$$

III.4.4 Dimensionnement de la cale de progression :

On utilise une cale de progression à chaque extrémité des bobines base tension. Cette cale est en papier dur. Elle a deux cotés différents : b_1 et b_2 . On utilise uniquement dans le bobinage basse tension.

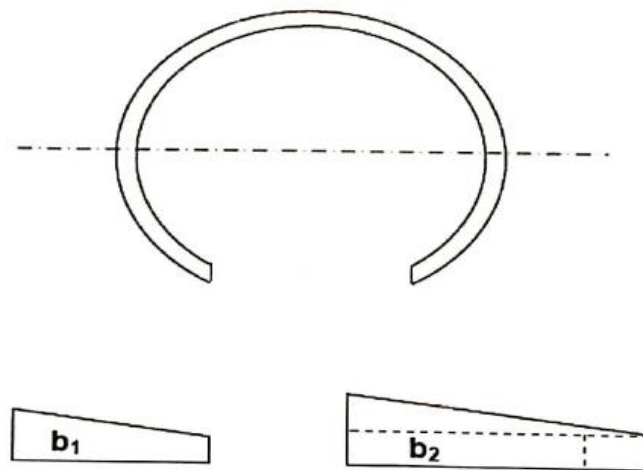


Figure III.5 Cale de progression

a. Pour le secondaire :

$$B1s = \frac{hm - hb2}{2} \quad [III-33]$$

$$A.N : b1s = \frac{506-496.25}{2}$$

$$b1s = 4.875mm$$

$$b2s = b1s + 2(B2 + 0.5) \quad [III-34]$$

$$A.N : b2s = 4.875 + 2(12.5 + 0.5)$$

$$b2s = 30.875mm$$

b. Pour le primaire :

$$b1p = \frac{hm - hb1}{2} \quad [III-35]$$

$$A.N : b1p = \frac{506 - 491.4}{2}$$

$$b1p = 7.3mm$$

$$b2p = b1p + 2(B1 + 0.5) \quad [III-36]$$

$$A.N : b2p = 7.3 + 2(11.2 + 0.5)$$

$$b2p = 30.7mm$$

b1p et b1s : sont des largeurs inférieures des cales.

b2p et b2s : sont des largeurs supérieures des cales.

Les cales de progression sont en papier dur ; b1p et b2p doivent être $\geq 4mm$ (norme donnée par Electro-Industrie) dont le but d'avoir une bonne tenue mécanique et un bon serrage.

III.5 Calcul définitif des épaisseurs des enroulements :

a. Epaisseur de l'enroulement primaire :

$$a1 = (A1 + 0.5) \times 2 + 1.5 + 5 \quad [III-37]$$

$$A.N : a1 = (8 + 0.5) \times 2 + 1.5 + 5$$

$$a1 = 23.5mm$$

A1 : épaisseur du conducteur au primaire.

b. Epaisseur de l'enroulement secondaire :

$$a2 = (A2 + 0.5) \times 2 + 1.5 + 5 \quad [III-38]$$

$$A.N : a2 = (7.1 + 0.5) \times 2 + 1.5 + 5$$

$$a2 = 21.5mm$$

A2 : épaisseur du conducteur au secondaire.

L'isolation des enroulements primaire et secondaire est fait avec du papier presspahn (PSP) de **0.5mm** d'épaisseur.

III.6 Dimensionnement radial des enroulements :

III.6.1 Diamètre intérieur de la bobine secondaire :

$$Di2 = Dc + 2a20 \quad [III-39]$$

$$A.N : Di2 = 194 + 2 \times 4 = 202mm$$

$$Di2 = 202mm$$

III.6.2 Diamètre extérieur de la bobine secondaire :

$$Dex2 = Di2 + 2a2 \quad [III-40]$$

$$A.N : Dex2 = 202 + 2 \times 21.5 = 245mm$$

$$Dex2 = 245mm$$

III.6.3 Diamètre inférieur de la bobine primaire :

$$Di1 = Dex2 + (2 \times a12) \quad [III-41]$$

$$Di1 = 245 + (2 \times 16) = 277mm$$

$$Di1 = 277mm$$

III.6.4 Diamètre extérieur de la bobine primaire :

$$Dex1 = Di1 + (2 \times a1) \quad [III-42]$$

$$A.N : Dex1 = 277 + (2 \times 23.5) = 324mm$$

$$Dex1 = 324mm$$

III.7 Calcul définitif de l'épaisseur rapporté de canal de fuite ar :

$$ar = a12 + \frac{a1 + a2}{3} \quad [III-43]$$

$$A.N : ar = 16 + \frac{235.5 + 21.5}{3} = 31mm$$

$$Ar = 31mm$$

III.8 Dimensionnement du circuit magnétique :

Les colonnes et les culasses ont une même section. Elle est de forme circulaire, étant données avantages par rapport à une section carré ou rectangulaire. Pour se rapprocher de cette forme, on a recours à un empilage de tôles sous forme de gradins.

III.8.1 Nombre et dimensions des gradins :

Le nombre des gradins nécessaire pour une puissance $Sc = 210KVA$ et de 6.

Les normes donnent les valeurs suivantes pour des longueurs des gradins (B_{si}) et pour déterminer les hauteurs des gradins (H_{si}), on doit appliquer le théorème de Pythagore :

$$H_{si} = \sqrt{D^2 - B_{si}^2} \quad [III-44]$$

$$B_{s1} = 180\text{mm} \quad H_{s1} = 72\text{mm}$$

$$B_{s2} = 160\text{mm} \quad H_{s1} = 110\text{mm}$$

$$B_{s3} = 140\text{mm} \quad H_{s1} = 134\text{mm}$$

$$B_{s4} = 120\text{mm} \quad H_{s1} = 152\text{mm}$$

$$B_{s5} = 100\text{mm} \quad H_{s1} = 166\text{mm}$$

$$B_{s6} = 60\text{mm} \quad H_{s6} = 184\text{mm}$$

La figure ci-dessous nous montre la représentation schématique des gradins :

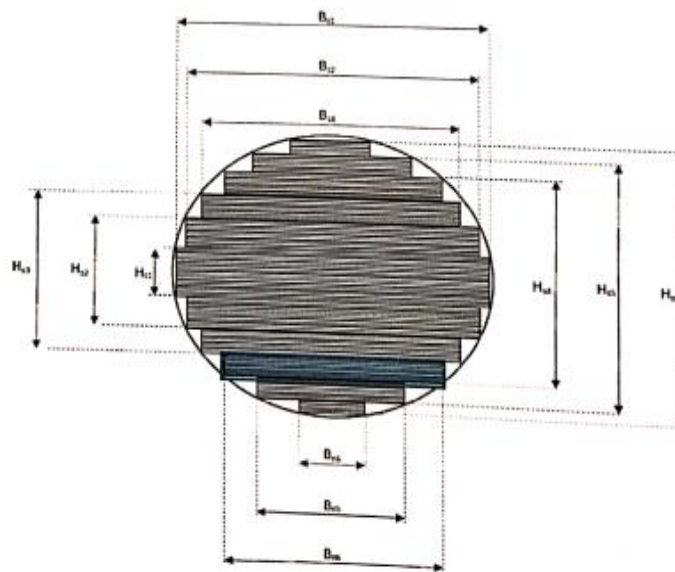


Figure III.6 Représentation des gradins.

III.8.2 Longueur de la fenêtre :

$$L_f = D_{ex1} - B_{s1} + a_{11} \quad [III-45]$$

B_{s1} : longueur de premier gradin.

a_{11} : distance latérale entre deux enroulements moyenne tension voisins, sa valeur est égale à 46mm, donnée par Electro-Industrie. (**$a_{11} = 61\text{mm}$**).

$$A.N : L_f = 324 - 180 + 61 = 205\text{mm}$$

$$L_f = 205\text{mm}$$

III.8.3 Hauteur de la fenêtre :

$$H_c = H_m + 2C \quad [III-46]$$

Avec :

H_m : la hauteur du montage qui est égale à 506mm

C : la distance entre la hauteur de montage et la hauteur de fenêtre ($C = 7\text{mm}$).

Ces valeurs sont données par Electro-Industrie.

$$A.N : H_c = 506 + 2 \times 7 = 520\text{mm}$$

$$H_c = 520\text{mm}$$

III.8.4 Hauteur du noyau :

$$H_n = H_c + 2 \times B_{s1} \quad [III-47]$$

$$A.N: H_c = 520 + 2 \times 180 = 880\text{mm}$$

$$H_c = 880\text{mm}$$

III.8.5 Longueur entre axes des colonnes :

$$E_c = L_f + B_{s1} \quad [III-48]$$

$$A.N: E_c = 205 + 180 = 385\text{mm}$$

$$E_c = 385\text{mm}$$

III.8.6 Longueur de noyau :

$$L_n = 2 \times E_c + B_{s1} \quad [III-49]$$

$$A.N: 2 \times 385 + 180 = 950\text{mm}$$

$$L_n = 950\text{mm}$$

III.8.7 Section de la culasse :

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

$$S_{cu} = S_{fer} + (S_{fer} \times 0.15) \quad [III-50]$$

$$A.N: S_{cu} = 259.6 + (259.6 \times 0.15) = 298.45\text{cm}^2.$$

$$S_{cu} = 298.45\text{cm}^2$$

III.8.8 Induction dans la culasse :

On calcule l'induction dans la culasse avec la loi de conservation du flux.

On a :

$$B_{cu} \times S_{cu} = B_{fer} \times S_{fer} \quad [III-51]$$

$$B_{cu} = \frac{S_{fer}}{S_{cu}} \times B_{fer}$$

$$A.N : B_{cu} = \frac{259.6}{298.45} \times 1.742 = 1.51T$$

$$B_{cu} = 1.51T$$

Pour mieux appréhender les différentes dimensions des colonnes et de la partie active du transformateur, les figures suivantes sont données.

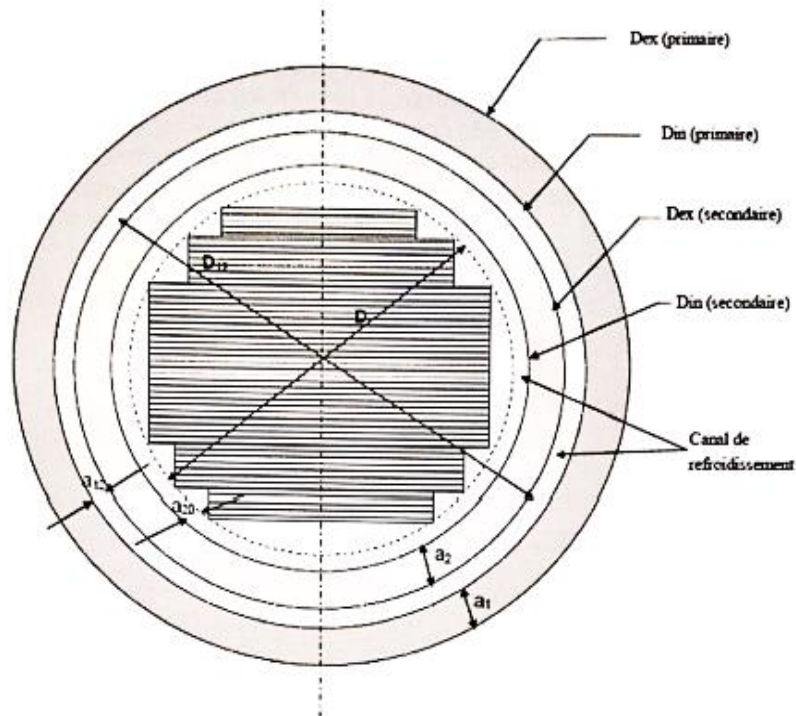


Figure III.7 Coupe générale de la colonne.

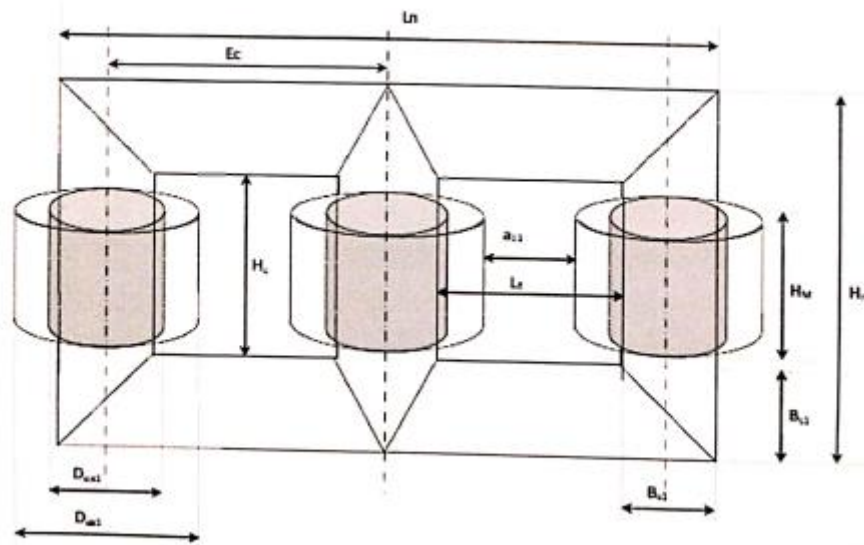


Figure III.8 Représentation de la partie active.

Conclusion :

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

CHAPITRE IV : Etude théorique des essais électriques

IV.1 Introduction :

Les surtensions dans le réseau peuvent être dues aux modifications brutales des caractéristiques du transformateur telle que l'exploitation, rupture de mise à la terre. A la suite de quelques mesures et d'une expérience déjà longue, on a convenu d'étudier la tenue des matériels à l'onde de choc, en leur appliquant des ondes de tension unidirectionnelles (positive ou négative). Dans ce chapitre on va baser sur l'étude des essais électriques.

IV.2 Généralités :

Tout transformateur neuf doit pouvoir obligatoirement subir en fin de fabrication tous les essais électriques individuels dits essais de routine pour nous permettre de vérifier les caractéristiques électriques à savoir :

- Mesure de la résistance des enroulements
- Mesure du rapport de transformation et vérification du couplage des enroulements.
- Mesure des pertes et du courant à vide.
- Mesure des pertes dues à la charge et la tension de court-circuit.
- Epreuves diélectriques.

a. Par la tension appliquée à fréquence industrielle.

b. Par la tension induite [11].

Dans certains cas particuliers et s'agissant notamment d'un prototype, il est fait mention d'essais supplémentaires autant dire complémentaires appelés essais de type tels que définis par les normes en vigueur (CEI 60076-2011) à savoir :

- Essais d'échauffements.
- Essais de tenue aux chocs de foudre.

Ces essais de type sont effectués sur un transformateur représentatif d'un lot de transformateurs du même type (même puissance), destinés à montrer que ces derniers satisfont aux conditions spécifiées par les normes citées ci-dessus.

- Les essais sont effectués dans les ateliers, au niveau du banc d'essais électriques. La température ambiante doit être comprise entre 10°C et 40°C.
- Tous les éléments constitutifs et les accessoires extérieurs susceptibles d'influer sur le fonctionnement du transformateur doivent être mis en place.
- Le commutateur doit être sur sa position nominale. Dans le cas des transformateurs à prises multiples par exemple, avec un réglage de $\pm 2 \times 2,5\%$, il est intéressant d'effectuer certaines mesures sur les prises extrêmes.
- L'ordre des essais n'est pas très important sauf en ce qui concerne les mesures de perte en court-circuit qui doivent toujours être effectuées après les mesures de résistances (Problème d'élévation de température liée au passage du courant dans les enroulements).

IV.3 Description d'un banc d'essais :

IV.3.1 Définition des tâches :

Le banc d'essais des transformateurs est dimensionné pour contrôler en série des transformateurs à bain d'huile, avec puissance en allant de 25kVA à 1600kVA, des tensions allant de 3 kV à 36 kV et une tension de court-circuit allant jusqu'à 6% à une fréquence de 50Hz.

Les contrôles seront effectués selon la directive CEI 60076, EDITION 2011, conformément à celle-ci, nous avons :

- Le contrôle des enroulements, côté haute tension et basse tension ;
- La mesure de la résistance.
- Le contrôle des spires.
- La mesure du rapport de transformation.
- La mesure à vide.
- La mesure en charge.

On pourra en outre effectuer dans le cas particulier, le contrôle de l'échauffement.

IV.3.2 Construction mécanique générale :

On trouvera dans l'espace la disposition, des machines, des armoires de distribution et des postes de contrôle avec leurs points de mesure ainsi que celle des pupitres de mesure et de commande. Le banc d'essais se compose, des équipements suivants :

- a. Deux postes de contrôle.
- b. Une cabine de mesure.
- c. Une salle des machines et des installations de distribution.

IV.4 Essais individuels :

IV.4.1 Epreuve diélectrique ou essai d'isolement par tension appliquée à fréquence industrielle :

L'essai par tension appliquée doit être effectué avec une tension alternative monophasée de forme aussi proche que possible de la forme sinusoïdale et à toute fréquence appropriée au moins égale à 80% de la fréquence nominale de 50Hz.

On mesure la valeur de crête de la tension. La valeur de crête divisée par la racine carrée de 2 doit être égale à la valeur d'essai.

L'essai doit commencer à une tension égale au maximum au tiers de la valeur d'essai spécifiée et la tension est portée à la valeur d'essai rapidement que le permet la mesure. A la fin de l'essai, on réduit rapidement la tension à une valeur inférieure au tiers de la valeur d'essai avant de la couper.

La pleine tension d'essai doit être appliquée pendant 60S entre l'enroulement en essai et toutes les bornes des autres enroulements, le circuit magnétique, le bâti et la cuve, reliés ensemble à la terre.

Le but de l'essai est de vérifier la tenue à fréquence industrielle de l'enroulement en essai par rapport à la masse et aux autres enroulements. Par conséquent l'essai est déclaré satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

IV.4.2 Mesure du rapport de transformation et vérification du groupe de couplage :

La vérification du groupe de couplage et la mesure du rapport de transformation sont effectuées sur chaque prise à l'aide d'un pont de mesure de rapport de transformation pendant l'essai à vide. La mesure consiste, dans son principe, à rechercher une tension primaire (simple ou composé) en phase avec une tension secondaire (simple ou composé) et d'en comparer les modules.

Le rapport de transformation est mesuré à 0,5% près sur la prise principale.

IV.4.3 Mesure de la résistance des enroulements :

La mesure de la résistance entre phases est effectuée par la méthode volt-ampérométrique, ou à l'aide d'un pont de THOMSON. On doit noter la résistance de chaque enroulement, les bornes entre lesquelles elle est mesurée et la température des enroulements.

La mesure doit être effectuée en courant continu.

Dans toutes les mesures de résistance, on doit veiller à réduire au minimum les effets de l'auto-induction par la stabilisation du courant.

IV.4.4 Epreuve diélectrique par tension induite ou essai entre spires :

On doit appliquer une tension alternative aux bornes d'un enroulement sans prises du transformateur. La forme de la tension doit être aussi proche que possible de la forme sinusoïdale et sa fréquence doit dépasser suffisamment la fréquence nominale pour éviter un courant magnétisant excessif au cours de l'essai.

La tension d'essai aux bornes d'un enroulement sans prises (secondaire) du transformateur doit être égale à deux fois la valeur de la tension assignée.

L'essai doit commencer à une tension égale au maximum au tiers de la valeur d'essai cette tension est portée à la valeur d'essai aussi rapidement que le permet la mesure. A la fin de l'essai, on réduit rapidement la tension à une valeur d'essai avant de la couper.

La durée de l'essai à la pleine tension d'essai est de 60S pour toute fréquence d'essai inférieure ou égale à deux fois la fréquence assignée. Lorsque la fréquence d'essai dépasse le double de la fréquence assignée, la durée de l'essai doit être de :

$$t_e = \frac{60S \times \text{fréquence assignée}}{\text{fréquence d'essai}} \text{ (Secondes)} \quad (IV.1)$$

Avec un minimum de 15s.

Cet essai a pour but de vérifier la tenue diélectrique le long de l'enroulement essayé et entre ses phases. Par conséquent, l'essai est déclaré satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

IV.4.5 Mesure des pertes et du courant à vide :

Les mesures des pertes et du courant à vides sont effectuées à la fréquence nominale de 50Hz et sous une tension égale à la tension nominale.

La tension appliquée doit être de forme aussi proche que possible de la forme sinusoïdale. La tension est appliquée aux bornes du secondaire, le primaire étant resté à circuit ouvert.

La méthode utilisée pour mesurer les pertes est celle de deux wattmètres est c'est une méthode classique, et pour mesurer le courant à vide on place sur chaque phase un ampèremètre.

IV.4.6 Mesure de la tension de court-circuit et des pertes dues à la charge :

IV.4.6.1 Procédé d'essai :

La tension de court-circuit et les pertes dues à la charge doivent être mesurées à la fréquence nominale de 50 Hz. Une tension pratiquement sinusoïdale étant appliquée aux bornes du primaire, les bornes du secondaire étant court-circuitées. Le courant d'alimentation doit être au moins égal à 50% du courant nominal.

La valeur mesurée des pertes dues à la charge doit être multipliée par le carré du rapport du courant nominal au courant d'essai. La valeur ainsi obtenue doit être ramenée à la température de référence appropriée.

Les pertes par effet joule RI^2 (R étant la résistance en courant continu) varient en raison direct et les autres pertes en raison inverse de la résistance de l'enroulement (CE176-1 p66/VDE532-1p63).

• Calcul des corrections de température :

1-A la température ambiante :

$$U_{cc\ amb} = U_{mesurée} \left(\frac{I_{nominal}}{I_{mesurée}} \right)$$

$$U_{cc\ amb} = P_{cc\ mesurée} \left(\frac{I_{nominal}}{I_{mesurée}} \right)^2$$

2- A la température de référence :

Les pertes joules (PJ) varient en raison directe et les autres pertes (PS) en raison inverse de la résistance

Si la température de référence est 75°C, la mesure étant faite à la température ambiante ;

$$P_{cc20^{\circ}C} = P_{j20^{\circ}C} + P_s\ t^{\circ}amb$$

$$P_{cc75^{\circ}C} = K\ P_{j20^{\circ}C} + (1/K)\ P_s\ t^{\circ}amb$$

$t^{\circ}amb$: température ambiante.

$$\text{Avec } K (\text{pour le cuivre}) = \frac{235 + 75}{235 + t^{\circ}amb}$$

La tension de court-circuit (U_{cc}) a une composante réactive (U_x) indépendante de la température et une composante résistive (U_r) qui évolue proportionnellement aux pertes en court-circuit (P_{cc})

En valeurs réduites aux grandeurs nominales, on peut écrire :

$$(U_{cc} \%)^2 = (U_r \%)^2 + (U_x \%)^2$$

$$U_r \% = \frac{P_{cc} \times 100}{SN}$$

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

$$\text{On peut avoir : } (U_x \%)^2 = (U_{cc} \%)^2 - (U_r \%)^2$$

$$\text{À } t^{\circ} \text{ amb : on aura : } (U_x \% t^{\circ} \text{ amb})^2 = (U_{cc} \% t^{\circ} \text{ amb})^2 - (U_r \% t^{\circ} \text{ amb})^2$$

$$\text{À } 75^{\circ} \text{C : on aura : } (U_x \% 75^{\circ} \text{C})^2 = (U_{cc} \% 75^{\circ} \text{C})^2 - (U_r \% 75^{\circ} \text{C})^2$$

Puisque U_x est indépendant de la température, donc on aura :

$$(U_x \% t^{\circ} \text{ amb})^2 = (U_x \% 75^{\circ} \text{C})^2$$

Implique que :

$$(U_{cc} \% 75^{\circ} \text{C})^2 - (U_r \% 75^{\circ} \text{C})^2 = (U \% t^{\circ} \text{ amb})^2 - (U_r \% t^{\circ} \text{ amb})^2$$

Ce qui nous donne :

$$(U_{cc} \% 75^{\circ} \text{C}) = \sqrt{(U_{cc} \% t^{\circ} \text{ amb})^2 - (U_r \% t^{\circ} \text{ amb})^2 + (U_r \% 75^{\circ} \text{C})^2}$$

Finalement :

$$(U_{cc} \% 75^{\circ} \text{C}) = 100 \sqrt{\left(\frac{U_{cc} t^{\circ} \text{ amb}}{100}\right)^2 - \left(\frac{P_{cc} t^{\circ} \text{ amb}}{S_n}\right)^2 + \left(\frac{P_{cc} 75^{\circ} \text{C}}{S_n}\right)^2}$$

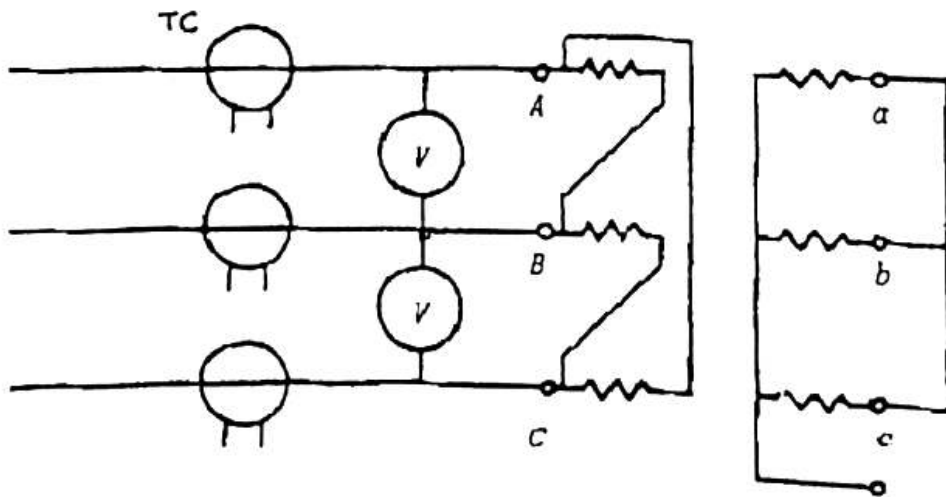


Figure IV-1 Représentation schématique de l'essai en court-circuit (méthode de deux wattmètres)

IV.5 Essai de types :

IV.5.1 Essai d'échauffement :

• Procédé d'essai :

Pour des raisons pratiques, la méthode normalisée de la détermination, en usine de l'échauffement en régime établi des transformateurs immergés dans l'huile est équivalent à l'essai en court-circuit.

La méthode d'essai préconisée est dite <essai par méthode de court-circuit au régime établi (CE176-2p20/VDE532-1p72)>, durant cet essai, le transformateur n'est pas soumis à la tension assignée et au courant assigné simultanément mais aux pertes totales calculées, préalablement obtenues par deux déterminations séparées des pertes, c'est-à-dire les pertes dues à la charge, à la température de référence et les pertes à vide.

Le but de l'essai est double :

- A- Etablir l'échauffement de l'huile au sommet en régime établi avec dissipation des pertes totales.
- B- Etablir l'échauffement moyen des enroulements au courant assigné, compte tenue de l'échauffement de l'huile au sommet établi comme ci-dessus, cela est réalisé en deux étapes :

A-Injection des pertes totales :

En premier lieu les échauffements de l'huile au sommet et de l'huile moyenne sont déterminés quand le transformateur est soumis à une tension d'essai ; telle que la puissance active mesurée est égale aux pertes totales du transformateur.

Le courant d'essai excédera le courant nominal de la valeur nécessaire pour produire un excédent de pertes égale aux pertes à vide et l'échauffement des enroulements sera accru de la valeur correspondante.

Les températures de l'huile et de l'air de refroidissement sont surveillées et relevées toutes les heures, l'essai est poursuivi jusqu'à ce qu'un échauffement de l'huile en régime établi soit atteint.

L'essai peut être terminé lorsque le taux de variation l'échauffement de l'huile au sommet est tombé en dessous de 1°C par heure et est resté en dessous de ce seuil pendant une période de 3h.

B-Injection du courant nominal :

Quand l'échauffement de l'huile au sommet a été déterminé, l'essai doit continuer immédiatement avec un courant d'essai ramené au courant nominal. Cette condition d'essai sera maintenue durant 1h avec observation continue des températures de l'huile et de l'air de refroidissement.

A la fin de l'heure, les résistances des enroulements sont mesurées après une déconnexion rapide de l'alimentation et des courts-circuits, un circuit de mesure en courant continu est alors raccordé aux bornes de chaque enroulement de phase à mesurer.

L'enroulement a une constante de temps électrique L/R élevée. C'est pourquoi des lectures précises ne sont obtenus qu'après un certain laps de temps (chute de tension inductive dans les enroulements avant stabilisation du courant continu de mesure).

La résistance de l'enroulement varie avec le temps puisque l'enroulement se refroidit, celle-ci doit être mesurée pendant un temps suffisant (20mn environs) et à intervalles de temps

égaux (un relevé toutes les minutes) pour permettre l'extrapolation en remontant jusqu'à l'instant de la coupure.

La température de l'air de refroidissement doit être mesurée à l'aide de plusieurs thermomètres (au moins 3) répartis en différent point autour du transformateur à une distance de 1 à 2m et placé à la mi-hauteur environ de la surface de refroidissement.

La valeur adoptée, pour la température de l'air de refroidissement, est la moyenne des lectures faites sur ce thermomètre à intervalles de temps égaux pendant le dernier quart de la durée de l'essai.

Détermination de la température moyenne d'huile :

La température de l'huile à la partie supérieure est déterminée par un ou plusieurs capteurs immergés dans l'huile au sommet de la cuve ou dans des doigts gants dans le couvercle.

La température moyenne de l'huile est obtenue en retranchant de la température de l'huile à la partie supérieure, la température de l'air de refroidissement à l'instant de la coupure de l'alimentation :

$$\Delta \text{Huile } \theta = \theta_e - \theta_0$$

Avec : θ_e = température d'huile en régime établi

θ_0 = température ambiante à l'instant de la coupure de l'alimentation

• Détermination de la température moyenne des enroulements :

La température moyenne des enroulements est déterminée par la mesure de la résistance des enroulements.

Dans un transformateur triphasé, il convient d'effectuer la mesure de préférence sur la colonne du milieu.

Le rapport entre la valeur de résistance R_2 à la température θ_2 mesurée en régime établi, et une mesure de référence R_1 à θ_1 des résistances des enroulements faites lorsque le transformateur est à température ambiante est donnée par :

$$\text{Pour le cuivre : } \frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1} \quad \text{d'où} \quad \theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \theta_1) - 235 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

La température moyenne de l'enroulement est alors finalement :

$$\Delta \theta_{enr} = \theta_2 - \theta_0$$

Avec θ_2 : Température de l'enroulement à l'instant de la coupure de l'alimentation

IV.5.2 Essai de tenue aux chocs de foudre :

Un choc est une tension ou un courant transitoire apériodique appliqué intentionnellement qui habituellement croît rapidement jusqu'à une valeur de crête, puis décroît plus lentement jusqu'à zéro

Les chocs dont les durées du front vont jusqu'à 20µs sont considérés comme étant des chocs de foudre, contrairement à ceux qui ont une durée de front plus longue comme étant des chocs de manœuvre.

La valeur de la tension d'essai est pour un choc de foudre exempt d'oscillation, c'est la valeur de crête.

La durée du front d'un choc de foudre est un paramètre conventionnel défini comme 1.67 fois l'intervalle de temps T_1 compris entre les instants où la tension atteint 30% et 90% de la valeur de crête.

L'origine conventionnelle Θ_1 d'un choc de foudre est l'instant qui précède d'une durée de $0.3T_1$ celui qui correspond au point A.

Pour les enregistrements à échelle de temps linéaire c'est l'intersection avec l'axe des abscisses de la droite passant par les points de référence A et B du front.

La durée jusqu'à la mi-valeur T_2 d'un choc de foudre est un paramètre conventionnel défini comme l'intervalle de temps compris entre l'origine conventionnelle Θ_1 et l'instant où la tension est tombée à la moitié de la valeur de crête.

• Procédés d'essai :

1-Tension d'essai :

Le choc appliqué lors de l'essai doit être un choc de foudre plein normalisé ayant une durée du front de 1.2 μ s et une durée jusqu'à la mi-valeur de 50ms, dénommé choc 1.2/50

2-Tolérance :

Les différences suivantes sont autorisées entre les valeurs spécifiques pour les chocs normaux et les valeurs réellement mesurées :

Valeur de crête : $\pm 3\%$

Durée du front : $\pm 30\%$

Durée à mi-valeur : $\pm 20\%$

3-Séquence d'essai :

La séquence d'essai se compose d'un choc dont la tension est comprise entre 50% et 75% de la pleine tension d'essai, puis de trois chocs à pleine tension.

Si, au cours de l'un de ces chocs, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou à une traversé, ou si le dispositif d'enregistrement oscillographique est déficient sur l'une des voies de mesure spécifique, on ne tient pas compte de cet essai et un nouveau choc est appliqué.

La séquence d'essai aux chocs est appliquée successivement à chacune des bornes de ligne de l'enroulement essayé.

Dans le cas d'un transformateur triphasé, les autres bornes de ligne de l'enroulement doivent être reliées à la terre directement ou à travers une faible impédance.

Si l'enroulement a le neutre sorti, le neutre doit être relié à la terre directement à travers une faible impédance, par exemple un shunt de mesure de courant, la cuve doit être relié à la terre.

La valeur crête de la tension appliquée est donnée par le tableau (VDE5321/CE176-3-1).

La tension d'essai est de polarité négative parce que cela réduit le risque d'un claquage extérieur aléatoire dans le circuit d'essai, cela pourra lui être dommageable.

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré aux essais qu'on a effectués sur le transformateur pour vérifier son bon fonctionnement et cela avant sa mise en vente et pour vérifier sa conformité par rapport aux normes en vigueur.

CHAPITRE V : MESURES ET ESSAIS ELECTRIQUES PRATIQUES

V.1 Introduction :

Comme tous les matériels électriques industriels, les transformateurs sortant des lignes de fabrications passent en plateforme d'essai pour subir un contrôle final. Les essais effectués pour les transformateurs sont toujours définis par le contrat de vente et répondent aux prescriptions des normes françaises (UTE) ou des normes internationales (CEI) ou des normes nationales étrangères. Pour des transformateurs spéciaux ou appelés à travailler dans des conditions inhabituelles, ou encore devant servir de prototype à une série, des essais particuliers peuvent être exécutés.

La Plateforme d'essais regroupe tous les moyens permettant d'obtenir les tensions, les courants, fréquences et puissances nécessaires, ainsi que les appareils de mesure.

V.2 Généralités :

Tout transformateur neuf doit pouvoir obligatoirement subir en fin de fabrication tous les essais électriques individuels dits essais de routine pour nous permettre de vérifier les caractéristiques électriques à savoir :

- Mesure de la résistance des enroulements
- Mesure du rapport de transformation et vérification du couplage des enroulements
- Mesure des pertes et du courant à vide
- Mesure des pertes dues à la charge et la tension de court-circuit
- Épreuves diélectriques :
 - 1-Par la tension appliquée à fréquence industrielle
 - 2-Par la tension induite.

Dans certains cas particuliers et s'agissant notamment d'un prototype, il est fait mention d'essais supplémentaires autant dire complémentaires appelés essais de type tels que définis par les normes en vigueur (CEI 60076-2011) à savoir :

- Essais d'échauffements
- Essais de tenue aux chocs de foudre

Ces essais de type sont effectués sur un transformateur représentatif d'un lot de transformateurs du même type (même puissance), destinés à montrer que ces derniers satisfont aux conditions spécifiées par les normes citées ci-dessus.

Les essais sont effectués dans les ateliers, au niveau du banc d'essais électriques. La température ambiante doit être comprise entre 10°C et 40°C.

V.3 Le banc d'essai :

V.3.1 Définition :

Le banc d'essais des transformateurs est dimensionné pour contrôler en série des transformateurs à bain d'huile, avec puissance en allant de 25kVA à 1600KVA, des tensions allant de 3 kV à 36 kV et une tension de court-circuit allant jusqu'à 6% à une fréquence de 50Hz.

Les contrôles seront effectués selon la directive CEI 60076, EDITION 2011, conformément à celle-ci, nous avons :

- le contrôle des enroulements, côté haute tension et basse tension ;
- la mesure de la résistance ;
- le contrôle des spires.
- la mesure du rapport de transformation.
- la mesure à vide ;
- la mesure en charge.

On pourra en outre effectuer dans le cas particulier, le contrôle de l'échauffement.

V.3.2 Construction mécanique générale :

On trouvera dans l'espace la disposition, des machines, des armoires de distribution et des postes de contrôle avec leurs points de mesure ainsi que celle des pupitres de mesure et de commande.

Le banc d'essais se compose, des équipements suivants :

- a. Deux postes de contrôle
- b. Une cabine de mesure
- c. Une salle des machines et des installations de distribution



Figure V-1 Banc d'essai

V.4 Essais individuels :

Ils permettent à l'utilisateur de vérifier le fonctionnement correct du transformateur et le respect des garanties, conformément à sa spécification technique. On distingue :

V.4.1 Mesure de la résistance d'enroulement :

La mesure de la résistance des enroulements est effectuée en courant continu par la méthode voltampère métrique : c'est-à-dire on injecte un courant continu dans les enroulements placés dans un dispositif relié à une source de tension continue, un ohmmètre digital placé à cet effet, nous permet de lire la valeur de la résistance pour chaque phase suivant la loi d'Ohm.

$$R = U/I$$

[V-2]

V.4.1.1 Mesure de la résistance moyenne de l'enroulement :

Les valeurs sont lues sur le banc d'essai :

a. Enroulement primaire

$$R_{moy p} = \frac{R_{ph1} + R_{ph2} + R_{ph3}}{3} \quad [V-3]$$

$$R_{moy p} = \frac{0,00271 + 0,00269 + 0,00271}{3} = 2,70 \times 10^{-3} \Omega$$

$$R_{moy p} = 2,7 m\Omega$$

b. Enroulement secondaire :

$$R_{moy s} = \frac{R_{ph1} + R_{ph2} + R_{ph3}}{3} \quad [V-4]$$

$$R_{moy s} = \frac{0,00236 + 0,00234 + 0,00237}{3} = 2,36 \times 10^{-3} \Omega$$

$$R_{moy s} = 2,36 m\Omega$$

Remarque :

Selon la norme (C57.12.90-1987 - IEEE Standard) pour le cas d'un transformateur d'isolement :

> On débranche le primaire pour mesurer la résistance au secondaire (R_s) de chaque enroulement

> Idem pour mesurer la résistance au primaire (R_p).

V.4.2 Mesure de rapport de transformation et vérification du type de couplage :

La vérification de groupe de couplage et la mesure du rapport de transformation sont effectuées sur chaque prise à l'aide d'un pont de mesure de rapport de transformation. La mesure consiste, dans son principe, à rechercher une tension primaire en phase avec une tension secondaire et d'en comparer les modules.

Le rapport de transformation nominal c'est-à-dire sur la même prise principale se calcule en fonction du groupe de couplage des enroulements et de l'indice horaire.

Dans notre application le mode de couplage des enroulements est Dyn11

$$m = \frac{U_1}{U_2} \sqrt{3} \quad [V-1]$$

Avec :

m : Rapport de transformation

U1 : tension au primaire

U2 : tension secondaire.

Calcul du rapport :

$$m = \frac{U_1}{U_2} \sqrt{3}$$

$$m = \left(\frac{400}{400}\right) \sqrt{3} = 1,73$$

$$m = 1,73$$

Tableau V-1 Rapport de transformations

N° de prise	V1 et v2	1
Valeurs théorique	-	1,73
Valeurs mesurées	V1=400√3 et V2 =398	1,74

V.4.3 Mesure de pertes et du courant à vide :

Dans cet essai, on applique une tension alternative d'une valeur égale à la tension nominale (400V) aux bornes du primaire, le secondaire étant en circuit ouvert. On procède au relevé des valeurs des courants à vide par phase et des pertes partielles mesurées par les (02) wattmètres.

Après l'observation pendant le temps t_e , s'il n'y a pas un pic de courant, on relève les valeurs affichées par les wattmètres :

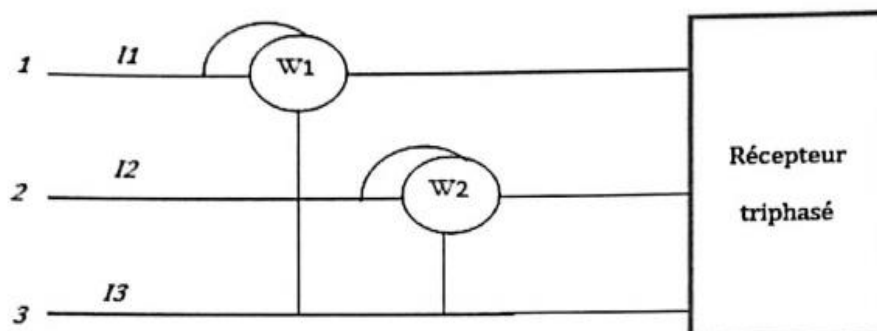


Figure V-2 : La méthode de deux wattmètres

Les valeurs mesurées des courants par phase :

$$I_{01} = 9,62 \text{ A}$$

$$I_{02} = 7,32 \text{ A}$$

$$I_{03} = 9,2 \text{ A}$$

Les valeurs mesurées des pertes partielles données par les 02 wattmètres.

$$P_1 = 55 \text{ W}$$

$$P_2 = 31 \text{ W}$$

V.4.3.1 Calcul du courant moyen à vide :

$$I_{0moy} = \frac{I_{01} + I_{02} + I_{03}}{3} \quad [V-8]$$

$$I_{0moy} = \frac{9,62 + 7,32 + 9,2}{3} = 8.71 \text{ A}$$

V.4.3.2 Calcul du rapport $\frac{I_{0moy}}{I_N}$:

Ce rapport permet de déterminer la conformité (NF EN CEI 60076) du courant à vide I_{0moy}

$$\frac{I_{0moy}}{I_N} \% = \frac{I_{0moy}}{I_N} \times 100$$

$$\frac{I_{0moy}}{I_N} \% = \frac{8.71}{909.3} \times 100 = 0.95\%$$

D'où le rapport $\frac{I_{0moy}}{I_N} \% < 1\%$ répondra l'exigence de la norme en vigueur qui est NF EN CEI 60076

V.4.3.3 Calcul des pertes à vide :

$$P_{a1} = 55 \text{ W}$$

$$P_{a2} = 31 \text{ W}$$

$$P_0 = (P_{a1} - P_{a2}) \times C_p - \text{Corr} \quad [V-10]$$

$$P_0 = (0,055 - 0,031) \times 50 - 0,010 = 1,190 \text{ KW}$$

Avec :

P_{a1} : Pertes mesurées par le wattmètre 1

P_{a2} : Pertes mesurées par le wattmètre 2

C_p : Calibre de puissance qui est de 50

Corr : Correction sur l'appareillage égale à 0,010 KW

P_0 : Pertes à vide

$$P_0 = 1,190 \text{ Kw}$$

$$P_0 = 1,190 \text{ Kw}$$

V.4.4 Mesure de la tension en court-circuit et des pertes en charge :

Cet essai consiste à court-circuiter les bornes du secondaire, et d'appliquer une tension pratiquement sinusoïdale aux bornes du primaire.

La tension de court-circuit et des pertes dues à la charge doivent être mesurées à la fréquence nominale de 50 Hz et le courant d'alimentation doit être réduit par rapport au courant nominal.

V.4.4.1 Calcul de la tension appliqué :

$$U_{App} = U_N \times U_{CCN\%} \times 80\%$$

Mais pour cet essai une tension 4,5 V a été appliqué et on prélève un courant d'intensité $I=225 \text{ A}$.

On procède au relevé des pertes partielles mesurées par les 02 wattmètres dans trois secondes (3s).

Les valeurs mesurées des pertes partielles données par les 02 wattmètres sont :

$$P_1 = 29 \text{ W}$$

$$P_2 = 7,5 \text{ W}$$

V.4.4.2 Calcul des pertes en court-circuit :

On calcule d'abord les P'_{cc} à travers la formule suivante :

$$P'_{cc} = (P_1 - P_2) \times C_p - Corr \quad [V-11]$$

$$P'_{cc} = (0,029 - 0,0075) \times 25 - 0,008 = 0,530 \text{ Kw}$$

$$\mathbf{P'_{cc} = 0,530 \text{ Kw}}$$

Pour calculer les pertes joules totales on utilise la formule suivante :

$$P_{cc} = \left(\frac{I_n}{I_{mes}} \right)^2 \times P'_{cc} \quad [V-12]$$

que nous avons obtenu de cette formule $I_{cc} = I_n / U_{cc} \%$

$$P_{cc} = \left(\frac{909,33}{225} \right)^2 \times 0,530 = 8,65 \text{ Kw}$$

$$\mathbf{P_{cc} = 8,65 \text{ Kw}}$$

V.4.4.3 Calcul en court-circuit à la température ambiante :

A. Tension de court-circuit :

Cette tension est exprimée en pourcentage et se calcule à travers la formule suivante :

$$U_{cc}\% = \frac{\frac{I_n}{I_{mes}} \times U_{essai}}{U_n} \times 100 \quad [V-13]$$

que nous avons obtenu de cette formule $I_{cc} = I_n / U_{cc} \%$

$$U_{cc}\% = \frac{\frac{909,33}{225} \times 4,5}{400} \times 100 = 4,55\%$$

$$\mathbf{U_{cc}\% = 4,55\%}$$

B. Calcul des pertes joules P_j :

$$P_j = [\sum (I_n)^2 \times R] \times K \quad [V-14]$$

$K = 1,5$: coefficient dû à la mesure de résistance

$$P_j = [0,00270 \times (909,33)^2 + 0,00236(909,33)^2] \times 1,5 = 6276,02 \text{ W}$$

$$\mathbf{P_j = 6,27 \text{ KW}}$$

C. Calcul des autres pertes :

Les pertes supplémentaires se calculent de la manière suivante :

$$P_{cc} = P_j + P_s \rightarrow P_s = P_{cc} - P_j \quad [V-15]$$

$$P_s = 8,65 - 6,27 = 2,38 \text{ Kw}$$

$$P_s = 2,38 \text{ Kw}$$

V.4.5. Épreuves diélectriques :**V.4.5.1 Epreuve diélectrique par tension appliqué à fréquence Industrielle :**

Le but de cet essai est de vérifier l'isolement entre les enroulements de phase, spires, bobines, prises, ainsi qu'entre ces parties et la terre.

L'essai est déclaré satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai

Pour un transformateur 30kV au primaire, en reliant les trois (3) phases et connectées au réseau, le secondaire étant relié et mis à la terre, on lui applique une tension d'essai égale à la valeur de crête divisé par $\sqrt{2}$ ($U_{essai} = \frac{U}{\sqrt{2}} = 70 \text{ kv}$) pendant une minute (60 s) par fréquence industrielle 50Hz.

Si un pic de courant n'est pas constaté durant les 60s, sachez que les distances entre les enroulements et carcasse sont respectées. (CEI 60 076 – 3)

C'est la même procédure pour le secondaire mais avec une tension d'essai de 10kv.

Remarque :

Pour les transformateurs BT/BT, on applique une tension d'essai de 10kv les deux cotés selon la norme I CEI 60076

V.4.5.2 Epreuve diélectrique par tension induite (Pertes à vide) :

Dans cet essai, on applique une tension alternative d'une valeur égale a deux fois la tension nominale aux bornes de l'enroulement secondaire du transformateur, a une fréquence égale à quatre fois la fréquence nominale pendant un temps d'essai t_e . (IEC 61534-1)

A. Calcul de la tension d'essai :

$$U_e = U_n \times 2 \quad [V-5]$$

$$U_e = 400 \times 2 = 800 \text{ V}$$

$$U_e = 800 \text{ V}$$

B. Calcul de la fréquence d'essai :

$$F_e = F_n \times 4 \quad [V-6]$$

$$F_e = 50 \times 4 = 200 \text{ Hz}$$

$$F_e = 200 \text{ Hz}$$

C. Calcul de temps d'essai :

$$te = \frac{120 \times \text{frequence assigné}}{\text{frequence d'essai}} \quad [V-7]$$

$$te = \frac{120 \times 50}{200} = 30s$$

$$te = 30s$$

V.5 Calcul en court-circuit à la température de référence 75 °C :**V.5.1 Calcul des pertes Pj :**

$$Pj(75^{\circ}C) = K \times Pj(31^{\circ}C) \quad [V-16]$$

Avec k pour le cuivre

$$K = \frac{235 + 75}{235 + 31} = 1,17$$

$$Pj(75^{\circ}C) = 1,17 \times 6,27 = 7,3 Kw$$

$$Pj(75^{\circ}C) = 7,3 Kw$$

V.5.2 Calcul des autres pertes Ps :

$$Ps(75^{\circ}C) = \frac{1}{k} \times Ps(31^{\circ}C) \quad [V-17]$$

$$\text{Avec } \frac{1}{k} = \frac{1}{1,17} = 0,854$$

$$Ps(75^{\circ}C) = 0,854 \times 2,38 = 2,04 Kw$$

$$Ps(75^{\circ}C) = 2,04 Kw$$

V.5.3 Calcul des pertes en court-circuit Pcc :

$$Pcc(75^{\circ}C) = Pj(75^{\circ}C) + Ps(75^{\circ}C) \quad [V-18]$$

$$Pcc(75^{\circ}C) = 7,3 + 2,04 = 9,34 Kw$$

$$Pcc(75^{\circ}C) = 9,34 Kw$$

V.5.4 Calcul de la tension de court-circuit Ucc :

Pour calculer cette expression on utilise la formule suivante :

$$U_{cc} (75^{\circ}C)\% = \sqrt{(P_{cc} 75^{\circ}C)^2 - (P_{cc} 31^{\circ}C)^2 + \left(\frac{100}{S_n}\right)^2 + (U_{cc}\%)^2} \quad [V-19]$$

$$U_{cc} (75^{\circ}C)\% = \sqrt{(9,39)^2 - (8,65)^2 + \left(\frac{100}{630}\right)^2 + (4,55)^2} = 4,58\%$$

$$U_{cc} (75^{\circ}C)\% = 4,58$$

V.6 Essais de type :

Le but de ces essais est d'établir l'échauffement de l'huile au sommet en régime établi avec dissipation des pertes totales. On distingue :

V.6.1 Mesure de l'échauffement de l'enroulement :

L'intérêt de cet essai est de déterminer la température de l'huile à la partie supérieure, ainsi que la température moyenne des enroulements.

Mesurer la température de l'huile dans la partie supérieure, on utilise des capteurs placés dans des doigts de gant dans le couvercle.

La température moyenne des enroulements est déterminée à partir de la variation de la résistance.

Cet essai permet de stabiliser l'huile que contient la cuve d'un transformateur, pour le faire :

On place cinq thermomètres (5).

- Un (1) thermomètre à l'interne du transformateur
- Quatre (4) thermomètres à l'externe du transformateur avec une distance d'un mètre entre eux

On relève les valeurs dans chaque heure jusqu'à trouver la valeur stable.

V.6.2 Essai en onde pleine :

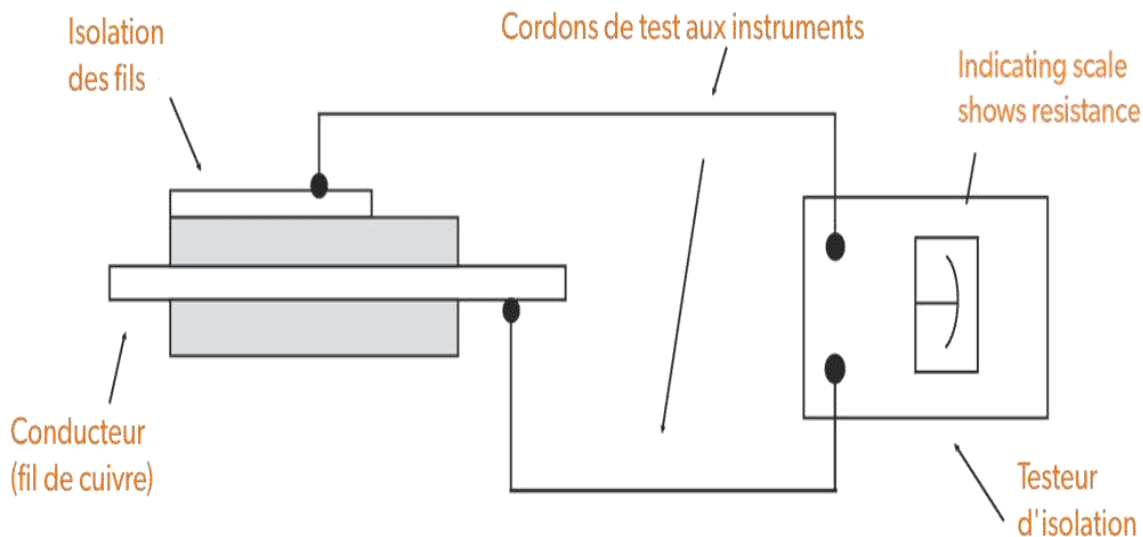
Le but de cet essai est de détecter la défaillance des isollements. Les tensions d'essai aux ondes de choc doivent être appliquées à chaque borne de ligne du transformateur. On injecte une tension de choc de 170kv sur une phase deux fois et à la troisième fois on injecte sa moitié ; Les restes étant reliés à la terre. Après on reprend le test d'isolement pour vérifier la résistance des enroulements.

V.7 La rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau est la mesure de la rigidité électrique d'un isolant. Elle est définie comme la tension maximale requise pour produire une rupture diélectrique à

travers le matériau et est exprimée en Volts par unité d'épaisseur. Plus la rigidité diélectrique d'un matériau est élevée, meilleur est son isolation électrique.

La norme IEC 60243 fait référence pour la méthode d'essai de la rigidité diélectrique d'un matériau. Le test est effectué dans l'air ou dans l'huile et implique de placer le matériau de test entre deux électrodes et d'augmenter la tension entre les électrodes jusqu'à ce qu'une brûlure électrique perce l'échantillon ou que la décomposition se produise. Le spécimen a généralement une épaisseur comprise entre 0,8 et 3,2 mm. Les échantillons de plus de 2 mm d'épaisseur sont généralement testés dans l'huile pour éviter les éclats avant la panne.



La rigidité diélectrique est ensuite calculée en divisant la tension de claquage par l'épaisseur de l'échantillon.

La plupart des plastiques ont une bonne résistance diélectrique, de l'ordre de 10 à 30 kV / mm.

V.8 Tension de claquage dans l'huile

La tension de rupture d'une huile minérale isolante a été étudiée sous l'influence de l'humidité, de l'acidité, de la pression et des particules. Les normes IEC156/95 (VDE0370/Part5/96 et ASTM D1816) spécifient les conditions d'essai à suivre par les Spark testers. L'humidité fournit des porteurs de charge, ainsi une saturation en humidité de 0 à 20% diminue la tension de claquage de 72 à 61 kV.

L'acide, en tant que produit de détérioration, réduit également la rigidité diélectrique pour la même raison. Pas le nombre total d'acide NTA, mais plus l'effet de l'acide moléculaire est faible, plus la diminution est importante. Comme le processus de claquage commence par une bulle microscopique, et que la pression augmente, la tension de claquage augmente également. L'observation du comportement asymptotique semble atteindre une valeur maximale finale à la tension de claquage d'environ 150 kV. Le sous-gonflage favorise la formation de bulles, ce qui réduit le support de la rigidité diélectrique. Les particules sèches (fibre de cellulose) réduisent la tension de claquage uniquement sous gonflage, presque aucune influence n'a été observée à la pression atmosphérique.

V.9 PCB dans les transformateurs

PCB est l'abréviation de de polychlorobiphényles ou biphényles polychlorés. Il s'agit de substances chimiques produites synthétiquement dont les effets négatifs sur l'homme et l'environnement n'ont été prouvés qu'après des décennies d'utilisation dans de nombreux produits

V.9.1 Propriété

La plupart des PCB se présentent sous forme de solides cristallins incolores, tandis que les mélanges industriels sont des liquides visqueux dont la viscosité est généralement proportionnelle à la teneur en chlore. Les PCB se caractérisent par une faible solubilité dans l'eau et une faible volatilité. Ils sont tous très solubles dans des substances hydrophobes telles que des huiles et des graisses. Ce sont des substances très stables, qui ne peuvent être détruites que par incinération ou par des processus catalytiques. Leur stabilité est également responsable de leur persistance dans l'environnement.

En résumé, les PCB se caractérisent par les propriétés suivantes :

- diélectrique
- stabilité chimique et physique
- pas d'inflammabilité
- compatibilité avec les plastiques, les résines, les adhésifs, les lubrifiants

V.9.2 Applications

Applications PCB dans des systèmes fermés :

- Liquides isolants pour les transformateurs utilisés dans la production d'électricité (nucléaire, thermique, hydroélectrique, géothermique), ainsi que dans son transport, sa distribution et son utilisation
- Fluides isolants pour condensateurs électriques pour lampes fluorescentes (ballasts)
- Appareils électroménagers (machines à laver, réfrigérateurs, climatiseurs), laboratoires électroniques, câblage électrique, perceuses, etc.

Applications dans les systèmes ouverts :

Huiles lubrifiantes, élastiques, papiers anti-rides, additifs de peinture et de plastique, produits d'étanchéité pour la construction, additifs pour la poussière, etc.

Conclusion :

Le travail que nous venons de réaliser a conduit à une exploitation réelle du transformateur et nous a montré l'obligation de faire aux transformateurs en général les essais électriques.

Ces essais électriques nous renseignent sur l'ampleur des phénomènes observés ainsi que sur le comportement du transformateur en réponse aux différentes contraintes électrique et diélectriques.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Le présent travail est consacré aux essais sur un transformateur d'isolement, Dans le but d'avoir un transformateur à la sortie de l'usine ayant des caractéristiques nominales.

Un calcul préliminaire a été fait en se basant sur le cahier des charges, à partir des dimensions de départ. Différentes contraintes (électriques, et électromagnétiques) ont été calculées, dans les différentes parties de la machine, en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement.

Les résultats obtenus doivent être situés dans les limites admissibles établies par les expériences effectuées sur d'autres machines existantes. Dans le cas contraire, des corrections nécessaires de certains paramètres doivent être effectuées jusqu'à l'obtention des variantes répondant aux normes en vigueur et aux spécifications du cahier des charges.

Les résultats satisfaisants obtenus permettent de donner un transformateur qui répondre le mieux aux exigences du cahier des charges. Si le transformateur répondre aux exigences a donc les dimensions et les caractéristiques permettant un bon fonctionnement.

L'élaboration de ce présent mémoire, 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.

Enfin, Nous espérons également que notre travail puisse être d'un grand apport aux stagiaires qui auront à le consulter et peut être même à le poursuivre sous différents aspects en utilisant des logiciels

Références Bibliographiques :

- [1]: Sadi Azouaou_Sifodil S, « Optimisation de la construction d'un transformateur de puissance triphasé moyenne tension-moyenne tension fabriqué par Electro-Industries », Mémoire de un d'études de Master professionnel en Electrotechnique industrielle, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015; Références Bibliographiques
- [2]: Amzal Samir Ait Lounis Chafaa, << Dimensionnement et calcul de courant de court-circuit d'un transformateur triphasé 100 KVA 30 KV/0.4KV », Mémoire de fin d'études en vue a obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012/2013;
- [3]: Meziani Madjid, « Contribution à la modélisation Analytico-numérique des Transformateurs de puissance », Mémoire de fin d'études d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011;
- [4]: Jean Sanchez, « Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance », Thèse pour l'obtention du grade de Docteur en génie électrique, Université de Grenoble, NNT 2011;
- [5]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur %C3%A9lectrique#Liens externes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_%C3%A9lectrique#Liens_externes);
- [6]: [https://www.electronique-et-informatique.fr/Transformateurs et autotransformateurs.php](https://www.electronique-et-informatique.fr/Transformateurs_et_autotransformateurs.php) ;
- [7]: <https://www.energy-online.fr/news/ca-est-quoi-un-transformateur-da-isolementa-117.html> ;
- [8]: Ikhlef Hamiche « Etude d'un transformateur d'isolement triphasé BT/BT 100 KVA 400V/400V immergé dans l'huile » Mémoire de fin formation en vue d'obtention du diplôme de Technicien Supérieur en Electrotechnique, INSFP Hadni Said Oued Aissi Tizi Ouzou, 2014
- [9]: Mémoire finale « Les pratiques de rémunération et la performance de l'entreprise (cas d'Electro-Industries) » Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme de Master en Science de gestion, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018 ;
- [10]: Documentation fournie par ENEL,

