



Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des
Sciences et de la Technologie Département de
Génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Filière : Electrotechnique

Option : Réseaux électriques

Réf :

Présenté et soutenu par :

SELLAMI Fateh

Le : 07 juillet 2019

Techniques de bobinage des Transformateurs de distribution

Jury :

Mr. HAMOUDI Med YACINE

MCB Université de Biskra

Président

Mr. YAHIA Khaled

Pr Université de Biskra

Examineur

Mr. BEN MEDOURE MOSTEFA

MCA Université de Biskra

Rapporteur

Année universitaire : 2018-2019

تيروهمجلا تيرناز جلا تيطار قميدلا تيبعثلا

République Algérienne Démocratique et Populaire

قرارو ديلعتلا يلاعلا شحبلاو يملعلا

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie électrique

Filière : Electrotechnique

Option : Réseaux électriques

Réf:.....

Thème

Techniques de bobinage des Transformateurs de distribution

Présenté par :
SELLAMI Fateh

vis favorable de l'encadreur :
Pr. TITAOUIN Abdenaser

Avis favorable du président du Jury

Mr. HAMOUDI Med Yacine

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie électrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électriques

Réf:

Thème

Techniques de bobinage des Transformateurs de distribution

Proposé par : SELLAMI Fateh

Dirigé par : Pr. TITAOUIN Abdenacer

Résumé

Dans ce mémoire, nous présentons les travaux de réalisation et les techniques faites dans l'atelier électromécanique SONATRACH, DMB BISKRA, qui concerne les procédures de bobinage des Transformateurs de distribution. Ces travaux dont le but est la maintenance curative des transformateurs, ce travail basé essentiellement sur la technique classique ainsi les essais d'isolation des bobinages et pour la prédiction de la durée de vie de l'isolation des enroulements.

Mots clé : transformateur, bobinage, circuit magnétique, rapport de transformation, indice horaire

ملخص:

في هذه الرسالة ، نقدم أعمال التنفيذ والتقنيات التي تمت في ورشة العمل الكهروميكانيكية سونطراك مديرية الصيانة بسكرة ، والتي تتعلق بإجراءات اللف لمحولات التوزيع. يهدف هذا العمل إلى الصيانة العلاجية للمحولات ، وهذا العمل يعتمد بشكل أساسي على التقنية الكلاسيكية وكذلك اختبارات العزل للملفات والتنبؤ بعمر خدمة عزل الملفات. الكلمات المفتاحية: محول ، لف ، دائرة مغناطيسية ، نسبة تحول ، مؤشر بالساعة.

Abstract

In this thesis, we present the realization works and the techniques made in the electromechanical workshop SONATRACH, DMB BISKRA, which concerns the winding procedures of Distribution Transformers. This work aims at the curative maintenance of the transformers, this work based essentially on the classical technique as well as the insulation tests of the coils and for the prediction of the service life of the insulation of the windings.

Key words : transformer, winding , magnetic circuit, transformation ratio, hourly index

DEDICACE

Nous dédions ce modeste travail :

A la lumière de notre vie, mes chers parents, que dieu les bénisse âme.

A mes frères et sœurs.

A tous mes amis de près ou de loin.

A tous mes collègues de la promotion 2019 master réseaux électriques.

Remerciements

Je tiens dans un premier temps remercié dieu qui m'a guidé sur la bonne voie.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon Encadrant,

Mr Pr : TITAOUINE ABENACER pour tout le temps qu'elle m'a consacré

Je voudrais remercier également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté a
Ce travail.

Je remercie Monsieur le président de jury le professeur HAMMOUDI MED YACINE

Pour avoir aimablement accepté de présider le jury de ce mémoire de master.

Ainsi que mes Remerciements aux docteurs YAHIA KHALED et BENMEDDOUR

MOSTEFA, pour avoir accepté d'examiner et rapporter ce travail.

Je remercie mes amis GUESBAYA NADJIB et ZEHNIT KHEIR-EDDINE,

Mes collègues du master.

Je remercie également mes collègues de travail .

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tab. I.1 : Indice horaire suivant le couplage	14
Tab I.2 : Résumant le rapport de transformation suivant le couplage:	15
Tableau III.1 : Caractéristique techniques du transformateur	49
Tab. III.2 : Résultats de mesures de la résistance ohmique du bobinage du transformateur côté primaire MT	52
Tab. III.3 : Résultats de mesures de la résistance ohmique du bobinage du Transformateur côté secondaire BT.	53
Tab. III.4 : résultat de test de claquage de l'huile de transformateur	60
Tab. III.5 : Résultats de mesures de la résistance ohmique du bobinage du transformateur côté primaire MT	61
Tab. III.6 : Résultats de mesures de la résistance ohmique du bobinage du Transformateur côté secondaire BT	61
Tab. III.7 : Rapport de Transformation	62

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs	
Fig. I.1 Rôle du Transformateurs	5
Fig. I.2 Transformateurs de puissance.	6
Fig. I.3 Auto-transformations	6
Fig. I.4 Autotransformateur abaisseur.	7
Fig. I.5 Autotransformateur abaisseur.	8
Fig. I.6 Autotransformateur elevateur.	8
Fig. I .7 Transformateur triphasé	9
Fig. I.8 03 transformateurs monophasés identiques	9
Fig. I.9 Transformateur triphasé	10
Fig. I.10 Mode de couplage du transformateur triphasé	10
Fig. I.11 Différentes couplages pour l'enroulement secondaire	11
Fig. I.12 Représentations symboliques des couplages normalisés.	11
Fig. I.13 Détermination de l'indice horaire pour un couplage Y-y	13
Fig. I.14 Détermination de l'indice horaire pour un couplage Y-d	13
Fig. I.15 Rapport de transformation pour un couplage Y-y	14
Fig. I.16 Rapport de transformation pour un couplage Y-d	15
Fig. I.17 Transformateur monophasé base tension	16
Fig. I.18 Symboles des transformateurs	16
Fig. I.19 Schéma de principe du transformateur	17
Fig. I.20 Représentation symbolique d'un Transformateur parfait	18
Fig. I.21 Transformateur de distribution	20
Fig. I.22 Schéma de principe d'un transformateur abaisseur	20
Fig. I.23 Transformateur de distribution a diélectrique liquide	21
Fig. I.24 Transformateur distribution de type sec	21
Fig. I.25 Constitution générale du transformateur de distribution :	22
Fig. I.26 ERT (effet des variations de températures sur la déformation des ailettes).	24
Fig. I.27 Respirant avec conservateur Sur la variation de niveau du réservoir).	25
Fig. I.28 Noyau feuilleté	25
Fig. I.29 Transformateur à noyau feuilleté.	26
Fig. I.30 Enroulements de transformateur	27

Liste des figures

Fig. I.31 Courants de Foucault	29
Chapitre II : Technologie des enroulements et circuits magnétique des transformateurs	
Fig. II.1 Transformateur de type cuirassé	35
Fig .II.2 Transformateur à colonnes	36
Fig. II.3 Colonne en couches	36
Fig .II.4 Enroulement en galette	37
Fig .II.5 Circuit magnétique	39
Fig .II.6 Construction du circuit magnétique	39
Fig .II.7 Assemblage et jointage des tôles du circuit magnétique	40
Fig. II.8 Enroulements de la couche	42
Fig .II.9 Disque d'enroulement	42
Fig .II.10 Défaut de type électrodynamique	43
Fig .II.11 Défaut de type diélectrique	44
Fig. II.12 Point chaud régleur	44
Fig. II.13 Fuite d'huile du transformateur	45
Chapitre III : Réalisation de bobinage du Transformateur De distribution	
Fig. III.1 Plaque signalétique du transformateur MT/BT	49
Fig. III.2 Transformateur de distribution MT/BT 100KVA	50
Fig. III.3 Micro ohmmètre (contrôleur de la résistance ohmique du bobinage).	51
Fig. III.4 Mégohmmètre 5KV (contrôleur d'isolement du bobinage)	51
Fig. III.5 Pont de mesure de rapport du transformateur	51
Fig. III.6 Spintermètres (testeur de rigidité diélectrique d'huile du transformateur)	52
Fig. III.7 Décuvage et levage de la partie active du transformateur	53
Fig. III.8 Dépose de la partie active de transformateur MT/BT	54
Fig. III.9 Repérage des fils de connexion pour déconnection les câbles du bobinage	54
Fig. III.10 Separation et enlèvement de la partie supérieure du transformateur	55
Fig. III.11 Désassemblage du circuit magnétique	55
Fig. III.12 Démontage du bobinage défectueux de la colonne pour la phase A	56
Fig. III.13 Petit trace d'amorçage électrique localisé sur la bobine MT de la phase A	56
Fig. III.14 les etapes de débobinage du transformateur	57
Fig. III.15 Démontage du bobinage défectueux de la colonne pour la phase A	57

Liste des figures

Fig. III.16	Schéma du bobinage de transformateur	58
Fig. III.17	Les étapes de rebobinage de la colonne pour la phase A	59
Fig. III.18	Assemblage du circuit magnétique du transformateur	59
Fig. III.19	Connexion des câbles d'alimentation et les fils du changeur de prise	60

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

V₁	la tension primaire en volt .
V₂	la tension secondaire en volt
N₁	nombre de spires du transformateur côté primaire
N₂	nombre de spires du transformateur côté secondaire
∅	Flux magnétique
A,B,C	Enroulements primaires par des lettres majuscules
a.b.c	Enroulements secondaire par des lettres minuscules
Y	couplage étoile
D	couplage triangle
Z	couplage zigzag
I₁	courant primaire
I₂	courant secondaire
m	rapport de transformation
I_h	indice horaire
θ	le déphasage entre l'enroulement primaire et secondaire homologue
B_{max}	champs d'inductin maximale en Tesla
GO	grains orienté
GNO	grains non-orientés
U	tension (Volts)
I	intensité (Amp)
f	la fréquence (HZ)
B	induction magnétique (T)
N	Le nombre de conducteurs
R_{ohm}	résistance ohmique du bobinage en Ω
ERT	étanche à remplissage total
ONAN	type de refroidissement du transformateur (huile naturel air naturel)
ONAF	type de refroidissement du transformateur (huile naturel air force)
BT	base tension en (V)
MT	moyen tension en (KV)
HT	haute tension en (KV)

LISTE DES SYMBOLES

G	global
DAR	rapport d'absorption diélectrique
T	temps en minute
T_{amb}	temperature ambiante de test
VAT	verification d'absence de tension
U_{moy}	tension de claquage d'huile du transformateur moyenne
U_i	tension d'injecti

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....2

Chapitre I :

GENERALITE SUR LES TRANSFORMATEURS

I.1 Introduction..... 4
I.2 Définition du transformateur : 4
I.3 Histoire des transformateurs : 4
I.3 Rôles : 5
I.4 Types des transformateurs classiques : 5
I.4.1 Transformateur de distribution et de puissance : 5
I.4.2. Autotransformateur 6
I.4.3 Transformateur triphasé 9
I.4.3.2 Constitution du transformateur triphasé: 10
I.4.3.3 Fonctionnement en régime équilibré: 12
I.4.4 Transformateur monophasé : 16
I.4.4.1 Transformateur en régime sinusoïdal monophasé: 16
I.5 Classification des transformateurs : 18
I.5.1 Transformateurs de distributions : 20
I.5.1.1 Définition : 20
I.5.1.2 Technologie de la construction des transformateurs de distributions.....21
I.5.1.3 Constitution générale du transformateur de distribution : 22
I.5.1.3.1 Partie active : 22
I.5.1.3.2 Partie non active (auxiliaires) : 22
I.5.1.4.1 Feuillage des circuits magnétiques : 25
I.5.1.4.2 Enroulement : 27
I.5.1.4.3 Isolation : 28
I.5.1.4.4 Pertes d'énergie..... 29
I.5.1.4.5 Systèmes de refroidissement : 30
I.6 Conclusion.....31

Chapitre II :

Technologie des enroulements et circuits magnétiques des transformateurs

II.1 Introduction 33
II.2 Enroulements des transformateurs..... 34

Table des matière

II.2.1. Généralité.....	34
II.2.2 Technologies de bobinages :.....	34
II.2.2.1 Cuirassé : généralités	35
II.2.2.3 Colonne : en couches.....	36
II.2.2.4 Colonne : en galettes.....	37
II.2.3 L'isolement classique des conducteurs :	37
II.2.4 L'enroulement concentrique :.....	38
II.2.4.1 Enroulement concentrique des bobines base tension.	38
II.2.4.2 Enroulement concentrique de la bobine haute tension.	38
II.3 Le circuit magnétique :	38
II.3.1 Généralités :	38
II.3.2 Construction :	39
II.3.3 Pertes fer :	40
II.4 Isolation du bobinage de transformateur :	40
II.5 Types d'enroulement de bobinage des transformateurs de puissances.	41
II.5.1 Couche d'enroulement :	41
II.5.2 Disque d'enroulements :	42
II.6 Exemples de type de défauts de transformateurs :	43
II.7 Conclusion.....	45

Chapitre : III:

Réalisation de bobinage du Transformateur De distribution

III.1 Introduction	47
III.2 Politique de maintenance des transformateurs :.....	48
III.2.1 Maintenance :	48
III.2.1.1 Définition :	48
III.2.2 Maintenance : application au transformateur.....	48
III.3 Exemple de réalisation du bobinage d'un transformateur de distribution pour un seul bobinage et pour une seule colonne.	49
III.3.1 Caractéristique techniques du transformateur :.....	49
III.4 Procédures de bobinage et réparation du transformateur au niveau de L'atelier électromécanique :.....	50
III.4 .1 Matériel utilisé :	50
III.4.2 Inspection et Contrôle électrique du transformateur avant démontage :.....	52

Table des matière

III.4.3 Démontage du transformateur et diagnostic.....	53
III.4.4 Schéma et nombre de spires du bobinage du transformateur pour chaque prise.....	58
III.4.5 Rebobinage de la bobine du transformateur côté MT pour la colonne de la phase A ..	59
III.4.6 Remontage du transformateur :	59
III.4.7 Essai électriques après le rebobinage et remontage du transformateur :.....	60
III.5 Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	65
refernces bibliographique	67

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Les transformateurs de distribution sont parmi les éléments les plus importants dans l'industrie et du réseau de transport et de distribution de l'électricité, leur place au sein de cette infrastructure est primordiale et critique. Ils sont normalement prévus pour fonctionner plus de 20 ans, ce qui fait de ces appareils l'une des machines les plus fiables construites par l'industrie électrique.

Les défaillances des transformateurs en service sont très contraignantes pour l'exploitation et le développement du réseau. Elles sont habituellement causées par des contraintes électriques, thermiques et mécaniques ou d'autres incidents surtout au niveau de bobinage des transformateurs de distribution MT/BT.

Pour éviter les pannes des transformateurs et pour maintenir en bonne condition de fonctionnement, ces transformateurs demandent des programmes de maintenances préventives et curatives.

La thèse est composée de trois chapitres.

Le premier chapitre présente quelques généralités sur les transformateurs en générale

Le deuxième chapitre les différentes techniques de bobinage ainsi la technologie des circuits magnétiques.

Le troisième chapitre présente la partie pratique de la thèse ensuite le travail se termine par conclusion générale.

Chapitre I
GENERALITE SUR LES
TRANSFORMATEURS

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, on a consacré le travail sur les généralités des transformateurs de puissances ainsi que les éléments physiques tels que le circuit magnétique avec leurs différentes constructions et avec le système de feuilletage et les enroulements puis les pertes d'énergie.

I.2 D Un transformateur électrique est un convertisseur statique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement [1].

définition du transformateur :

I.3 Histoire des transformateurs :

Michael Faraday construisit le premier transformateur en 1831. Il ne l'employa cependant que pour démontrer le principe de l'induction électromagnétique et n'en imagina pas les usages auxquels il serait finalement destiné

L'ingénieur Russe Pavel Yablochkov inventa en 1876 un système d'éclairage basé sur un jeu de bobines d'induction, dans lequel les enroulements primaires étaient connectés à une source de courant alternatif et les enroulements secondaires pouvaient être reliés à plusieurs « bougies électriques ». Comme le mentionnait le brevet, un tel système « permet[tait] de fournir une alimentation indépendante à plusieurs dispositifs d'éclairage, sous différentes intensités lumineuses, à partir d'une seule source d'alimentation électrique ». De toute évidence, la bobine d'induction fonctionnait dans ce système comme un transformateur.

Ce peut avoir été là le premier transformateur de puissance pratique. Ils présentèrent également l'invention à Turin en 1884, où elle fut adoptée comme un système électrique d'éclairage. Les premiers appareils employaient un noyau ouvert de fer, qui fut rapidement abandonné pour un noyau circulaire plus efficace, présentant un circuit magnétique fermé.

William Stanley, ingénieur de Westinghouse, construisit le premier appareil pratique en 1885 après l'achat par George Westinghouse des brevets de Gaulard et Gibbs. Le noyau était constitué de plaques de fer à enclenchement en forme de E. Cette version fut commercialisée pour la première fois en 1886.

Les ingénieurs hongrois Károly Zipernowsky, Ottó Bláthy et Miksa Déri, de la société Ganz de Budapest en 1885, créèrent le modèle très efficace ZBD basé sur le modèle de Gaulard et Gibbs.[2]

L'ingénieur Russe Mikhail Dolivo -Dobrovolsky développa en 1889 le premier transformateur triphasé.

I.3 Rôles :

Les transformateurs statiques sont des appareils qui ont pour rôle de transiter une énergie électrique d'un réseau à un autre en modifiant ses caractéristiques : intensité et tension. Les transformateurs permettent d'élever la tension à la sortie des centrales électriques pour le transport sur de longues distances afin de diminuer les pertes en ligne et de l'abaisser à l'arrivée pour l'adapter aux besoins des consommateurs. [3]



Fig. I.1: Transformateur de puissance.

I.4 Types des transformateurs classiques :

I.4.1 Transformateur de distribution et de puissance :

Couramment les transformateurs de distribution sont ceux qui abaissent la tension du réseau, principalement 20 kV, pour l'adapter à l'utilisateur final, en général 400 V triphasé en France. Les puissances des transformateurs de distribution sont de l'ordre de plusieurs kVa.

L'essentiel des autres transformateurs électriques situés sur le réseau haute tension seront des transformateurs de puissance (**Figure I.2**). Les puissances et tensions de ces

Transformateurs peuvent aller jusqu'à plusieurs centaines de MVA et plusieurs centaines de kV.

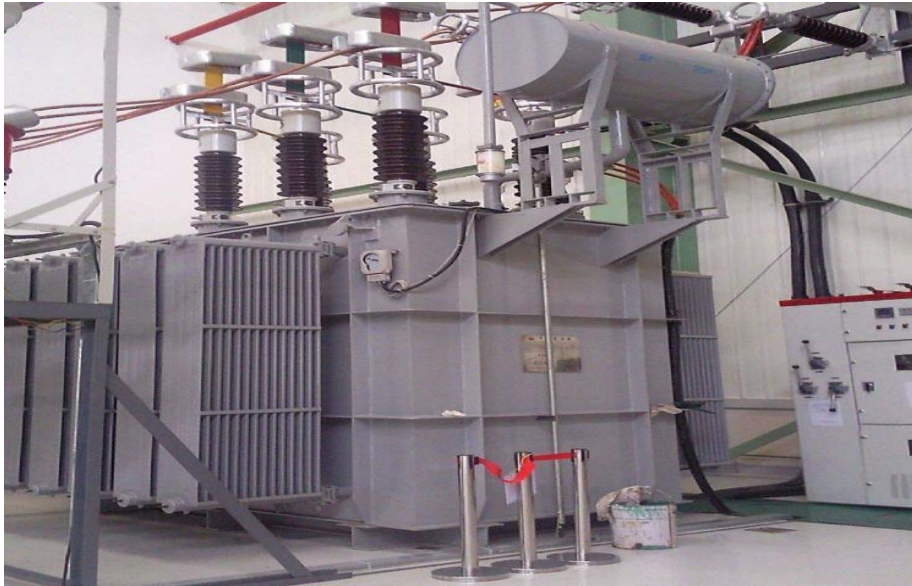


Fig. I.2 : Transformateur de puissance

I.4.2 .Autotransformateur

I.4.2.1 Généralité :

Un autotransformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courant alternatif en un système de courant alternatif de même fréquence, d'intensité et de tension et tension efficaces différentes, sans assurer l'isolement galvanique.

Le principe de l'autotransformateur est tout à fait similaire à celui du transformateur. La seule différence est qu'une partie de l'enroulement est commune au primaire et au secondaire (**Figure I.3**).



Fig. I.3 : Autotransformateur

Dans les applications industrielles, on rencontre un grand nombre de transformateurs de construction spéciale. La plupart possèdent les propriétés de base que nous avons étudiées dans le chapitre précédent.

I.4.2.2 Définition:

On appelle autotransformateur, un transformateur composé d'un enroulement unique monté sur un circuit magnétique. Pour un autotransformateur abaisseur, par exemple, la haute tension est appliquée à l'enroulement complet et la basse tension est obtenue entre une extrémité de l'enroulement et une prise intermédiaire (**Figure I.4**).

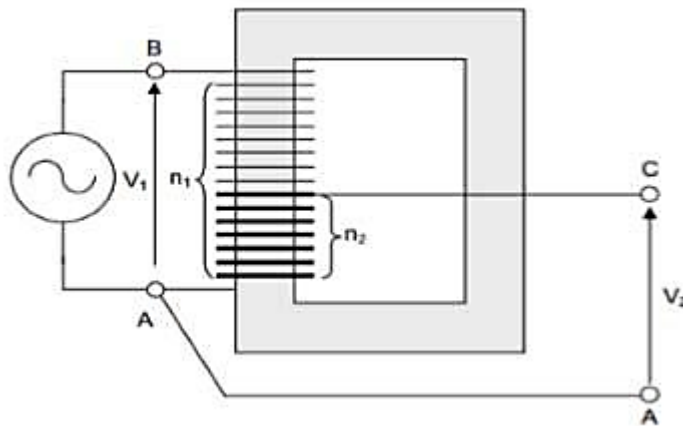


Fig. I.4 Autotransformateur abaisseur.

I.4.2.3 Avantages et inconvénients:

- * Dans un autotransformateur, l'enroulement secondaire fait partie de l'enroulement primaire. Il s'ensuit qu'un autotransformateur est plus petit, moins lourd et moins coûteux qu'un transformateur conventionnel de même puissance. Cette économie devient particulièrement importante lorsque le rapport de transformation se situe entre 0,5 et 2.
- * l'absence d'isolation entre la haute tension et la basse tension constitue son grand inconvénient.

I.4.2.4 Utilisations :

Les autotransformateurs servent au démarrage à tension réduite des moteurs, à la régulation de la tension des lignes de distribution et, en général, à la transformation de tensions de valeurs assez rapprochées.

Un transformateur à deux enroulements peut être monté en autotransformateur : il suffit de relier le secondaire en série avec le primaire. Selon le mode de connexion, la tension secondaire peut s'ajouter à la tension primaire ou se soustraire de celle-ci.

I.4.2.5 Types d'autotransformateur :

- a. Autotransformateur abaisseur de tension : Il y a deux configurations possibles pour l'autotransformateur abaisseur de tension

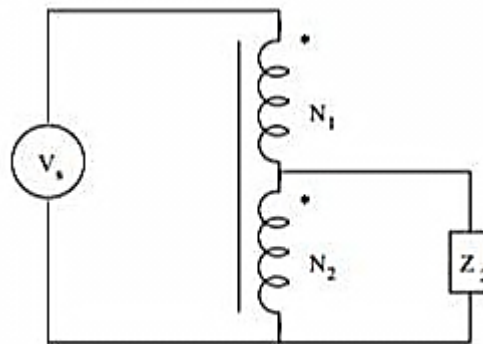


Fig. I.5 : Autotransformateur abaisseur

- b. Autotransformateur éleveur de tension :
Il y a deux configurations possibles

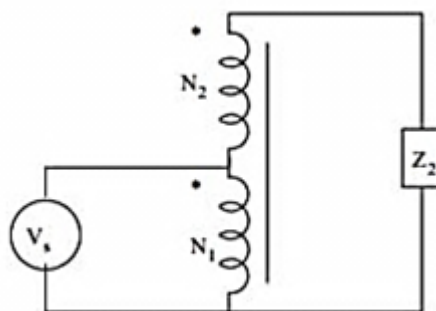


Fig. I.6 : Autotransformateur éleveur

I.4.3 Transformateur triphasé

Dans les réseaux industriels l'énergie électrique est principalement transportée en triphasé, où sont par suite utilisés les transformateurs triphasés. Cependant pour des questions de gabarit de transport, ou d'unités de secours, il peut arriver que trois transformateurs monophasés distincts soient couplés en montage triphasé extérieurement. (Figure I.7).



Fig. I.7 : Transformateur triphasé

I.4.3.1 Intérêt: [4]

La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé. Par ailleurs on démontre facilement que le transport de l'énergie en haute tension est plus économique d'où la nécessité d'employer des transformateurs élévateurs à la sortie des

Centrales de production et abaisseur tout proche des centres de consommation. En effet pour modifier la tension d'un système triphasé on peut choisir d'utiliser :

* Soit 3 transformateurs monophasés identiques

Avec cette configuration, on augmente l'encombrement et la masse du transformateur ainsi que la masse de fer utilisé est plus grande qui aboutit à augmenter les pertes fer. Pour cela, il faut penser à une autre configuration

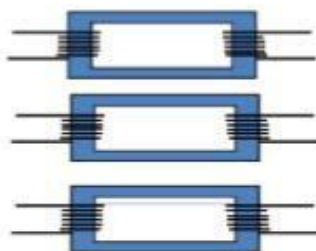


Fig. I.8 : 03 transformateurs monophasés identiques

* Soit un seul transformateur triphasé (la solution la plus économique)

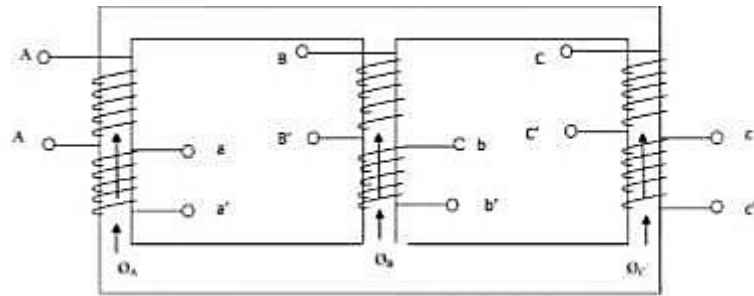


Fig. I.9 : Transformateur triphasé

Même si les tensions appliquées ne forment pas un système triphasé équilibré on a obligatoirement: $\phi_A + \phi_B + \phi_C = 0$. On dit qu'il s'agit d'un transformateur à flux forcés.

Remarque :

On convient de repérer les bornes comme suit :

- Enroulements primaires par des lettres majuscules (A, B, C)
- Enroulements secondaires par des lettres minuscules (a, b, c)
- Les bornes désignées par la même lettre sont dites « Homologues »

I.4.3.2 Constitution du transformateur triphasé: [1,4]

Le circuit magnétique est formé de trois noyaux fermés par 2 culasses .Il est fabriqué en tôles Magnétiques feuilletées .chaque noyau porte :

- Un enroulement primaire
- Un ou plusieurs enroulements secondaires

Remarque :

L'enroulement primaire (N_1 spires) et l'enroulement secondaire (N_2 spires) étant bobinés dans le même sens et traversés par le même flux \Rightarrow les tensions V_A et V_a sont en phase.

a. Mode de couplage :

- Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile(Y) soit en triangle(D).

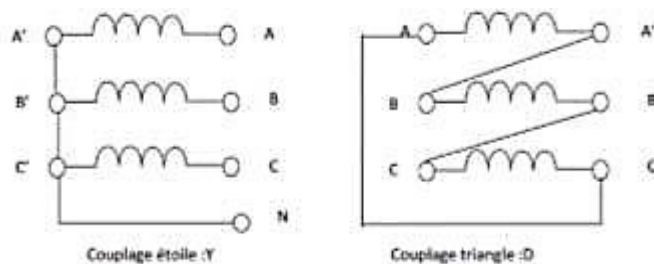


Fig. I.10 : Mode de couplage du transformateur triphasé

- Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile(y), triangle(d) et zigzag(z)

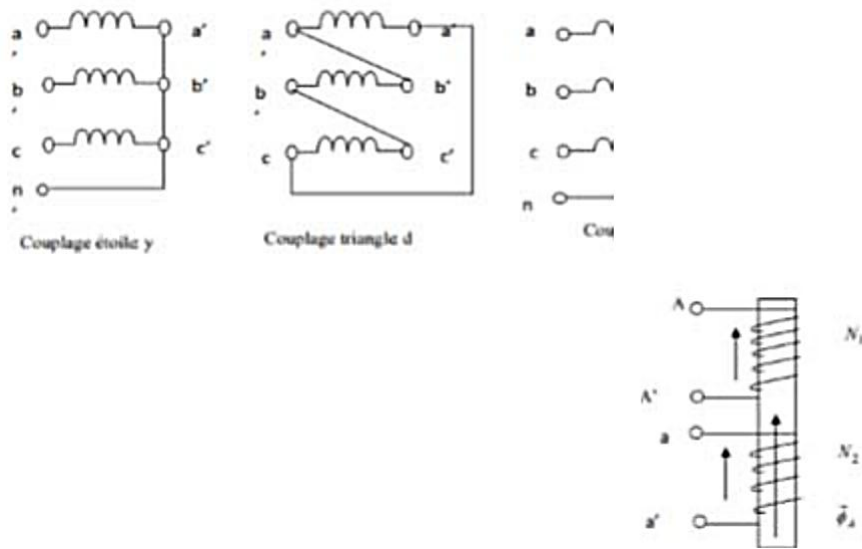


Fig. I.11 : Différentes couplages pour l'enroulement secondaire

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

- Y-y** : étoile –étoile
- Y-d** : étoile-triangle
- Y-z** : étoile-zigzag
- D-y** : triangle-étoile
- D-d** : triangle –triangle
- D-z** : triangle-zigzag

On donne ci-dessous les représentations symboliques des couplages normalisés

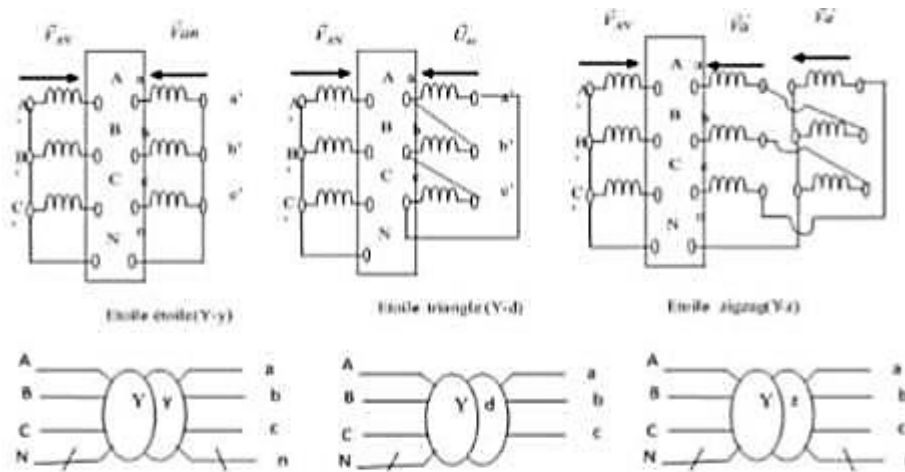


Fig. I.12 : Représentations symboliques des couplages normalisés.

b. Choix de couplage:

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

La charge nécessite la présence du neutre (par exemple réseau BT).Le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zigzag.

Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre I_n est supérieur à 0.1 le courant nominal), le secondaire doit être couple en zigzag.

Coté haute tension on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser). Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle (l'intensité par enroulement est $J=I\sqrt{3}$).

I.4.3.3 Fonctionnement en régime équilibré:

I.4.3.3.1 Indice horaire

➤ **Définition :**

L'indice horaire (I_h) est un nombre entier compris entre 0 et 11 qui traduisent le déphasage θ entre deux tensions primaire et secondaire homologue

$$I_h = \frac{\theta}{\pi/6} \text{ avec } \theta = (\vec{V}_A, \vec{V}_a) = (\vec{V}_B, \vec{V}_b) = (\vec{V}_C, \vec{V}_c)$$

□ Remarque :

On sait qu'un système de tensions primaires triphasé équilibré et direct donne naissance à un système secondaire triphasé équilibré et direct. Il est donc clair, que θ est aussi le déphasage entre les tensions composées homologues.

$$\theta = (\vec{U}_{AB}, \vec{U}_{ab}) = (\vec{U}_{BC}, \vec{U}_{bc}) = (\vec{U}_{CA}, \vec{U}_{ca})$$

On peut déterminer θ :

- Soit à partir du schéma des connections.
- Soit pratiquement par des essais.

❖ **Détermination de l'indice horaire à partir du schéma:**

On dispose du schéma des connections internes d'un transformateur et il est question de déterminer son indice horaire.

➤ Exemple 1: Y-y:

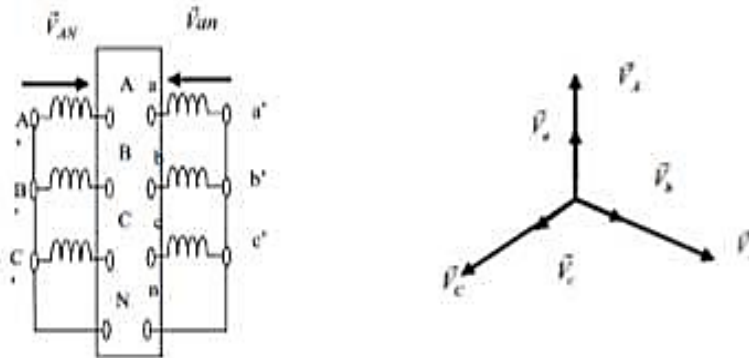


Fig. I.13 : Détermination de l'indice horaire pour un couplage Y-y

D'après le schéma (Figure I.13) on peut voir que \vec{V}_A et \vec{V}_a sont en phase, car, portés par le même noyau. Ils sont orientés dans le même sens $\rightarrow \theta = 0^\circ \rightarrow I_h = 0$

Remarque:

- Une permutation directe des liaisons aux bornes primaires ou aux secondaires (enroulement 2 sera lié à a, enroulement 3 à b et enroulement 1 à c) fait passer l'indice horaire à 4 (augmente l'indice de +4). [1,4]
- 2 permutations directes ou un inverse fait passer l'indice à 8 (augmente l'indice de +8).

➤ Exemple 2: Y-d :

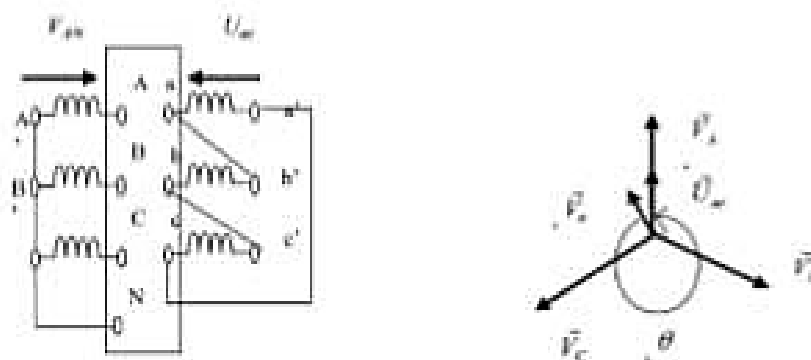


Fig. I.14 : Détermination de l'indice horaire pour un couplage Y-y

D'après le schéma, on peut voir que : \vec{V}_A et \vec{U}_{ac} sont en phase ; \vec{V}_B et \vec{U}_{ba} sont en phase ; \vec{V}_C et \vec{U}_{cb} sont en phase $\rightarrow \theta = 330^\circ \rightarrow I_h = 11$

□ Tableau résumant Indice horaire suivant le couplage:

Tab. I.1 : Indice horaire suivant le couplage [1]

I.4.3.3.b Rapport de transformation: [1,4]

Par définition, le rapport de transformation à vide m est donné par :

$$m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_{a0}}{V_{A0}}$$

Le rapport de transformation triphasé dépend de N_1 et N_2 les nombres de spires au primaire et au secondaire et du couplage.

Exemple 1 : Y-y:

En se référant à la **figure I.15** et sachant que la tension aux bornes d'un enroulement est proportionnelle au nombre de spires (d'après la relation de Boucherot). On aura donc : $m =$

$$\frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_{an}}{V_{AN}} = \frac{N_2}{N_1}$$

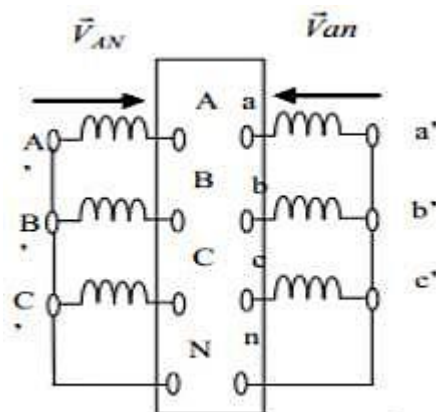


Fig. I.15 : Rapport de transformation pour un couplage Y-y

Remarque :

On démontre de la même manière que le rapport de transformation pour un couplage

D-d est égal aussi à $m = \frac{N_2}{N_1}$

Exemple 2 : Y-d:

On démontre que Le rapport de transformation est :

$$\mathbf{m} = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_{an}}{\sqrt{3} \cdot V_{AN}} = \frac{N_2}{\sqrt{3} \cdot N_1}$$

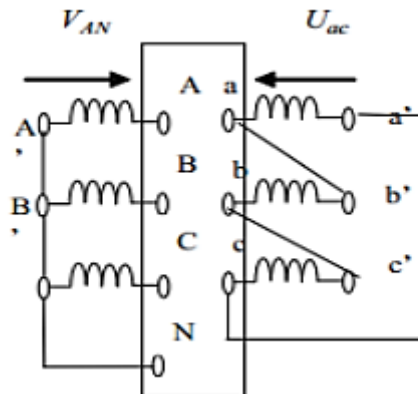


Fig. I.16 : Rapport de transformation pour un couplage Y-d

* Tableau résumant le rapport de transformation suivant le couplage:

Couplage	Rapport de transformation
Yy	$m = \frac{n_2}{n_1}$
Yd	$m = \frac{\sqrt{3} n_2}{3 n_1}$
Yz	$m = \frac{\sqrt{3} n_2}{2 n_1}$
Dy	$m = \sqrt{3} \frac{n_2}{n_1}$
Dd	$m = \frac{n_2}{n_1}$

Tab I.2 : Résumant le rapport de transformation suivant le couplage [1]

I.4.4 Transformateur monophasé :

Un transformateur (parfois abrégé en *transfo*) est une machine statique à induction électromagnétique destinée à transformer une tension alternative appelée tension primaire en une nouvelle tension alternative appelée tension secondaire de même fréquence mais d'amplitude généralement différente.

Un transformateur est un quadripôle réversible permettant de transmettre des puissances active et réactive avec un très bon rendement.



Fig. I.17 : Transformateur monophasé base tension

I.4.4.1 Transformateur en régime sinusoïdal monophasé:

I.4.4.1.1 Présentation:

Un transformateur électrique est un convertisseur statique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

Il peut être utilisé en abaisseur de tension (pour des raisons de sécurité) ou en élévateur de tension (transport de l'énergie électrique). Il peut également être utilisé comme élément isolant entre deux circuits (on parle d'isolation galvanique).

I.4.4.1.2 Symbole:

On utilise l'un des trois symboles suivants :

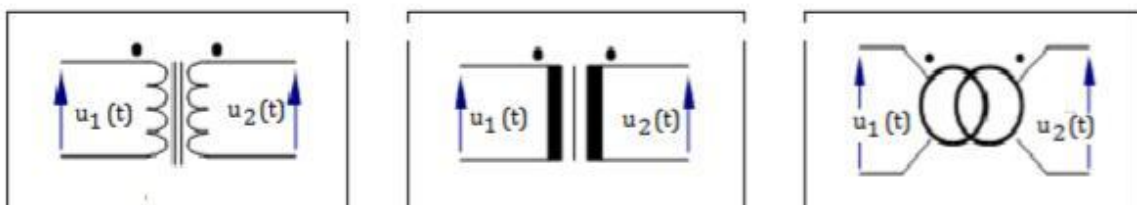


Fig. I.18 : Symboles des transformateurs

Le primaire reçoit de la puissance du réseau → Convention récepteur. Le secondaire fournit de la puissance à la charge → Convention générateur.

Bornes homologues: Les bornes marquées d'une étoile (*) sont dites homologues (bornes de même polarité) ; si des courants entrant au même instant par ces bornes donnent des flux de même sens (lignes de champ de même sens).

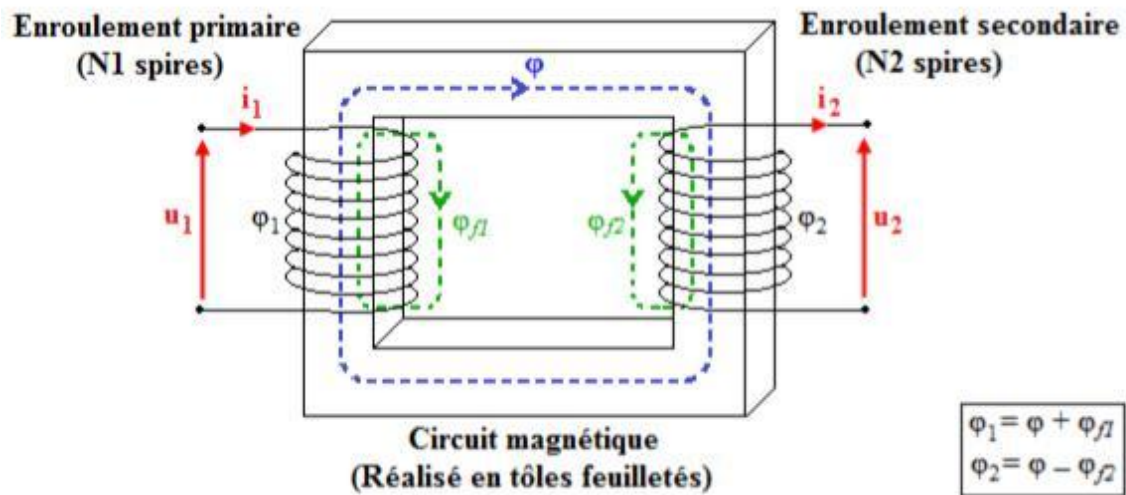


Fig. I.19 : Schéma de principe du transformateur.

L'enroulement primaire alimenté par une tension variable crée un flux magnétique variable qui va parcourir le circuit magnétique. L'enroulement secondaire est alors soumis à un flux variable et va donc engendrer par induction une f.é.m à ses bornes. (loi de Lenz-Faraday)

I.4.4.1.3 Transformateur parfait (T.P) :

Les enroulements ont le comportement d'une bobine à noyau de fer sans fuites magnétique $\phi_{f1} = \phi_{f2} = 0$: On note ϕ : flux utile créée par spire dans les enroulements primaire et secondaire.

La loi de Lenz-Faraday nous permet d'écrire :

$$\text{Au primaire : } u_1(t) = -e_1(t) = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt}$$

$$\text{Au secondaire : } u_2(t) = e_2(t) = -N_2 \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Cette relation indique que les tensions $u_1(t)$ et $u_2(t)$ sont en opposition de Phase.

La relation entre les valeurs efficaces U_1 et U_2 ne tient pas compte du déphasage :

$$U_2 / U_1 = N_2 / N_1$$

On définit le rapport de transformation :

$$m = N_2 / N_1 = U_2 / U_1 = I_1 / I_2$$

Si $m > 1$ le transformateur est **élévateur de tension**.

Si $m < 1$ le transformateur est **abaisseur de tension**.

La représentation symbolique d'un (T.P) :

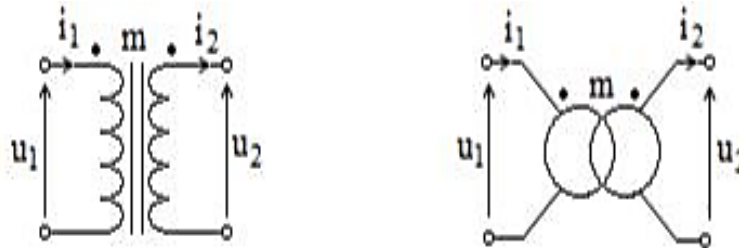


Fig. I.20 : Représentation symbolique d'un Transformateur parfait

I.4.4.1.4 Formule de Boucherot :

En régime sinusoïdal on a : $i(t) = U_1 \sqrt{2} \cos(\omega t)$

$$i(t) = N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} \rightarrow d\phi(t) = \frac{U_1 \sqrt{2}}{N_1} \cos \omega t dt \rightarrow d\phi(t) - d\phi(0) = \int \frac{U_1 \sqrt{2}}{N_1} \cos \omega t dt$$

Si on considère le flux initial $\phi(0) = 0$;

$$\phi(t) = \frac{U_1 \sqrt{2}}{N_1 \omega} \sin \omega t \rightarrow \phi_{max} = \frac{U_1 \sqrt{2}}{N_1 2\pi f} \rightarrow U_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \phi_{max}$$

De la même façon on tire : $U_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \phi_{max}$

Or $\phi_{max} = B_{max} * S$ avec S section du circuit magnétique (m2) et B_{max} champ d'induction maximal (T: Tesla).

Alors les formules de Boucherot sont données par :

$$U_1 = 4.44 f B_{max} N_1 S \text{ et } U_2 = 4.44 f B_{max} N_2 S$$

I.5 Classification des transformateurs :

Les transformateurs sont classifiés selon :

1. Diviser selon les phases :

- 1) transformateur monophasé: utilisé pour la charge monophasée et le groupe de transformateur triphasé.
- 2) transformateur triphasé: il est utilisé pour élever et abaisser la tension du système triphasé.

2. Selon la méthode de refroidissement:

- 1) transformateur de type sec: compter sur le refroidissement par convection naturelle de l'air ou augmenter le ventilateur de refroidissement, utilisé dans les immeubles de grande hauteur,

plus de site de péage à grande vitesse et l'éclairage de l'éclairage local, circuit électronique et autres transformateurs de petite capacité.

2) Transformateur immergé dans l'huile: se servir de l'huile comme fluide de refroidissement, comme l'auto-refroidissement immergé dans l'huile, le refroidissement par air immergé dans l'huile, le refroidissement par eau, la circulation d'huile forcée, etc.

3. Par utilisation:

1) transformateur de puissance: utilisé pour élever et abaisser la tension du système de transmission et de distribution d'énergie.

2) les transformateurs de mesure: tels que les transformateurs de tension, les transformateurs de courant, les instruments de mesure et les dispositifs de protection des relais.

3) transformateur d'essai: il peut générer une haute tension et effectuer un test de haute tension sur l'équipement électrique.

4) transformateur spécial: tel que le transformateur de four électrique, le transformateur de redresseur, le transformateur d'ajustement, le transformateur de condensateur, le transformateur déphaseur, etc.

4. Selon la forme d'enroulement:

1) transformateur à double enroulement: il est utilisé pour connecter deux niveaux de tension dans le système d'alimentation.

2) transformateur à trois enroulements: généralement utilisé dans les sous-stations de transformateurs régionaux du système d'alimentation, connectés à trois niveaux de tension.

3) transformateur d'auto-couplage: il est utilisé pour connecter le système d'alimentation avec une tension différente. Il peut également être utilisé comme un transformateur normal ou un transformateur drop-back.

5. En forme de noyau de fer:

1) transformateur de noyau: transformateur de puissance à haute tension.

2) transformateur en alliage amorphe, transformateur de base de fer amorphe alliage est d'utiliser de nouveaux matériaux magnétiques, le courant à vide est tombé environ 80%, l'effet D'économie d'énergie est transformateur de distribution idéal, particulièrement adapté pour les réseaux électriques ruraux et les régions en développement.

3) transformateur de coquille: transformateur spécial pour le grand courant, tel que le transformateur de four et le transformateur de soudure; Ou transformateurs de puissance pour des instruments électroniques, télévision, radio, etc.

I.5.1 Transformateurs de distributions :

I.5.1.1 Définition :

Les transformateurs de distribution sont utilisés dans les réseaux électriques, pour modifier et adapter les valeurs de tensions et courants.



Fig. I.21: Transformateur de distribution

Schématiquement, un transformateur se compose de deux enroulements (ou bobines) entourant un circuit magnétique (appelé encore noyau, constitué de tôles magnétiques). Chaque bobine est constituée de spires, matériau conducteur comme le cuivre ou l'aluminium, isolées les unes des autres. Elles sont reliées à deux réseaux électriques, de tension différente. Une tension alternative d'alimentation aux bornes de l'une des bobines génère un flux magnétique variable (et donc une induction magnétique dans le circuit magnétique) créant une tension induite dans l'autre bobine. Le rapport de tension entre les deux bobines est proportionnel aux nombres de spires.

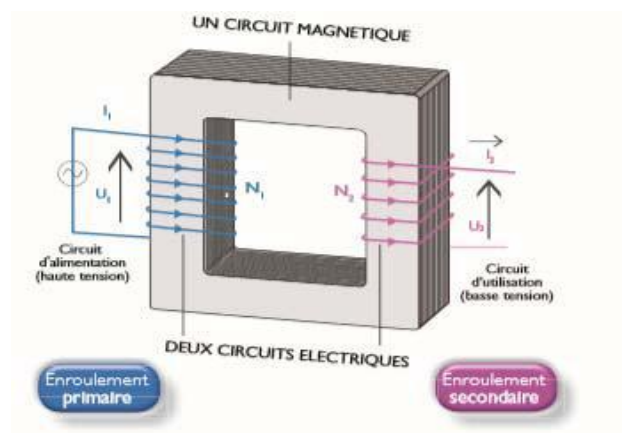


Fig. I.22 : Schéma de principe d'un transformateur abaisseur

I.5.1.2 Technologie de la construction des transformateurs de distributions

On distingue essentiellement deux technologies : Les transformateurs à diélectrique liquide (ou immergés) et les transformateurs dits "secs".

* Transformateurs à diélectrique liquide :

Le circuit magnétique et les enroulements sont immergés dans un diélectrique liquide qui assure l'isolation et l'évacuation des pertes caloriques du transformateur. Ils sont utilisés Pour : Les postes non surveillés car ils ne nécessitent pas d'entretien. Les ambiances sévères si le revêtement de la cuve est adapté. Par contre, l'emploi de ces transformateurs pose le problème d'éventuelles pollutions à la suite de fuites de diélectrique (on utilise donc un bac de rétention) et sont dangereux en cas d'incendie (fumées toxiques).



Fig. I.23 : Transformateur de distribution a diélectrique liquide

* transformateurs secs :

Le circuit magnétique est isolé dans une matière isolante sèche. Le refroidissement est assuré par l'air ambiant. Ils sont utilisés dans des locaux où les conditions de poussière, d'humidité et de température sont maîtrisées. Ils sont notamment utilisés pour les grands bâtiments car ils présentent peu de risque en cas d'incendie.



Fig. I.24 : Transformateur distribution de type sec

I.5.1.3 Constitution générale du transformateur de distribution :

La majorité des transformateurs de distributions sont de construction triphasée, et ses principaux organes sont représentés sur la (figure I.26):



Fig. I.25 : Constitution générale du transformateur de distribution :

Dans cette figure sont représentés les éléments suivants :

Les transformateurs sont devisés en deux parties :

I. 5 .1.3.1 Partie active :

- **Circuit magnétique:** Le noyau magnétique constitué de tôles d'acier au silicium à grains orientés. L'empilage et l'assemblage des tôles doivent être réalisés de manière à ce que le transformateur ait les meilleures performances possible du point de vue électrodynamique, électrique et acoustique ;
- **Les enroulements :** Les enroulements (feuillard ou rond, ou méplat de cuivre ou d'aluminium) sont montés sur le noyau. Les formes de bobinages, les sections et les nombres de spires sont conditionnés par les contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement permettant d'assurer la circulation d'huile et les échanges thermiques.

I.5.1.3.2 Partie non active (auxiliaires) :

- **La cuve :** constituée de tôles d'acier. Les parois de la cuve sont, selon les modèles, radiantes à ailettes ou rigides équipées de radiateurs amovibles connectés par une vanne d'arrêt. La structure et les soudures d'assemblage peuvent être renforcées dans le cas où une bonne tenue au vide est nécessaire.

- Le conservateur d'huile (réservoir métallique (acier en général) est situé sur le dessus du transformateur. Il joue un rôle de vase d'expansion pour l'huile. Les variations de température de l'huile impliquent des variations du volume. Le conservateur permet au niveau d'huile de varier sans affecter la pression dans le transformateur, ni découvrir (mettre à nu) les parties actives. Dans certains cas, une poche souple est présente dans le conservateur ; elle permet d'éviter à l'huile d'entrer en contact avec l'air ambiant. Certains transformateurs sont munis d'assécheur permettant de limiter la teneur en eau de l'air pénétrant dans le conservateur.
- Commutateur hors tension c'est à dire changeur de prise.
- Le fluide diélectrique (huiles minérales, synthétiques ou végétales).
- Les isolants solides (papiers à base de celluloses, rubans, vernis, résines époxydes, cartons, bois...)
- Thermomètre à cadran
- Avertisseur de surchauffe
- Indicateur de niveau d'huile
- Protection Buchholz
- Bloc de protection hermétique DGPT2
- Déshydrateur d'air.
- Traversées embrochables (isolateurs HT et BT).

I.5.1.4 Techniques de construction des transformateurs de distributions :

Deux techniques employées :




- **Étanche à remplissage total (ERT) jusqu'à 10 MVA : [9]**

Mise au point par France-Transfo, la technique du remplissage total (ERT) "sans matelas gazeux" des cuves étanches des transformateurs immergés a été adoptée par EDF en 1972. Toute oxydation du diélectrique liquide par contact avec l'air ambiant est évitée. Le transformateur est simplifié, ce qui se traduit par : _ une économie d'achat et un gain d'encombrement : ni assécheur d'air, ni conservateur de liquide _ une grande facilité de raccordement : dégagement total de la plage des bornes haute et basse tension _ une réduction considérable des servitudes d'entretien (simple surveillance). La dilatation du diélectrique est compensée par la déformation élastique des parois ondulées de la cuve, parois dont la souplesse mécanique permet une variation adéquate du volume intérieur de la cuve (figure (a) ci-contre)

• **Respirant avec conservateur :** [9]

La dilatation du diélectrique se fait dans un réservoir d'expansion placé au-dessus de la cuve (ou conservateur). La surface du diélectrique peut être en contact direct avec l'air ambiant ou en être séparé par une paroi étanche en matière synthétique déformable. Dans tous les cas un assécheur d'air (avec un produit dessiccateur) évite l'entrée d'humidité à l'intérieur du réservoir (figure (b) ci-contre).

Tableau I.2 : comparaison des techniques de transformateurs immergés

technologie	ERT (étanche à remplissage total)	respirant avec conservateur
		
caractéristique	le diélectrique n'est pas en contact avec l'atmosphère	le diélectrique est en contact avec l'atmosphère
reprise d'humidité	non	oui
absorption d'oxygène	non	oui
oxydation du diélectrique	non	oui
dégradation de l'isolement	non	oui
maintenance	faible	forte
entretien de l'assécheur	non	oui
analyse de l'huile tous les (recommandé par France transfo)	10 ans	3 ans

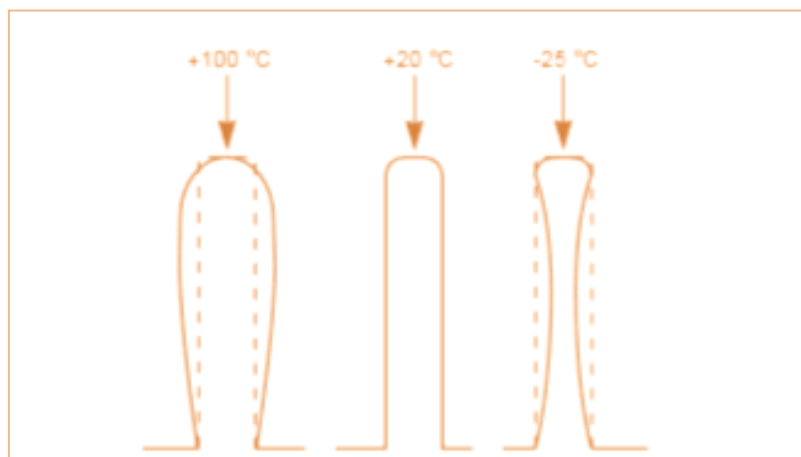


Fig. I.26 : ERT (effet des variations de températures sur la déformation élastiques des ailettes).

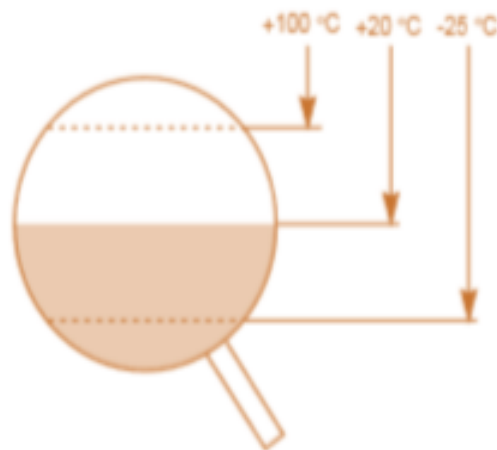


Fig. I.27 : Respirant avec conservateur (effet des variations de températures Sur la variation de niveau du réservoir).

I.5.1.4.1 Feuillage des circuits magnétiques : [2]

Les noyaux magnétiques feuilletés sont constitués de feuilles fines et isolées de fer. Grâce à cette technique, le noyau magnétique équivaut à plusieurs circuits magnétiques individuels, chacun ne recevant qu'une petite fraction du flux magnétique (en effet, leur Section est une fraction de la section globale du noyau). En outre, ces circuits présentent une résistance supérieure à celle d'un noyau non feuilleté, également du fait de leur section réduite. Pourtant, on peut constater que plus fines sont les feuilles, plus faibles sont les courants de Foucault. Voir § 2.1.3.2 sur les courants de Foucault = Eddy Currents. Attention sur le dessin, les lignes des courants de Foucault devraient être représentées perpendiculaires aux lignes de flux magnétique

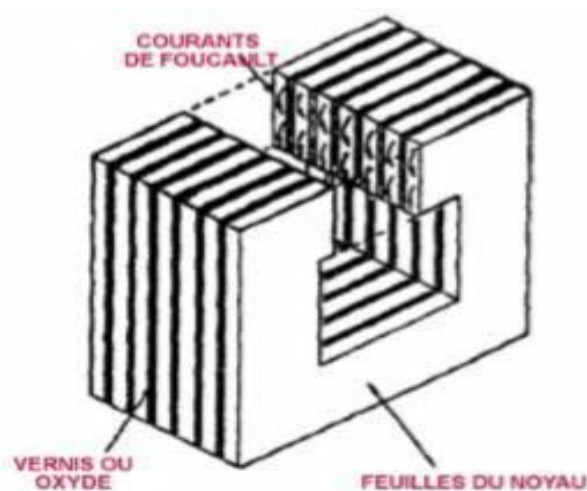


Fig. I.28 : Noyau feuilleté

Le noyau de fer d'un transformateur est constitué de feuilles de fer roulé et de 2 jeux de noyaux feuilletés encastrés l'un dans l'autre. Ce fer est traité de façon à présenter un noyau magnétique d'excellentes qualités de conduction magnétique (forte perméabilité) sur toute la longueur du noyau.

La perméabilité est le terme employé pour exprimer la façon dont un matériau conduit des lignes de force magnétique. Le fer présente également une résistance ohmique élevée au sein des plaques (dans l'épaisseur du noyau).

Il est nécessaire de laminier les feuilles de fer pour diminuer l'échauffement du noyau. [2]



Fig. I.29 : Transformateur à noyau feuilleté. Le haut des feuilles est visible sur la partie supérieure de l'unité.

➤ **Alliage de silicium** : [2]

Une petite addition de silicium au fer (environ 3 %) provoque une 'immense' augmentation de la résistivité, jusqu'à 4 fois. Une hausse supérieure de la concentration en silicium compromet les propriétés mécaniques de l'acier, d'où des difficultés de laminage.

Entre les 2 types d'acier silicium, à grains-orienté (GO) et grains non-orientés (GNO), le GO est préférable pour les noyaux magnétiques. Il est anisotropique, offre de meilleures propriétés magnétiques que le GNO dans une direction. Le champ magnétique dans le noyau de la bobine et du transformateur est statique (par rapport à celui des moteurs électriques), il est donc possible d'employer l'acier GO dans l'orientation choisie.

➤ **Fer carbonyle** : [2]

Les noyaux en poudre de fer carbonyle, un fer extrêmement pur, présentent une grande stabilité de paramètres dans une large gamme de températures et de niveaux de flux magnétique, ainsi que d'excellents facteurs Q entre 50 kHz et 200 MHz. Les noyaux en poudre de fer carbonyle sont principalement constitués de billes de taille micrométrique d'acier enveloppé

d'une couche isolante. Ceci équivaut à un circuit magnétique microscopique feuilleté (Cf. acier silicone, ci-dessus), ce qui réduit les courants de Foucault.

L'une des applications courantes de noyaux magnétiques à base de fer carbonyle sont les bobines d'inducteur 'large bande'.

➤ **Poudre de fer:** [2]

Les noyaux constitués de poudre fer réduite par l'hydrogène présentent une perméabilité supérieure mais un facteur Q inférieur. Ils sont principalement employés pour les filtres à interférences électromagnétiques et inductances de lissage basse fréquence, notamment pour les alimentations en mode commuté.

I.5.1.4.2 Enroulement :

Un transformateur présente 2 enroulements, le primaire et le secondaire.

L'enroulement primaire est la bobine qui reçoit l'énergie. Il est formé, bobiné et façonné autour du noyau de fer.

L'enroulement secondaire est la bobine qui décharge l'énergie sous une tension transformée ou modifiée.

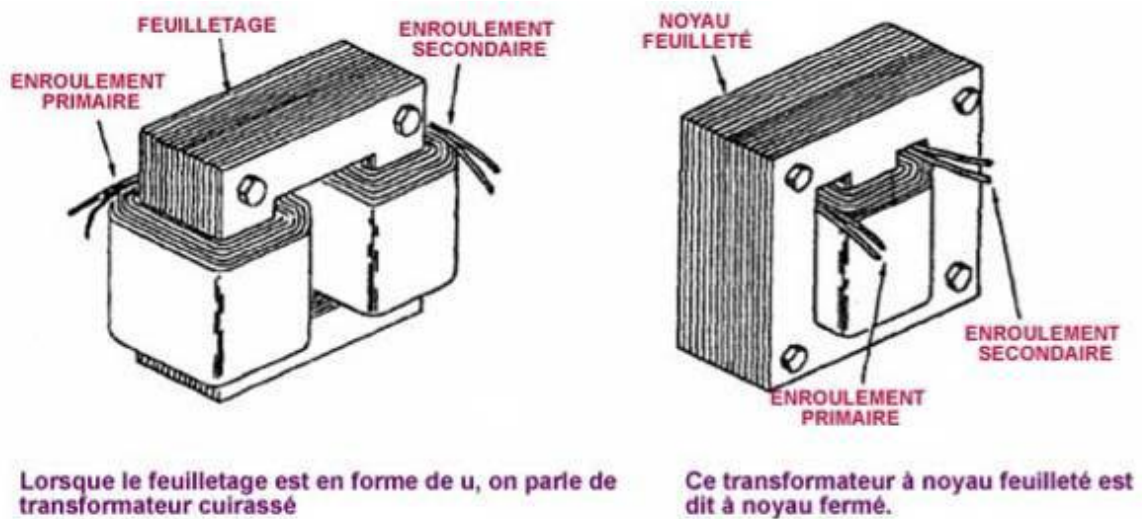


Fig. I. 30 : Enroulements de transformateur

Lorsqu'un courant instable ou alternatif est appliqué sur l'enroulement primaire, ce courant primaire produit un champ magnétique « instable » dans le noyau de fer.

Ce champ instable traverse la bobine secondaire et induit une tension dépendant du nombre de conducteurs dans la bobine secondaire par lignes magnétiques. (Cf. paragraphe suivant). [2]

Les fils des enroulements adjacents dans une bobine et des différents enroulements doivent être électriquement isolés les uns des autres. Le fil employé est en général un fil de Bobinage. Le fil de bobinage (ou fil émaillé) est un fil de cuivre revêtu d'un vernis ou d'un autre revêtement synthétique.

Le matériau conducteur employé pour l'enroulement dépend de l'application. Les transformateurs à faible puissance et de signal sont bobinés avec un fil de cuivre, âme pleine, généralement isolé avec de l'émail et parfois avec une isolation supplémentaire. Les plus grands transformateurs de puissance peuvent être bobinés avec des conducteurs rectangulaires en cuivre ou aluminium.

Des barrettes de connexion des conducteurs sont employées pour les courants très forts. Les transformateurs haute fréquence qui fonctionnent depuis des dizaines à des centaines de kilohertz présentent des enroulements en fil de Litz, afin de minimiser les pertes par effet pelliculaire dans les conducteurs. Les grands transformateurs de puissance emploient également des fils (câbles) multiconducteurs, dans la mesure où, dans le cas contraire et même à faible puissance de fréquence, une distribution non uniforme de courant pourrait exister dans les enroulements à courant élevé.

Chaque conducteur est isolé des autres et les conducteurs sont organisés de façon à ce qu'en certains points de l'enroulement ou au sein de l'enroulement complet, chaque portion occupe différentes positions relatives dans le conducteur entier. Cette « transposition » égalise le courant qui circule dans chaque conducteur et réduit les pertes de courant de Foucault dans l'enroulement lui-même. [2]

I.5.1.4.3 Isolation :

Les enroulements étant soumis à des tensions électriques il faut les isoler pour assurer leur bon fonctionnement et la sécurité des utilisateurs.

Les fils ronds ou les méplats sont recouverts d'une couche de vernis cuit constituant un émail. Les méplats existent aussi isolés par un enrubannage d'isolant mince, voire de ruban de fil de verre tressé, le tout imprégné dans la résine pour le verre tressé.

La tension entre couche présentant un risque de claquage est contrée par la mise en place d'un isolant sous forme de ruban mince et ceci systématiquement entre enroulements. L'ensemble du bobinage, voire le transformateur tout entier, est immergé dans un vernis, par gravité ou sous vide et pression, pour être ensuite passé dans une étuve afin d'être recuit.

Pour toute isolation une température maximale à ne pas dépasser est définie. Au-delà la durée de vie du matériau diminue rapidement. [2]

I.5.1.4.4 Pertes d'énergie

Un transformateur idéal ne devrait pas présenter de pertes et devrait par conséquent être efficace à 100 %. En pratique, l'énergie est dissipée à la fois du fait de la résistance des enroulements, sous forme de pertes cuivre ou pertes en $I^2 R$ (par effet Joule) et du fait des effets magnétiques initialement attribuables au noyau (soit les pertes fer mesurées en watts par unité de poids).

Les transformateurs présentent en général un très bon rendement.

Les grands transformateurs de puissance (plus de 50 MVA) peuvent présenter un rendement de 99,75 %. Les petits transformateurs, tels que les petits blocs enfichables employés pour les applications électroniques courantes peuvent présenter un rendement inférieur à 85 %. Les pertes des transformateurs ont différentes origines :

Pertes dans les enroulements (Résistance d'enroulement)

Le courant qui circule dans les enroulements provoque un réchauffement des conducteurs (pertes $I^2 R$ ou pertes par effet Joule). À plus haute fréquence, l'effet pelliculaire et l'effet de proximité créent une résistance d'enroulement et des pertes supplémentaires. [2]

- **Courants de Foucault :** [2]

Lorsque les plaques circulaires se déplacent (V) dans une petite zone à champ magnétique constant (B) perpendiculaire, des courants de Foucault (I) sont induits sur la plaque. La direction de ces courants est donnée par la Loi de Lenz Note : pour les transformateurs, les plaques (feuilles laminées) ne bougent pas, ce qui n'empêche pas les courants de Foucault d'être présents.

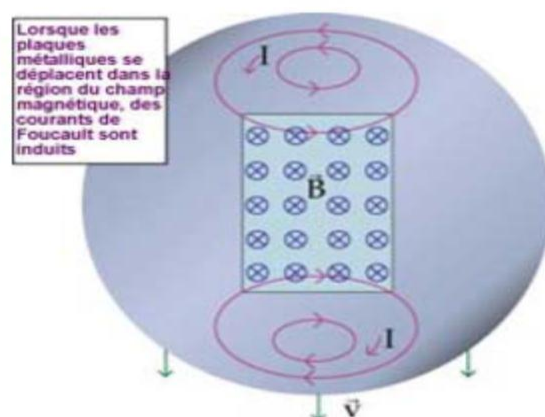


Fig. I.31: Courants de Foucault

Les courants de Foucault induits circulent dans le noyau, ce qui engendre un échauffement résistif. On ajoute du silicium à l'acier, pour contribuer à contrôler les courants de Foucault. L'ajout de silicium présente également l'avantage de retarder le vieillissement de « l'acier électrique », qui posait problème il y a quelques années. [2]

- **Pertes d'hystérésis**

A chaque fois que le champ magnétique est inversé (50 fois par seconde en 50 Hz), une faible quantité d'énergie est perdue en hystérésis dans le noyau magnétique. La quantité (de perte) d'hystérésis est fonction du matériau du noyau.

- **Magnétostriction : [2]**

Le flux magnétique dans le noyau provoque une expansion physique et une légère contraction de ce dernier (ou modification des dimensions physiques), avec le champ magnétique changeant, effet connu sous le nom de magnétostriction. Ceci provoque en outre des pertes dues à l'échauffement de friction dans les noyaux ferromagnétiques sensibles.

- **Pertes mécaniques : [2]**

Outre la magnétostriction, le champ magnétique alternatif entraîne des forces électromagnétiques fluctuantes, entre les enroulements primaire et secondaire. Celles-ci engendrent des vibrations dans la structure métallique environnante, ce qui crée un souffle ou un bourdonnement familier et consomme de petites quantités d'énergie.

- **Pertes vagabondes : [2]**

Tout le champ magnétique produit par le primaire n'est pas intercepté par le secondaire. Une partie du flux de fuite peut ainsi induire des courants de Foucault au sein des objets conducteurs à proximité, tels que la structure de support du transformateur et être ainsi transformée en chaleur.

I.5.1.4.5 Systèmes de refroidissement : [2]

Les grands transformateurs de puissance peuvent être équipés de ventilateurs, pompes à huile de refroidissement ou échangeurs de chaleur refroidis à l'eau, conçus pour dissiper la chaleur due aux pertes de cuivre et fer. Typiquement, on considère que la puissance employée pour faire fonctionner le système de refroidissement fait partie des pertes du transformateur

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons conclu que les transformateurs sont des machines statiques utilisés pour transport d'énergie électrique dans un réseau à autre en modifiant les niveaux de tensions et des courants par élévation ou abaissions.

Ainsi la constitution et la technologie des transformateurs, tels que le circuit magnétique et les Enroulements ensuite les différentes pertes d'énergies au niveau des transformateurs.

Chapitre II

Technologie des enroulements et circuits magnétiques des transformateurs

II.1 Introduction

Les enroulements sont constitués des conducteurs transportant le courant ils sont enroulés autour des sections de l'âme, et ceux-ci doivent être correctement isolés, soutenus et refroidis à résister à des conditions d'exploitation et d'essai. Le Cuivre et l'aluminium sont les principaux matériaux utilisés pour la fonction les enroulements des transformateurs de puissance. Bien que l'aluminium soit plus léger et moins coûteux que le cuivre, une section transversale du conducteur en aluminium plus importante doit être utilisée pour transporter un courant avec une performance similaire à celle du cuivre. Le cuivre a une résistance mécanique plus élevée et il est utilisé presque exclusivement, sauf dans les gammes de plus petite taille, où des conducteurs en aluminium peuvent être tout à fait acceptables.

II.2 Enroulements des transformateurs [6]

II.2.1. Généralité

Les enroulements de transformateurs sont faits principalement de cuivre, et ils sont isolés généralement avec du papier. Il existe aussi des enroulements en aluminium.

Le cuivre a rendu possible une grande partie de l'industrie électrique actuelle car, en plus de ces excellentes propriétés mécaniques, le cuivre possède la plus haute conductivité des métaux commerciaux. Son importance dans les transformateurs est particulièrement significative due aux bénéfices importants sur la sauvegarde de place et de minimisation des pertes en charge par rapport à d'autres métaux.

Un transformateur est défini par un rapport de transformation correspondant au rapport de ses niveaux de tensions. Par convention ce rapport est supérieur ou égal à 1 et est donc défini par :

$$m = \text{haute tension} / \text{basse tension}$$

Ce rapport est électriquement obtenu par le rapport du nombre de spires constituant chaque enroulement (haute et basse tension).

Exemple :

Pour un transformateur de 220 kV / 20 kV, son rapport de transformation est de

$$m = 220 / 20 = 11$$

Ce qui implique que si l'enroulement basse tension possède

$$N1 = 100 \text{ spires}$$

L'enroulement haut tension aura

$$N2 = N1 \times m = 100 \times 11 = 1\ 100 \text{ spires}$$

II.2.2 Technologies de bobinages : [6]

Pour réaliser un enroulement de transformateur d'une tension nominale donnée et d'un nombre de spires défini, deux technologies de bobinages sont réalisables : cuirassé ou colonne.

Chacune d'elle est caractérisée par sa configuration d'enroulements par rapport au Circuit magnétique. La technologie dite cuirasser consiste à disposer les bobines au centre du circuit magnétique. Dans la technologie colonne, c'est l'inverse.

Chaque technologie tient les contraintes qui lui sont définies dans le cahier des charges. Le choix de l'une ou l'autre des technologies de bobinages relèvera souvent du constructeur.

Chacune d'elle a ses avantages qui peuvent être :

- Un gain de place (cuirassé)

- Une meilleure tenue au court-circuit (cuirassé)
- Un meilleur refroidissement (couches)
- Une meilleure tenue au choc de foudre (couches)
- Une (relative) facilitée de réalisation et bonne tenue diélectrique (galettes)

II.2.2.1 Cuirassé : généralités [6]

Dans la technologie cuirassée le circuit magnétique entoure les bobinages hauts et basse tensions d'une phase donnée, comme sur la figure ci-dessous.

De retour du flux magnétique à travers le circuit magnétique sont externes et entourent les bobinages. Grâce à son excellent arrangement de l'écrantage magnétique le transformateur cuirassé correspond particulièrement bien à la fourniture de Basse tension et fort courant, comme par exemple dans le cas de transformateurs de fours à arcs.

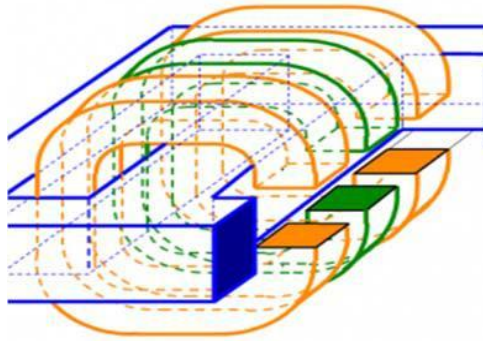


Figure II.1 : Transformateur de Type cuirassé

Cette technologie est particulièrement compacte par rapport à la technologie colonne. Cependant elle requière une certaine expérience et beaucoup de main d'œuvre quant à la construction des bobinages et à l'assemblage des tonnes de circuit magnétique.

Historiquement les américains avec Westinghouse construisaient des transformateurs cuirassés. En France, la plupart des transformateurs de puissance Jeumont Schneider Transformateurs (JST) sont de ce type. Quelques autres constructeurs fabriquent encore de nos jours des transformateurs cuirassés comme ABB ou Mitsubishi.

II.2.2.2 Colonne : généralités [6]

Les transformateurs à colonnes ont leur chemin de retour du flux magnétique qui passe dans des jambes de circuit magnétique qui sont entourées concentriquement par les enroulements principaux, comme sur la figure ci-dessous.

Dans un transformateur triphasé il y a une jambe de circuit magnétique par phase électrique. Ce type de transformateur est particulièrement répandu dans le monde pour tout type d'application.

Dans la technologie à colonne il y a principalement deux techniques de bobinages qui

Sont :

Le bobinage en couches le bobinage en galettes

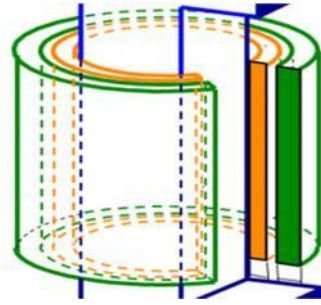


Fig. II.2 : Transformateur à colonnes

II.2.2.3 Colonne : en couches [6]

Un des avantages de cette construction est sa bonne répartition, par capacité, des chocs de foudre le long des spires. En revanche un des points à prendre en compte est que sur l'épaisseur d'une bobine on obtient la pleine tension de l'enroulement considéré. Ceci implique de bien isoler électriquement les couches entre elles.

Par construction l'huile peut relativement facilement passer de bas en haut à travers ces enroulements. Cela favorise leur refroidissement et les systèmes à huile naturelle (ONAN, ONAF) sont particulièrement bien adaptés.

Les enroulements en couches sont en général sur les enroulements hauts tension, et historiquement l'usine de fabrication Alstom Saint-Ouen a construit un grand nombre de transformateurs de ce type.

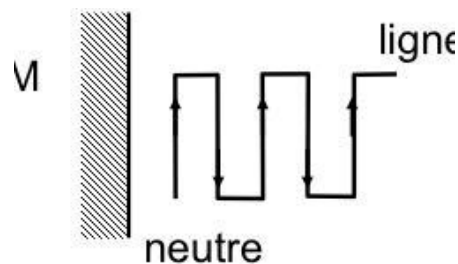


Fig. II.3 : Colonne en couches

II.2.2.4 Colonne : en galettes[6]

De par la construction des enroulements en galettes la pleine tension de l'enroulement est répartie sur toute la hauteur de la bobine, à contrario de l'enroulement en couches où la tension de l'enroulement est à tenir dans l'épaisseur du bobinage. Ainsi les précautions d'isolation à tenir sont moins contraignantes que la longue couche.

De façon générale les enroulements en galettes ont un facteur de remplissage de l'espace important.

Classiquement un seul conducteur est roulé pour réaliser l'ensemble de l'enroulement, ce qui est « relativement » simple à mettre en œuvre.

Pour améliorer la répartition des contraintes électriques, des chocs de foudre principalement, d'autres façons de rouler ou connecter les conducteurs ont été mises en œuvre.

Les enroulements en galettes les plus classiques étant :

Les galettes simples

Les galettes à spires entrelacées les galettes inter écran

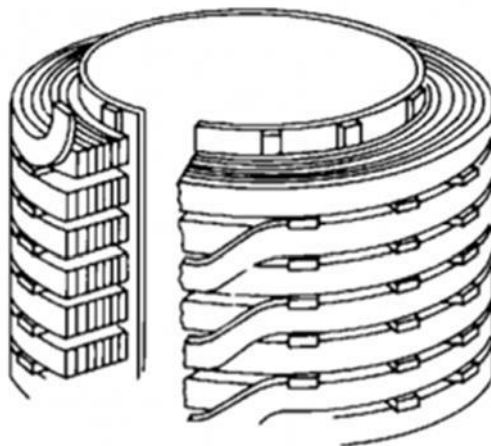


Fig. II.4 : Enroulement en galette.

II.2.3 L'isolement classique des conducteurs :

Est constitué par du coton, du papier, de l'émail, et plus récemment par des émaux synthétiques de grande qualité. Les bobines, une fois réalisées, sont imprégnées sous vide, puis passées au séchage et au pré serrage. Dans d'autres cas, la bobine entière est enrobée dans un moulage de résine Époxy, durcie au four.

II.2.4 L'enroulement concentrique : [8]

II.2.4.1 Enroulement concentrique des bobines base tension.

Cet enroulement s'exécute en couches successive sure des tubes en matière isolante, on sur un mandrin en bois, en tenant compte de l'isolant qu'il recevra dans ce dernier cas. Dans les bobinages concentriques, l'enroulement B.T. (gros fil) peut s'effectuer avec du fil rond ou méplat sur toute la hauteur de noyaux.

Quand il s'agit de forte intensité, on est amené à adopter un enroulement a plusieurs conducteurs en parallèle. Ce procédé permet de limiter les courants de Foucault qui prendraient naissance dans des conducteurs trop importants.les couches sont séparées soit par un isolant, soit par un canal de refroidissement pour les puissances importantes.

L'enroulement B.T.se place autour de noyau magnétiques, isolé de celui-ci par son support en tube isolant .Dans d'autres cas, la B.T. est maintenue à distance du noyau par des cales ou des baguettes isolantes qui laissent circuler l'huile entre fer et bobinage.

II.2.4.2 Enroulement concentrique de la bobine haute tension.

Il se fait sur un cylindre isolant qui enveloppera le circuit B.T. sur toute la hauteur d'un noyau. Les galettes en fil sont bobinées avec interposition de papier ou de toile entre couches. La quantité de ces isolants est fonction de la différence de potentiel qui existe entre ces couches.

Les galettes d'extrémités, reliées au réseau, doivent avoir un isolement renforcé pour résister aux surtensions transitoires susceptibles de se produire en service.

Entre les galettes, on intervalle un disque isolant supportant des tasseaux qui servent à ménager des canaux de refroidissement .Pour éviter toute connexion à l'intérieur de ces canaux, une bobine sur deux est enroulée en sens inverse

Le réglage axial du cylindre H.T. sur la B.T. est obtenu au moyen de réglettes isolantes, formant des canaux qui assurent la circulation de l'air ou de l'huile de refroidissement.

II.3 Le circuit magnétique : [6]

II.3.1 Généralités :

Le but d'un circuit magnétique de transformateur est de fournir un chemin de basse réluctance pour le flux magnétique qui lie les enroulements primaire et secondaire. Afin d'optimiser le passage de cette induction avec un minimum de matière l'élément de base est la tôle de circuit magnétique en fer à grains orientés isolées Carlite.

Classiquement dans un transformateur triphasé le circuit magnétique aura la forme :

Les deux parties horizontales supérieures et inférieures sont les culasses. Les trois parties verticales sont les jambes du circuit magnétique.

Autour de chacune de ces jambes du circuit magnétiques se trouve une phase complète du transformateur, à savoir typiquement un enroulement basse tension, un enroulement haute tension et souvent un enroulement de réglage.

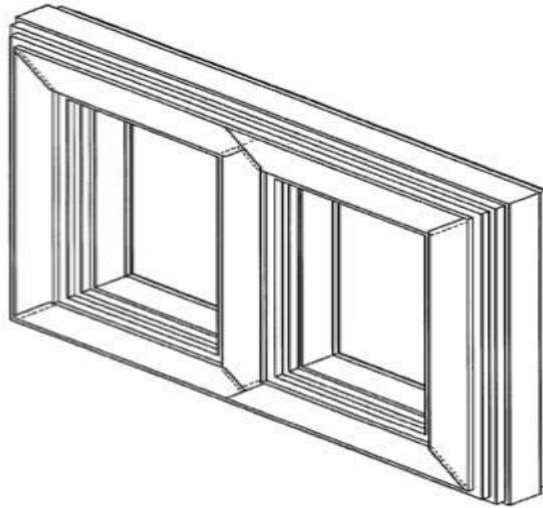


Fig. II.5 : Circuit magnétique

II.3.2 Construction : [6]

Le circuit magnétique est composé de tonnes de tôles (souvent une dizaine) ne faisant que quelques dixièmes de mm d'épaisseur : de 0,28 à 0,35 mm. C'est pourquoi il faut que tout cet assemblage qui forme le circuit final soit extrêmement bien tenu mécaniquement. Sur le schéma ci-dessous on peut voir de nombreuses sangles ainsi que les calages en bois sous la culasse inférieure pour bien rigidifier l'ensemble dans le temps.

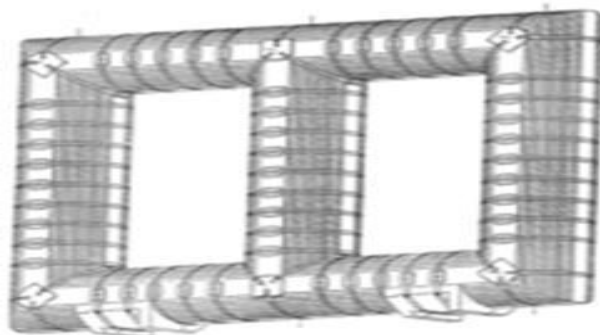


Fig. II.6 : Construction du circuit magnétique

Pour réaliser ou réparer le circuit magnétique une main d'œuvre qualifiée est indispensable afin de ne pas avoir de jeux dans cet assemblage complexe. Des jeux au niveau des tôles pourraient impliquer une tenue mécanique non suffisante dans le temps, des entrefers qui augmenteraient les pertes fer ainsi qu'une augmentation du bruit à vide.

Les milliers de tôles devant former une structure solide celles-ci s'entrecroisent par petits paquets aux extrémités au niveau du talon ainsi que sur la colonne du milieu au niveau du joint en T.



Fig. II.7 : Assemblage et jointage des tôles du circuit magnétique

II.3.3 Pertes fer : [6]

Sous l'effet de l'induction magnétique le circuit magnétique est le sein des pertes fer. Elles sont dues à l'hystérésis du circuit magnétique et aux courants de Foucault qui sont induits dans celui-ci. Ces pertes sont minimisées par construction en feuilletant le circuit magnétique avec de fines tôles de fer isolées et par les précautions de montage pour ne pas avoir d'entrefers.

➤ Circuit magnétique du transformateur monophasé : [8]

Sont généralement à deux colonnes, mais ils sont à trois colonnes lorsqu'ils sont du Type cuirassé (pour les petits modèles). Dans ces derniers, le bobinage se place sur le noyau central, de sorte qu'il est complètement enveloppé par le circuit magnétique, ce qui réduit au maximum les pertes de flux.

➤ Circuit magnétique du transformateur triphasé :

Possèdent trois colonnes qui servent de support aux trois phases du bobinage. Les circuits magnétiques des transformateurs sont composés de tôles de faible épaisseur, à coefficient d'hystérésis réduit et à grande résistivité. Ces tôles sont en acier doux à 4% de silicium et leur épaisseur varie de 0.35 à 5 mm selon la destination et l'importance du transformateur.

II.4 Isolation du bobinage de transformateur :

Les enroulements étant soumis à des tensions électriques il faut les isoler pour assurer leur bon fonctionnement et la sécurité des utilisateurs. [8]

Les fils ronds ou les méplats sont recouverts d'une couche de vernis cuit constituant un émail. Les méplats existent aussi isolés par un enrubannage d'isolant mince, voire de ruban de fil de verre tressé, le tout imprégné dans la résine pour le verre tressé.

La tension entre couche présentant un risque de claquage est contrée par la mise en place d'un isolant sous forme de ruban mince et ceci systématiquement entre enroulements. L'ensemble du bobinage, voire le transformateur tout entier, est immergé dans un vernis, par gravité ou sous vide et pression, pour être ensuite passé dans une étuve afin d'être recuit.

Pour toute isolation une température maximale à ne pas dépasser est définie. Au-delà la durée de vie du matériau diminue rapidement.

II.5 Types d'enroulement de bobinage des transformateurs de puissances. [5]

II.5.1 Couche d'enroulement :

Pour la basse tension, (moins de 10 kV), la technique d'enroulement utilisée est la technique d'enroulement de couche parfois appelé enroulement hélicoïdal ou barillet. Dans cette technique, les tours requis pour l'enroulement sont enroulés en une ou plusieurs couches concentriques, avec les spires de chaque couche étant enroulée côte à côte le long de la longueur axiale de la bobine jusqu'à ce que la couche est saturée. Les conducteurs du bobinage sont ainsi isolés entre les spires, il y aura des épaisseurs minimales de l'isolation. Les enroulements basse tension sont généralement enroulés de haut en bas, de bas en haut etc. en utilisant un conducteur continu, jusqu'à ce que toutes les couches sont complètes. Les enroulements à haute tension, peuvent être enroulés dans le même sens, à condition que la tension entre les couches n'est pas trop grande, Pour réduire la contrainte de tension entre les couches, les enroulements haute tension sont souvent enroulés dans une seule direction, par exemple, de haut en bas. Lorsque la première couche d'enroulement est terminé, le conducteur d'enroulement est disposé de l'autre côté de la couche remplie de bas en haut et ensuite la couche suivante est enroulée, à nouveau de haut en bas. De cette manière, la contrainte de tension entre les couches est divisée par deux.

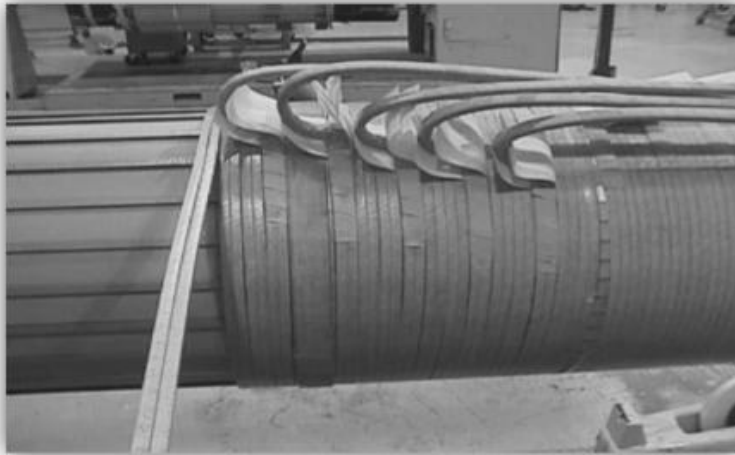


Figure II.8 : Enroulements de la couche

II.5.2 Disque d'enroulements : [5]

Disque d'enroulements Dans le disque d'enroulement, le nombre requis de tours est enroulé dans un certain nombre de disques horizontaux situés le long de la longueur axiale de la bobine. Le conducteur est généralement rectangulaire en section transversale et les spires sont enroulées dans une direction radiale, l'une sur l'autre jusqu'à ce que le nombre requis de tours par disque est atteint. Le conducteur est alors déplacé vers le disque suivant et le processus est répété jusqu'à ce que tous les virages ont été liquidés. Il existe un espace d'air, ou d'un conduit, entre chaque paire de disques. Le disque d'enroulement exige seulement l'isolation sur le conducteur lui même, aucune isolation supplémentaire est nécessaire entre les couches, comme dans la couche d'enroulement.

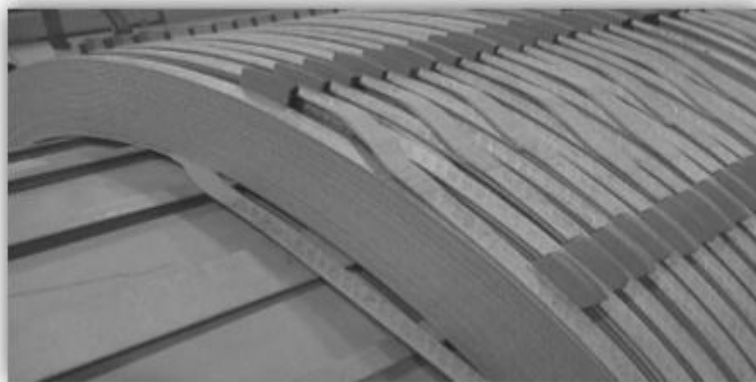


Fig. II.9 : Disque d'enroulement

II.6 Exemples de type de défauts de transformateurs : [6]

Le transformateur est un appareil électrique qui a une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Cependant en fonction de son utilisation, sa maintenance, sa charge, les perturbations qu'il subit, etc. il peut être le sein de défaillances plus ou moins importantes. Voici quelques uns des défauts pouvant arriver sur les transformateurs.

❖ Défaut de type électrodynamique

En cas de court-circuit, interne ou externe au transformateur, les courants au sein des enroulements sont très importants et peuvent provoquer des déplacements mécaniques de ceux-ci. Ci-contre un exemple d'enroulement ayant subi un court-circuit.

Afin d'empêcher le déplacement des bobinages sur des efforts de court-circuit tous les enroulements sont très solidement serrés en usine lors de sa construction, ou suite à des réparations de la partie active.



Fig. II.10 : Défaut de type électrodynamique

❖ Défaut de type diélectrique

Lors de surtensions sur le réseau, comme des chocs de foudre ou de manoeuvre de disjoncteurs par exemple, le papier isolant des enroulements peut permettre un amorçage entre spires (photo ci-contre) ou dans la cuve.

Si l'huile est trop acide ou le transformateur a subi de nombreux court-circuits dans sa vie alors ses papiers isolants peuvent être endommagés ou fatigués. Par suite une contrainte électrique trop importante peut dépasser la tenue diélectrique de ces papiers à des endroits critiques, alors un amorçage se formera à cet endroit.



Fig. II.11 : Défaut de type diélectrique

❖ Point chaud régleur

Quel que soit la marque si les régleurs, en charge comme hors charge, ne sont pas manipulés durant des années ceux-ci peuvent former des points chauds au niveau de leurs prises internes comme ci-contre.

Le régleur par construction possède plusieurs prises qui incluent des contacts pour que le courant nominal passe sur chaque position.

Si les positions ne sont jamais passées mécaniquement, ces contacts voyant passer du courant peuvent chauffer anormalement. Par suite l'huile peut se décomposer et former des points de carbone solide autour du défaut. Dans certains cas le contact peut même être soudé.



Fig. II.12 : Point chaud régleur

❖ Fuite d'huile [6]

Le transformateur possède de nombreux joints en caoutchouc, typiquement en bas de cuve, à la base des bornes, aux raccords de la réfrigération, etc.

Dans le temps ces joints peuvent se dégrader, se durcir,... et fuir ! Comme on peut le voir sur la photo ci-contre une fuite d'huile coule le long de la cuve sans arrêt.

Des inspections visuelles régulières de l'état du transformateur avec une maintenance adaptée permettent de s'affranchir des fuites d'huile.



Fig. II.13 : Fuite d'huile du transformateur

II.7 Conclusion

Ce chapitre a été présenté quelques techniques concernant la technologie de la constitution des enroulements et des circuits magnétiques des transformateurs de puissance ensuite nous allons définir des différents défauts importants affectés sur les transformateurs enfin on peut conclure que la forme et le type de bobinages des enroulements et la construction du circuit magnétique puis l'isolation et le système de refroidissement des transformateurs distributions sont importants pour le domaine industriel

Chapitre III
Réalisation de bobinage du
transformateur De distribution.

III.1 Introduction

Ce chapitre, se base sur la méthode technique de réparation de transformateur et réalisation de leur bobinage, ainsi que les procédures détaillées et les étapes de réparation pour intervention sur Ce type d'enroulement du transformateur de distribution. Cette réparation est une maintenance curative qui n'est pas programmé, malgré ce type de défaut c'est rare.

III.2 Politique de maintenance des transformateurs :

III.2.1 Maintenance : [7]

III.2.1.1 Définition :

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise, norme (NF EN 13306 X60-319, juin 2001)

La maintenance est déclinable en deux approches :

- * Préventive : qui sera déclinée en une maintenance systématique ou conditionnelle
- * Corrective : qui sera appliquée d'urgence ou en différé

III.2.2 Maintenance : application au transformateur

Selon l'exploitation plus ou moins intensive du transformateur et sa criticité, l'espacement des actions de maintenance préventive variera dans le temps. Les actions réalisées, ainsi que leur fréquence, seront le résultat d'une politique de maintenance définie par l'exploitant. Un premier guide international relativement complet sur le sujet a été publié cette année Il est possible que tout, ou partie, de ces actions soient sous-traitées à des entreprises spécialisées.

La tendance dans les politiques de maintenance des parcs de transformateurs évolue plutôt d'une maintenance systématique sur tous les appareils, à intervalles réguliers, vers une maintenance conditionnelle afin d'optimiser les coûts. Dans ce cas, il est nécessaire d'établir l'état d'un appareil, principalement par le suivi des analyses d'huile ou des conditions d'exploitation, avant d'engager des opérations, un entretien ou une réparation de celui-ci.

- Les principales opérations de maintenance préventive sont :

- * Le prélèvement d'huile, son analyse et son suivi dans le temps ;
- * Le changement de joints (fuyards), ou de traversées ;
- * L'adaptation d'une nouvelle réfrigération ;
- * Le resserrage de la partie active

- Les principales opérations de maintenance corrective suite à une avarie sont :

- * Le diagnostic après incident pour cibler l'état précis du transformateur.
- * Le remplacement d'accessoires.
- * La réparation du matériel.
- * Le traitement voire le remplacement d'huile selon les défauts engendrés.
- * L'achat d'un transformateur neuf.
- * Rebobinage du transformateur.

La connaissance des opérations passées de maintenance, ou réparation, effectuées sur un appareil peuvent faciliter le diagnostic en expliquant ou excluant certaines faiblesses. Du fait de leur bonne fiabilité dans le temps, il arrive parfois que les transformateurs finissent par être négligés, en surestimant leur durée de vie, et ils ne sont pas nécessairement pleinement pris en compte dans certaines politiques de gestion des risques. [7]

III.3 Exemple de réalisation du bobinage d'un transformateur de distribution pour un seul bobinage et pour une seule colonne.

III.3.1 Caractéristique techniques du transformateur :



Fig. III.1 : Plaque signalétique du transformateur MT/BT.

Marque : France transfo	Type: Minera
Puissance: 100KVA	Numéros de série: 671 971-01
Tension primaire : 5500V	Courant primaire : 10.5 A
Tension secondaire : 400V	Courant secondaire : 144.3 A
Couplage : Dyn11	Type de refroidissement : ONAN

Tableau III.1 : Caractéristique techniques du transformateur



Fi. III.2 : Transformateur de distribution MT/BT 100KVA

III.4 Procédures de bobinage et réparation du transformateur au niveau de L'atelier électromécanique :

III.4 .1 Matériel utilisé :

Appareil de mesure :

- * Micro ohmmètre pour mesure de la résistance ohmique du bobinage.
- * Mégohmmètre d'isolement pour mesurer la résistance d'isolement du bobinage.
- * Pont de mesure de rapport de transformation et vérification de l'indice horaire.
- * Spintermètres pour le mesurage de la tension de claquage d'huile.
- * Multimètre.



Fig. III.3 : Micro ohmmètre (contrôleur de la résistance ohmique du bobinage).



Fig. III.4 : Mégohmmètre 5KV (contrôleur d'isolement du bobinage).



Fig. III.5 : Pont de mesure de rapport du transformateur (testeur de rapport du transformateur)



Fig. III.6 : Spintermètres (testeur de rigidité diélectrique d'huile du transformateur)

III.4.2 Inspection et Contrôle électrique du transformateur avant

démontage :

T= 31.1°C (Température ambiante).

- Contrôle et mesure de la résistance d'isolement entre le bobinage primaire MT et la masse.
 $U = 5000V$ $T = 1Mn$ $G/masse = 10.67G\Omega$, $DAR = 1.28$
- Contrôle et mesure de la résistance d'isolement entre le bobinage secondaire BT et la masse.
 $U = 500V$ $T = 1Mn$ $G/masse = 12.80 G\Omega$, $DAR = 1.94$
- Contrôle et mesure de la résistance d'isolement du bobinage entre le primaire et le secondaire.
 $U = 5000V$ $T = 1Mn$ $G /masse = 22.89 G\Omega$, $DAR = 1.5$
- Contrôle et mesure de la résistance ohmique du bobinage primaire Côté MT pour chaque position du changeur de prise.

Position	01	02	03	04	05
Rohm (U1-V1) Ω	11.4 Ω	11.17 Ω	10.85 Ω	10.50 Ω	10.29 Ω
Rohm (U1-W1) Ω	22.8 Ω	22.3 Ω	22.62 Ω	21 Ω	20.40 Ω
Rohm(V1-W1) Ω	11.5 Ω	11.4 Ω	10.89 Ω	10.50 Ω	10.25 Ω

Tab. III.2 : Résultats de mesures de la résistance ohmique du bobinage du transformateur côté primaire MT

- Contrôle et mesure de la résistance ohmique du bobinage secondaire Côté BT.

Rohm(U2-V2) mΩ	21.9 mΩ	Rohm(U2-N) mΩ	11.2 mΩ
Rohm (U2-W2)mΩ	21.9 mΩ	Rohm (U2-N) mΩ	11.2 mΩ
Rohm (V2-W2)mΩ	21.9 mΩ	Rohm (V2-N) mΩ	11.2 mΩ

Tab. III.3 : Résultats de mesures de la résistance ohmique du bobinage du Transformateur côté secondaire BT

- Contrôle de l'indice horaire du transfo et son rapport de transformation.
- Test de claquage d'huile du transformateur.

III.4.3 Démontage du transformateur et diagnostic.

Après les essais de réception précédents, on procède à un décuage et à l'examen visuel de la partie active (enroulements HT et BT), du transformateur. Cette opération doit être effectuée comme suit :

- Vidanger une partie de l'huile de la cuve de façon à baisser son niveau, par l'ouverture de la vanne de purge placée en base du transformateur
- Déboulonner le couvercle de la cuve.
- Décuage et levage de la partie active du transformateur.



Fig. III.7 : Décuage et levage de la partie active du transformateur

- Dépose de la partie active du transformateur MT/BT.



Fig. III.8 : Dépose de la partie active de transformateur MT/BT

- Repérage des fils de connexion pour déconnection les câbles du bobinage.



Fig. III.9 : Repérage des fils de connexion pour déconnection les câbles du bobinage.

Séparation et enlèvement de la partie supérieure du transformateur.



Fig. III.10 : Séparation et enlèvement de la partie supérieure du transformateur.

- Après la déconnexion des fils d'alimentation et les câbles de changeur de prise le défaut a été localisé au niveau du bobinage MT de la colonne pour la phase A.



Fig. III.11 : désassemblage du circuit magnétique

- Démontage du bobinage défectueux de la colonne pour la phase A.



Fig. III.12 : Ces photos montrent le démontage du bobinage défectueux de la colonne du Circuit magnétique pour la phase A.

- Localisation de la trace carbonique d'amorçage électrique sur le bobinage MT.

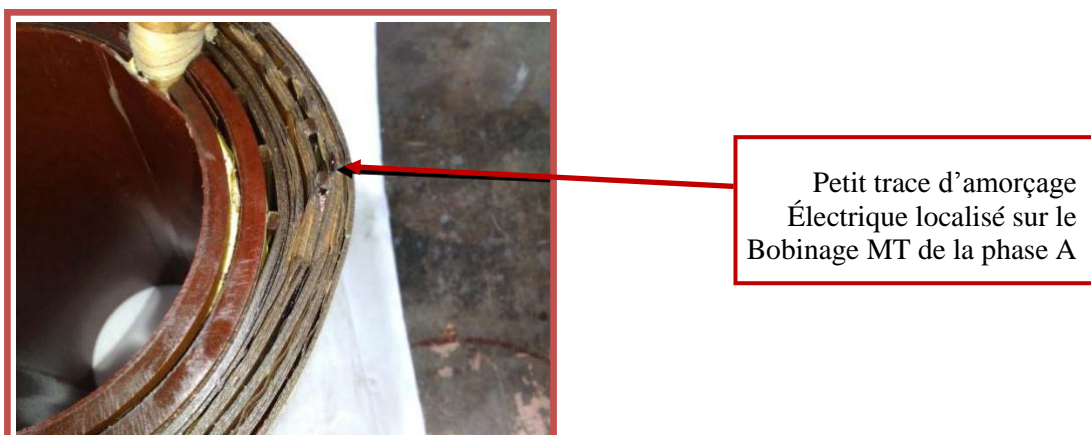


Fig. III.13 : Ce photos indique un Petit trace d'amorçage électrique localisé sur la bobine MT de la phase A.

- Débobinage de la bobine défectueux de la colonne de la phase A, et calcule le nombre de spires lors de cette étape.

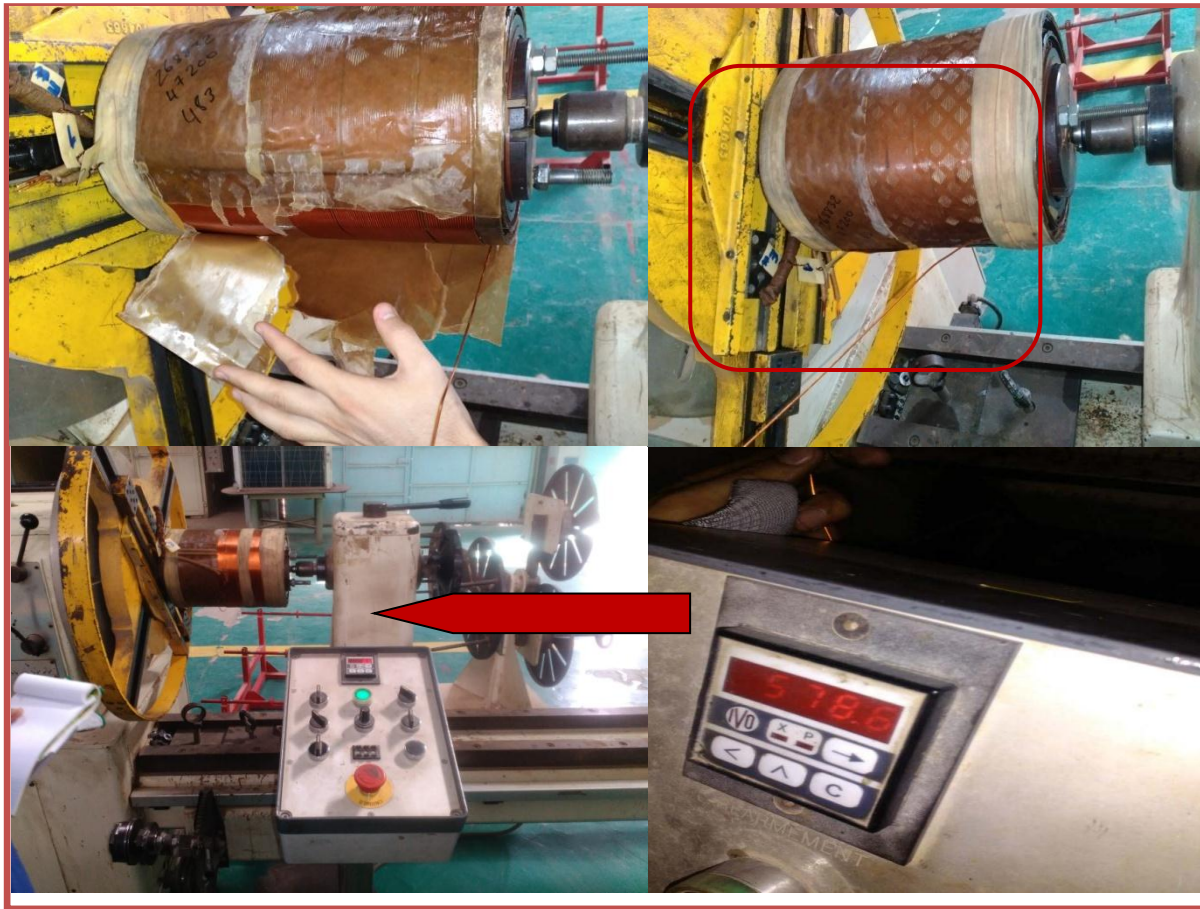


Fig. III.14 : Ces photos indiquent les étapes de débobinage à partir une machine bobineuse et durant cette opération on calcule le nombre de spires a travers un compteur qui sont indiqués sur les photos précédentes.



Figure III.15 : Ces photos montrent le défaut réel indiqué sur le bobinage HT.

III.4.4 Schéma et nombre de spires du bobinage du transformateur pour chaque prise.

Type de bobinage : Concentrique

Diamètre du fil du bobinage côté MT : $\varnothing = 1.35\text{mm}$

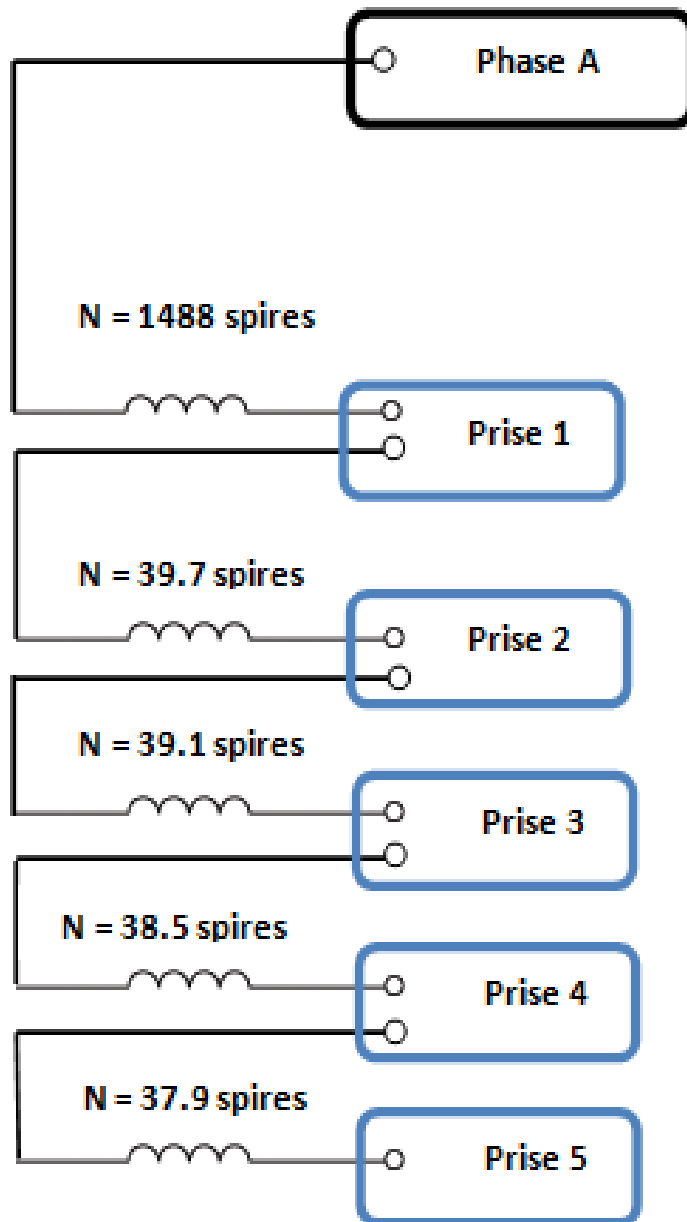


Fig. III.16 : Schéma du bobinage de transformateur indique le nombre de spires de la Colonne pour la **phase A** de chaque prise coté MT.

III.4.5 Rebobinage de la bobine du transformateur côté MT pour la colonne de la phase A

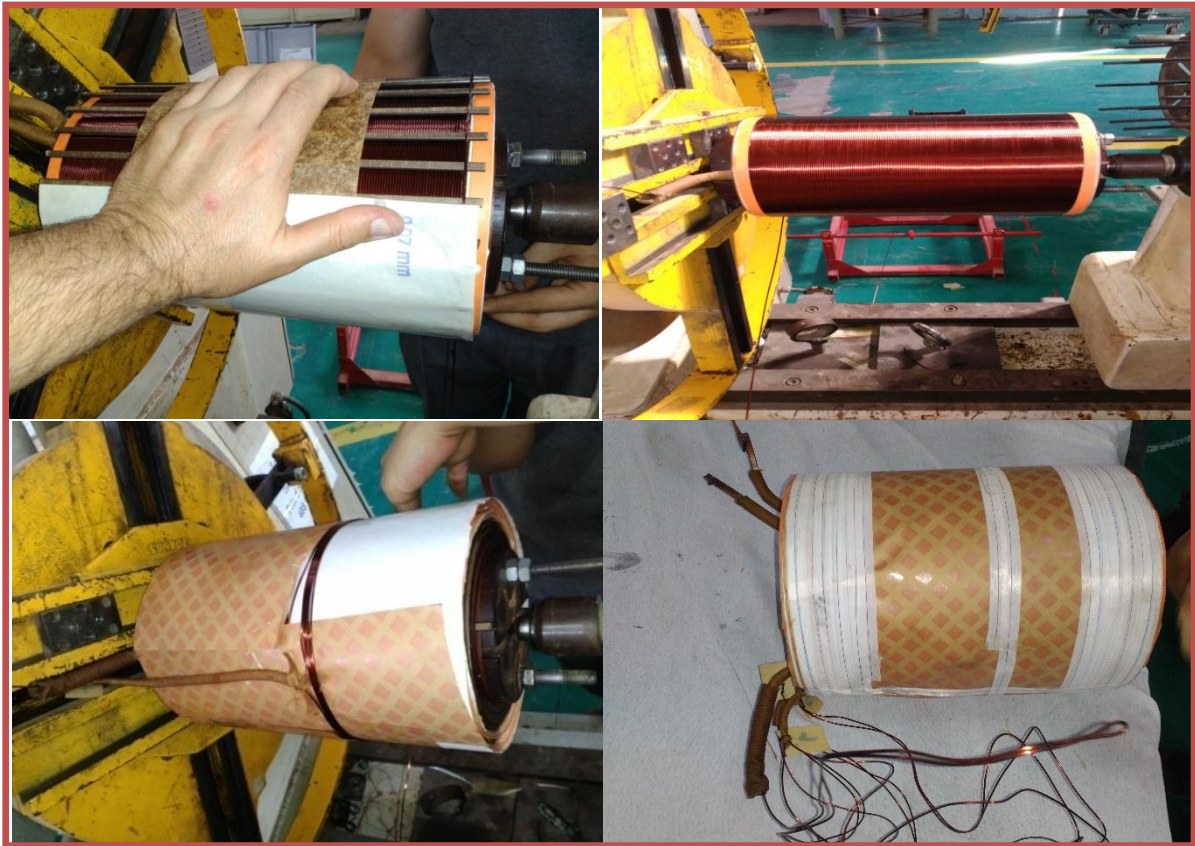


Fig. III.17 : Ces photos indiquent les étapes de rebobinage de la colonne pour la phase A.

III.4.6 Remontage du transformateur :

- Remontage de la bobine sur la colonne de la phase A , et assemblage du circuit magnétique du transformateur.



Fig. III.18 : Assemblage du circuit magnétique du transformateur

- Remontage de la partie supérieur du transformateur (partie active) et branchement des Fils de connexions.



Fig. III.19 : Connexion des câbles d'alimentation et les fils du changeur de prise.

- Test de claquage de l'huile isolante du transformateur neuf :

Essai	1	2	3	4	5	6
Tension de claquage (KV)	51.2	42.8	53.2	40.7	53	44

Tab. III.4 : résultat de test de claquage de l'huile de transformateur

La valeur moyenne de la tension de claquage: $U_{moy} = 47.5 \text{ KV}$

Commentaire : Essai est concluant

- Remplissage de la cuve du transformateur par l'huile neuf.
- Séchage de la partie active du transformateur.
- Remontage du transformateur.
- Essai électriques après remontage du transformateur.

III.4.7 Essai électriques après le rebobinage et remontage du transformateur :

T= 18.5°C (Température ambiante).

➤ Mesure de la résistance ohmique de bobinage :

1- Côté Primaire(MT) :

Position	01	02	03	04	05
Rohm (U1-V1) Ω	7.3 Ω	7.0 Ω	6.9 Ω	6.7 Ω	6.5 Ω
Rohm (U1-W1) Ω	7.2 Ω	7.0 Ω	6.9 Ω	6.7 Ω	6.5 Ω
Rohm(V1-W1) Ω	7.3 Ω	7.1 Ω	6.9 Ω	6.7 Ω	6.5 Ω

Tab. III.5 : Résultats de mesures de la résistance ohmique du bobinage du transformateur côté primaire MT

2- Côté secondaire (BT) :

Rohm(U2-V2) mΩ	20.9 m Ω	Rohm(U2-N) mΩ	10.6 m Ω
Rohm (U2-W2)mΩ	21.0 m Ω	Rohm (U2-N) m Ω	10.7 m Ω
Rohm (V2-W2)mΩ	20.9 m Ω	Rohm (V2-N) m Ω	10.6 m Ω

Tab. III.6 : Résultats de mesures de la résistance ohmique du bobinage du Transformateur côté secondaire BT

Mesure de la résistance d'isolement du bobinage

T_{amb} = 18.5°C (Température ambiante).

- ✓ Contrôle et mesure de la résistance d'isolement entre le bobinage primaire MT et la masse.

$$U_i = 5000V \quad T = 1mn \quad G/masse = 26.31G\Omega \quad , \quad DAR = 1.23$$

- ✓ Contrôle et mesure de la résistance d'isolement entre le bobinage secondaire BT et la masse.

$$U_i = 500V \quad T = 1mn \quad G/masse = 12.16 G\Omega \quad , \quad DAR = 1.26$$

- ✓ Contrôle et mesure de la résistance d'isolement du bobinage entre le primaire et le secondaire.

$$U = 5000V / T = 1mn / G / masse = 21.89 G\Omega \quad , \quad DAR = 1.16$$

➤ **Indice horaire**

$$A-B/a-b = 11(-29.3^\circ) \quad / \quad B-C / b-c = 11(-30.4^\circ) \quad / \quad C-A/c-a = 11(-30.8^\circ)$$

Rapport de Transformation

	A - B / a n	B - C / bn	C - A / c n	
N1/N2	25,609	24,417	24,901	<i>position 01</i>
U1/U2	14,437	14,095	14,375	
N1/N2	24,417	24,417	24,34	<i>position 02</i>
U1/U2	14,095	14,095	14,051	
N1/N2	23,825	23,854	23,765	<i>position 03</i>
U1/U2	13,754	13,754	13,719	
N1/N2	23,598	23,235	23,174	<i>position 04</i>
U1/U2	13,623	13,413	13,378	
N1/N2	22,628	22,628	22,568	<i>position 05</i>
U1/U2	13,063	13,063	13,028	

Tab. III.7 : Rapport de Transformation

ESSAI A VIDE :

Essai à vide 1 :

MT 10% de Un

BT 10% de Un

<i>Position 1 = 579.0V</i>	→	<i>40.40 V</i>
<i>Position 1 = 588.0V</i>	→	<i>40.54V</i>
<i>Position 1 = 551.0V</i>	→	<i>40.55 V</i>
<i>Position 1 = 535.0V</i>	→	<i>40.46 V</i>
<i>Position 1 = 528.0V</i>	→	<i>40.52 V</i>

Essai à vide 2 :

BT 100% Un

MT 100% Un

400V → *présence de tension*

La présence de tension détectée par un dispositif de détection de tension (VAT).

Interprétation :

Dans ce fonctionnement le transformateur, consomme un courant très faible, le facteur de puissance atteindra une valeur minimale, il s'agit essentiellement d'un courant réactif ou magnétisant qui crée le flux magnétique.

III.5 Conclusion

Comme conclusion nous allons utiliser une méthode classique simple mais important dans le domaine industriel pour les ateliers électromécaniques elle contienne les étapes pratiques nécessaires pour faire ce rebobinage du transformateur de distribution MT/BT. Ensuite nous avons obtenu des valeurs de résultats sont adéquats et après la réparation nous avons fait les tests et l'essai à vide de ce transformateur rebobiné enfin tous les essais sont concluants.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail a consisté à étudier la technique de bobinage d'un transformateur triphasé de distribution MT/BT, nous avons commencé par la présentation des généralités des transformateurs et nous avons établi quelque type des enroulements.

Nous avons aussi effectué une étude technique classique pour rebobinage et réparation du transformateur. Dans cette étude, nous nous sommes attachés à réaliser un bobinage de transformateur de puissance grâce à des abaques plus fidèle des phénomènes entrant en jeu disponibles aux rebobinages des transformateurs à usage classique.

Ensuite, on a passé en revue la présentation du transformateur monophasé et triphasé en générale, que l'on a appliqué pour la conception de bobinage de notre transformateur.

Une partie importante du travail consiste à réalisé expérimentalement les procédures de rebobinage du transformateur les méthodes expérimentales. Malgré les résultats des tests et des essais à vide du transformateur après l'assemblage du transformateur sont concluants, cette technique de rebobinage nécessite une méthode numérique développé et approfondi à travers d'un logiciel ou une application.

REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Prof A. ELFARNANE Transformateur. Lycée techniques Alidrissi Agadir. Centre des classes BTS.17 SEPTEMBRE 2014.
- [2] TOTAL, Manuel de formation cours EXP-PR-EQ170 Révision 0.1, Exploration ET Production Les Equipements Les Transformateurs, Support de cours EXP-PR-EQ170-FR Dernière version : 31/05/2007
- [3]http://lycees.acrouen.fr/maupassant/Melec/co/2melec/co/Adaptation/webMob/co/3_3_transformateur.html
- [4] Amari mansour , cours electrotechnique , GE 2 , Année Universitaire 2011-2012
- [5] BEBOUKHA Abd Errazzak et GHILANI Moussa , Modelisation et simulation de la protection différentielle d'un transformateur de puissance , thèse de master academic en génie électrique , Université d'EL-Oued , 23-24 Juin 2014
- [6] Site maintenance des transformateurs TSV TRANSFORMATEURS SOLUTION VENISIEUX <http://www.tsv-transfo.com/fr/>
- [7] Jean SANCHEZ, Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance, these de doctorat en genie électrique, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 21 juin 2011
- [8] R.MERLET Technologies d'électricité générale et professionnelle (TOME III). Bobinage des machines électriques et des transformateurs statiques.n°2344 Anné 1980.
- [9] Guide de la distribution électrique basse tension et HTA – 2009 (Schneider Electric).