الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE.

Département de génie électrique.

Projet de Fin d'Etude

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Électrique

SPÉCIALITÉ: RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

THEME :

MODELISATION DES TRANSFORMATEURS TRIPHASES BASEE SUR LANALYSE DE LA REPONSE EN FREQUENCE EN HF ET SON DIAGNOSTIQUE

Proposé et dirigé par,

Dr. ABBADI Amel
Mlle. BOUKIRAT Samia

Préparé et présenté par,

BOUCHOU HAMZA

DJEDILI MOHAMED

Année Universitaire

2020/2021

Remerciements

En préambule à ce mémoire, nous remercions ALLAH qui nous a aidé et donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous remercions vivement notre enseignant Mme ABBADI Amel, Docteur à l'université Yahia Farés de Médéa qui a été présent et très actif tout au long de ce travail et co-promotrice BOUKIRAT Samia, n'hésitant pas à prendre sur son temps pour nous aider dès le début jusqu'à la rédaction du mémoire.

Ces remerciements vont aussi au corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences de l'Université de Médéa, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nos remerciements sont destinés aussi à nos familles, et tous nos amis pour leur aide et leur soutien.

Nous ne saurions finir sans exprimer nos vifs remerciements à l'endroit de toutes les
personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Dédicace

Au meilleur des pères
A ma très chère mère
Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté
A mes sœurs et mon frère

A mes Amis : Nacer Adel Amine Nasro Yacine Souhil Zaki Badis

A Mes Promotrices

DR: A. ABBADI ET S. BOUKIRAT

A mes collègues

A mon binôme DJEDILI MOHAMED

A tous ce qui me sont chère

HAMZA

Dédicace

Au meilleur des pères

A ma très chère mère

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté

A mes sœurs et mes frères

a tout la famille Djedili et Khaldaoui

A tous mes Amis de ma vie surtout: Zairi Soufian, Baha Mohamed et Fouad Djedili

Salutation spécial Khaldaoui Samar

A Mes Promotrices

DR: A.ABBADI ET S.BOUKIRAT

A mon collègue Bouchou Hamza

A tous ce qui me sont chère

Mohamed

ملخص

يصف هذا العمل منهجية لتحليل وتحديد معلمات نموذج أساسي لملف محول ثلاثي الطور بترددات عالية، وتستند هذه المنهجية على محاكاة استجابة التردد لملفات المحولات في نطاق من ترددات 0-200000 هرتز.

أنسب نموذج لدراستنا هو النموذج المكافئ في π من المحولات عالية التردد على أساس الحث المتبادل الخاص به، لبساطته من ناحية ومن ناحية أخرى لأنه يناسب تمامًا الدراسة عند الترددات العالية، المستخدمة من أجل دراسة حالات الفشل المختلفة لملفات هذا المحول.

الكلمات المفتاحية:

محولات الطاقة، التشخيص، الأعطال، التشكيل، الخبرة.

Résumé :

Ce travail décrit une méthodologie d'analyse et d'identification des paramètres d'un modèle de base de l'enroulement d'un transformateur triphasé en hautes fréquences, cette méthodologie est basée sur une simulation de la réponse en fréquence des enroulements du transformateur dans une gamme de fréquences 0-200000 Hz.

Le modèle le plus approprié pour notre étude est le modèle équivalent en π du transformateur en HF à base d'inductance propre et mutuelle, pour sa simplicité d'une part et d'autre part pour il contient parfaitement à une étude en haute fréquences, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur.

Mots clés :

transformateurs de Puissance, Diagnostic, Défauts, Formalisation, Expertise.

Abstract:

This work describes a methodology for the analysis and identification of the parameters of a basic model of the winding of a three-phase transformer at high frequencies, this methodology is based on a simulation of the frequency response of the transformer windings in a frequency range 0-200000 Hz.

The most appropriate model for our study is the equivalent model in π of the HF transformer based on its own and mutual inductance, for its simplicity on the one hand and on the other hand for it perfectly fits a study at high frequencies, used for the study of the various failures of the windings of this transformer.

Key Word:

Power transformers, Diagnosis, Faults, Formalization, Expertise.

Table des matières

Introduction générale …….. I

- Chapitre I notion de base du transformateur triphasé …….0

I.1. Introduction……1

I.2. Définition du transformateur……..1

I.3. Symboles électriques du transformateur……1

I.4. Transformateur triphasé…….…….2

I.4.1. Grandeurs caractéristiques d'un transformateur triphasé……...…….2

I.5. Constitution d'un transformateur……...……3

I.5.1. Partie active :…… …….…….3

I.5.1.1. Le noyau (circuit magnétique)…… ……3

I.5.1.2. Bobinage (Les enroulements)……..…….5

I.5.2. La partie constructive……..6

I.5.3. Isolation……...…….7

I.6. Le principe de fonctionnement……..…….7

I.7. La construction du transformateur……..…….8

I.7.1. Transformateurs immergés……..8

I.7.2. Les transformateurs secs……...……9

I.8. Les couplages…….9

I.8.1. Mode de couplage……...…….…...….9

I.8.2. Choix du couplage……11

I.9. Les différents types de transformateur…….12

I.10. Exemples d'utilisation……...…….12

I.11. Différents types de fonctionnement……13

I.11.1. Fonctionnement à vide en régime équilibré……13

I.11.2. Fonctionnement en charge……..…….14

I.11.3. Fonctionnement en régime déséquilibré…….…….14

I.12. Défauts fréquents dans les transformateurs……..…..14

Table des matières

I.12.1. Défaut d'isolement de la partie active……..……14

I.12.2. Amorçage diélectrique entre spires…….15

I.12.3. Court-circuit entre spires ……16

I.12.4. Décharges Partielles……16

I.12.5. Coupure du circuit électrique ……...……..17

I.12.6. Un mauvais alignement d'un régleur……..17

I.12.7. Déformation géométrique des enroulements …….……18

I.13. Techniques de diagnostic défauts dans les transformateurs…….……..18

I.13.1. Analyse d'huile……19

I.13.2. Mesures diélectriques ……...……..19

I.13.3. Analyse des furanes…….19

I.13.4. Mesures électriques…….……20

I.13.4.1. Mesure du courant d'excitation……...…….20

I.13.4.2. Mesure de rapport de transformation…….……..20

I.13.4.3. Mesure de la résistance d'enroulements……..…….20

I.13.4.4. Mesure de la réactance de fuite……...…….20

- Chapitre II Modèles du transformateur pour une analyse…….. …… fréquentielle…….…….…….21

II.1. Introduction…….22

II.2. L'analyse de la réponse en fréquence (FRA)…….…….22

II.2.1. Définition……...……..22

II.2.2. Principe de la méthode…..……22

II.2.3. Objectifs des mesures par FRA……..……..23

II.2.4. Quand faut-il faire un test FRA ?.....23

II.2.5. Type d'essais par FRA……...……..24

II.2.6. L'équipement de mesure……..26

II.2.7. Procédure d'essai…….……28

II.2.8. Méthodes d'interprétation……..……..32

II.3. Modélisation de transformateur de puissance triphasé…….……..33

Table des matières

II.3.1. modélisation en haute fréquence……..……33

II.3.2. Les modèles usuels des transformateurs……..……33

II.3.2.6 Le modèle équivalent en π du transformateur en HF…….39

- *Chapitre III Modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF* ……41

III.1. Introduction……41

III.2. But principal……..41

III.3. Simulation……..……41

III.3.1. Logiciel utilisé……41

III.3.1.1. Définition ……41

III.3.1.2. Ecran de base……...……42

III.3.1.3. Simulink……...……42

III.3.1.4 Version utilisée…….43

III.4 Description du modèle approuvé……...……43

III.4.1 Modèle simplifié en π du transformateur en HF…….....43

III.4.2 Méthodologie de calcul des paramètres……..……44

III.4.3 Calcul des impédances Zph1, Zph2 et Zph3 par simulation…….……..46

III.4.4 Paramètres de simulation……47

III.4.5 Simulation de l'impédance Zph1……..…..48

III.4.6 Simulation de l'impédance Zph2……...…..…48

III.4.7 Simulation de l'impédance Zph3……...……..48

III.4.8 Interprétation des résultats……..……52

III.5 Classification et localisation des défauts résistifs dans les phases de transformateur……..…..52

III.5.1 Classification des défauts……...……..52

III.5.2 Localisation des défauts……...……...52

III.5.3 Défaut résistif……...……53

III.5.4 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut résistif……...……..53

III.5.5 Résultats et discussions……..……..56

III.6 Conclusion……..……57

Table des matières

Conclusion générale…….. III

Référence bibliographie ……...…… IV

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures :

Chapitre I

Figure I. 1 : Symboles du transformateur triphasé……1

Figure I. 2 : Circuit magnétique à 3 colonnes, transformateur triphasé à flux Liés……2

Figure I. 3 : Circuit magnétique à 3 colonnes, transformateur triphasé à flux indépendants……3

Figure I. 4 : Partie active d'un transformateur triphasé……4

Figure I. 5 : Transformateur cuirassé……4

Figure I. 6 : Transformateur à colonnes……5

Figure I. 7 : bobines primaire et secondaire d'un transformateur……6

Figure I.8 : Schéma de principe d'un transformateur……8

Figure I. 9 : Transformateurs immergés……9

Figure I. 10 : Transformateur sec……9

Figure I. 11 : couplage étoile……10

Figure I. 12 :couplage étoile avec neutre……10

Figure I. 13 : couplage triangle……10

Figure I. 14: couplage zig-zag……11

Figure I. 15 : le transformateur triphasé……13

Figure I. 16: Amorçage entre enroulements……15

Figure I. 17: Amorçage entre spires, sans court-circuit……15

Figure I. 18: Court-circuit entre spires……16

Figure I. 19: Décharges partielles sur des cales……17

Figure I. 20: Coupure suite à la fusion d'un Conducteur……17

Figure I. 21:Déformation mécanique d'un enroulement……18

Chapitre II

Figure II. 1 : Modèle d'un enroulement de transformateur……23

Figure II. 2 : Essai entre extrémités……24

Liste des figures et des tableaux

Figure II. 3 :Essai en court-circuit……25

Figure II. 4 : Essai capacitif entre enroulements……25

Figure II. 5 : Essai inductif entre enroulements……26

Figure II. 6 : Vue de la face avant du FR Analyzer……27

Figure II. 7 : Vue de la face arrière du FR Analyzer……27

Figure II. 8 : Bon raccordement à la terre……28

Figure II. 9 : Mauvais raccordement à la terre……28

Figure II. 10 :Connexion des câbles coaxiaux……29

Figure II. 11 :Raccordement à la terre du FR Analyzer……29

Figure II. 12 : Raccordement de la pince pour borne de traversée aux câbles…….

coaxiaux jaunets rouge……31

Figure II. 13: Serrage de la pince à visser……31

Figure II. 14: Raccordement de la pince pour borne de traversée au câble coaxial bleu……32

Figure II. 15 : La modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL……34

Figure II.16 : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP……35

Figure II.17 : Schéma équivalent d'un enroulement……36

Figure II. 18: Modélisation du transformateur par une ligne……37

Figure II.19: Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section longueur **Δ**X……37

Figure II.20: modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié……38

Figure II.21 : Structure de modèle d'un quadripôle……39

Figure II.22 : Circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases……40

Chapitre III

Figure III.1 : interface graphique 3D sous Matlab……42

Figure III.2 : la fenêtre Simulink ……43

Figure III.3 : Modèle en π simplifié d'un transformateur triphasé……44

Figure III.4 : Le circuit équivalent de chaque phase……44

Liste des figures et des tableaux

Figure III.5 : Modèle de noyau de transformateur représenté par trois impédances ……
ZU, ZV et ZWcontenant les caractéristiques de chaque phase……47

Figure III.6: Module d'impédance Zph1 en fonction de la fréquence……..48

Figure III.7: Module d'impédance Zph2 en fonction de la fréquence……..48

Figure III.8: Module d'impédance Zph3 en fonction de la fréquence……..49

Figure III.9 : Module d'impédance Zsiml1 en fonction de la fréquence……50

Figure III.10 : Module d'impédance Zsiml2 en fonction de la fréquence……50

Figure III.11: Module d'impédance Zsiml3 en fonction de la fréquence……50

Figure III.12 : La courbe de la réponse Zsiml1 simulée et la réponse Zestm1……
estimée en fonction de la fréquence……51

Figure III.13: La courbe de la réponse Zsiml2 simulée et la réponse Zestm2 estimée……
en fonction de la fréquence……51

Figure III.14 : La courbe de la réponse Zsiml3 simulée et la réponse Zestm3……
estimée en fonction de la fréquence……52

Figure III.15 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un……
défaut résistif dans la phase 1 et d'un enroulement sain……54

Figure III.16 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un……
défaut résistif dans la phase 2 et d'un enroulement sain ……55

Figure III.17 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un……
défaut résistif dans la phase 3 et d'un enroulement sain ……56

Liste des figures et des tableaux

Liste des tableaux :

Tableau. II-1 : Domaines typiques d'interprétation de FRA……33

Tableau III.1 : Paramètres de simulation……47

Tableau III.2 : Degré des défauts résistifs par une augmentation……
d'une résistance dans de 1.5 Rsain……56

Tableau III.3: Degré des défauts résistifs par une augmentation……...
d'une résistance dans de 1.7 Rsain . d'une résistance dans de 1.7 Rsain……57

Tableau III.4 : Degré des défauts résistifs par une augmentation……..
d'une résistance dans de 2 Rsain……57

Glossaire des termes techniques

BT : Basse tension.

HT : Haute tension.

FRA : Technique d'analyse de la réponse en fréquence.

EMTP: Programme des transitoires électromagnétiques (Electromagnetic Transients program).

RESEL : Ingénieurs d'Etude et de Recherche de l'Electricité (Engineers of Study and Researchof the Electricity).

mg : milligramme**.**

kg : kilogramme .

kV: kilovolt.

Ω :ohm

F : Farad

H : Henry

BF : Basse fréquence.

MF : moyenne fréquence

HF :haute fréquence.

BP : Bande passante.

Zs : Impédance sain [Ω].

Zd : Impédance de défaut [Ω].

Ph : Phase.

Z winding : Impédance de l'enroulement [Ω].

Cg : capacité shunt [F]

C e-c : capacité entre enroulement et cuve[F]

C e-e : capacité entre enroulements. [F]

Rcor: Résistance corrigé[Ω]

Rm : Résistance mesurée[Ω]

θF : 235 pour le cuivre et 225 pour aluminium

θref : Température de référence

θm : Température des enroulements

Zm : Impédance mesurer

RT: Résistance en fonction de la température [Ω]

R0: Résistance sain [Ω]

α: Facteur de dilatation thermique [K -1]

Glossaire des termes techniques

ΔT: Variation de la température [°C]

L : Inductance de magnétisation (H).

N : Nombre de spire.

ℜ : Reluctance**.**

μ : perméabilité magnétique (H/m).

S : Section de conducteur (cm2).

l : La longueur (m).

C : capacité d'isolation (F).

ε0 : permittivité du vide (F/m).

εr: permittivité relative (F/m).

S : Section d'isolement (m2).

d : La distance (m).

R : résistance d'isolement du diélectrique.

ω : La pulsation (rd/s).

tanδ: Facteur de perte diélectrique.

Hz: Hertz

RL: Resistance-Inductance

Introduction générale

Introduction générale

Les transformateurs de puissance constituent le cœur de la production, transport, distribution d'électricité, ainsi que dans beaucoup d'autres secteurs fonctionnant avec l'énergie électrique.

Cela signifie que le domaine d'utilisation des transformateurs est très large , y compris l'étude des transformateurs, nous aide également à comprendre le fonctionnement de nombreuses machines, telles que les moteurs à induction, les alternateurs, les compensateurs synchrones, etc…., car ces machines utilisent également le principe de l'induction électromagnétique.

Le diagnostic est l'endroit où les changements anormaux dans le comportement ou les conditions du système et leurs causes sont détectés. Le système de diagnostic peut être mis en œuvre pendant le fonctionnement (en ligne) ou pendant la phase d'arrêt du fonctionnement normal. En fonctionnement, il s'agit d'assurer la sécurité et la continuité des services, et d'enregistrer les événements utiles au maintien thérapeutique ou au retour d'expérience. Pendant les temps d'arrêt (hors ligne), le but est d'évaluer le vieillissement de certains composants, de déterminer des opérations de maintenance préventive ou traitement.

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) s'est avérée être un outil utile pour détecter de manière fiable la défaillance mécanique initiale d'un transformateur. Il existe de nombreuses façons d'évaluer le spectre de fréquences pour confirmer l'existence de défauts précoces. Par conséquent, la technologie FRA à le potentiel de détecter les problèmes d'enroulement. C'est la technologie la plus efficace actuellement disponible, en raison de sa haute sensibilité à la détection de défaut, il n'est pas nécessaire d'ouvrir le transformateur. La méthode est basée sur le concept selon lequel la déformation et le déplacement provoqués par le changement d'impédance de l'enroulement du transformateur provoquent le changement géométrique de l'enroulement, ce qui entraîne le changement de sa réponse en fréquence. L'impédance du transformateur de puissance est composée d'une configuration complexe de résistances, d'inductances et de condensateurs (circuits RLC) .

Le circuit équivalent est Il est utile pour simuler la sensibilité de FRA aux changements d'enroulement. Interprétation FRA basée sur la modélisation du circuit de transformateur Conçu pour représenter avec précision le comportement du transformateur sur toute la plage la fréquence.

La modélisation du transformateur basée sur la variété de types des modèles, utilisent des paramètres de réseau équivalent (RLC) et se concentrent sur la gamme de fréquence d'intérêt.

Introduction générale

Pour cerner cet objectif notre mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre on a fait une présentation générale sur les transformateurs de puissance ainsi que les défauts fréquents dans les transformateurs et les techniques de diagnostic des défauts dans les transformateurs.

Pour le deuxième chapitre on a présenté les principaux modèles de transformateurs existant dans la littérature qui semble plus adéquat à la problématique posée et également une présentation sommaire sur la technique de l'analyse fréquentielle (FRA).

Le troisième chapitre contient la modélisation et la simulation d'un transformateur triphasé en haute fréquence et l'injection des défauts résistifs.

En fin nous avons terminé avec une conclusion générale.

➢ *Chapitre I*

Notions de base du transformateur triphasé.

CHAPITRE I : Notions de base du transformateur triphasé.

I.1. Introduction

Les transformateurs de puissance sont des constituants essentiels de tous les réseaux de transport et de distribution d'électricité. L'apparition d'un défaut dans le système provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des champs parasites dans celui-ci. Ces champs parasites produisent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur. La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à de fortes sollicitations mécaniques. Un transformateur peut aussi être soumis à des contraintes pendant son transport et son installation ainsi que par suite des variations cycliques de la température ambiante. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux magnétiques.

Dans ce chapitre, nous avons inclus les composants de base du transformateur et mentionné les techniques de diagnostic par l'analyse d'huile, mesure diélectrique et mesure électrique.

I.2. Définition du transformateur

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation[2]. Dans un transformateur, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits. [3]

I.3. Symboles électriques du transformateur

Le transformateur peut être représenté par l'un des symboles reportés sur les figures **I.1**

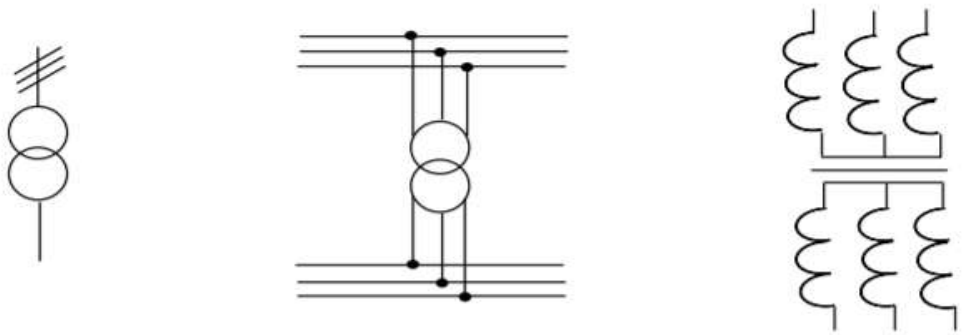


Figure I. 1 : Symboles du transformateur triphasé.

I.4. Transformateur triphasé

En triphasé, on peut utiliser soit trois transformateurs monophasés identiques dont on groupe les primaires et les secondaires en étoile ou en triangle. Il est possible de disposer les enroulements sur le même circuit magnétique. Dans les deux cas, le rapport de transformation dépend des couplages utilisés et, en outre, un déphasage peut apparaître entre les tensions primaires et secondaires. Afin de simplifier la réalisation du circuit magnétique et de diminuer le volume occupé par le transformateur ainsi que la masse de fer utilisée, on réalise souvent des transformateurs triphasés à noyaux coplanaires possédant 3 colonnes. On dit qu'un tel transformateur est à flux liés .Pour réduire le couplage magnétique entre les trois colonnes, c'est-à-dire rendre indépendants les flux des trois transformateurs monophasés élémentaires, on peut ajouter des colonnes latérales.

I.4.1.Grandeurs caractéristiques d'un transformateur triphasé

La plaque signalétique d'un transformateur triphasé porte, comme en monophasé, les valeurs nominales :

- de la puissance apparente utile s_{2n} ;
- des tensions primaires et secondaires composées, c'est à dire entre fils de ligne ; si le mode de connexion des enroulements n'est pas fixé on indiquera les valeurs nominales des tensions correspondantes.



Figure I. 2 : Circuit magnétique à 3 colonnes, transformateur triphasé à flux Liés.



Figure I. 3 :Circuit magnétique à 3 colonnes, transformateur triphasé à flux indépendants.

I.5. Constitution d'un transformateur

Le transformateur est une machine statique 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 éclectique.
- **Partie constructive :** destinée à assurer l'isolement et la fixation de la partie active.

I.5.1.Partie active :

I.5.1.1.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 essentiel est de canaliser le flux et de présenter le minimum de pertes hystérésis et courant de Foucault [4].

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

- Transformateur à colonnes ;
- Transformateur cuirassé ;



Figure I. 4 :Partie active d'un transformateur triphasé.

- **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, ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobines.

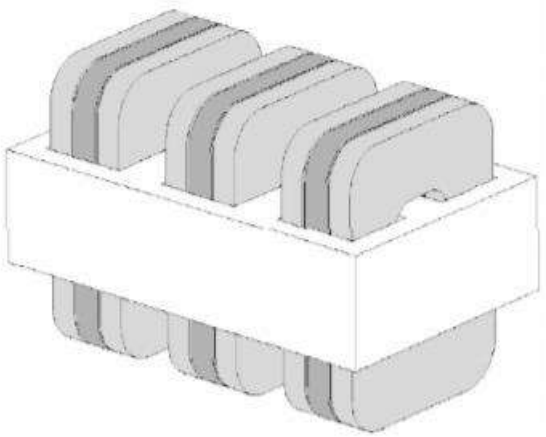


Figure I. 5 :Transformateur cuirassé.

- **Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé**

Le transformateur cuirassé possède un circuit magnétique plus court, ce qui permet d'avoir un courant à vide relatif plus faible et ses enroulements sont plus simples car le nombre de spires est moins grand vu que la section du noyau dans un transformateur cuirassé peut être plus grande que dans le transformateur à colonne. Mais il présente aussi certains inconvénients :

- ses enroulements sont moins accessibles à l'agent refroidissant ;

- l'examen et la réparation sont plus difficiles et demande davantage de matériaux isolants pour la haute tension ;

• Ce type de transformateur coûte cher.

- **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 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.

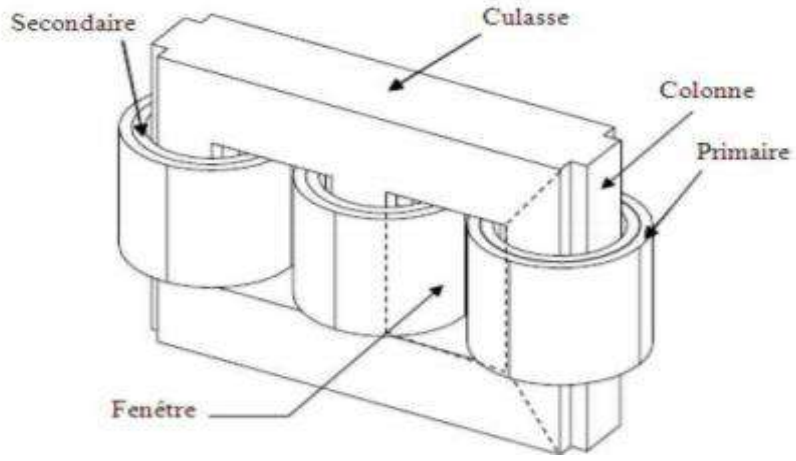


Figure I. 6 :Transformateur à colonnes.

I.5.1.2.Bobinage (Les enroulements)

Le transformateur est constitué d'un primaire et d'un secondaire constitué chacun de trois enroulements identiques. Ces enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes de l'induction électromagnétique, le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire.

Les enroulements sont réalisés soit en cuivre soit en aluminium. Les bobinages sont effectués avec du fil rectangulaire isolé en papier en multicouches, en disque ou hélicoïdal. Il

y en a deux par colonne, l'un forme l'enroulement primaire et l'autre le secondaire tous deux électriquement distincts. On désigne par les grandes lettres (A. B. C) les bornes d'enroulement haute tension et par les petites lettre (a. b. c) les bornes de la basse tension. Les enroulements prennent différentes dispositions : En couche concentriques, et bi concentriques et à galettes. Les bobinages concentriques : Les enroulements sont constitués de deux bobines cylindriques. Les bobinages en galettes : Les enroulements sont constitués de galettes superposées et alternées appartenant successivement au primaire et au secondaire, et séparées les unes des autres par une rondelle isolante.

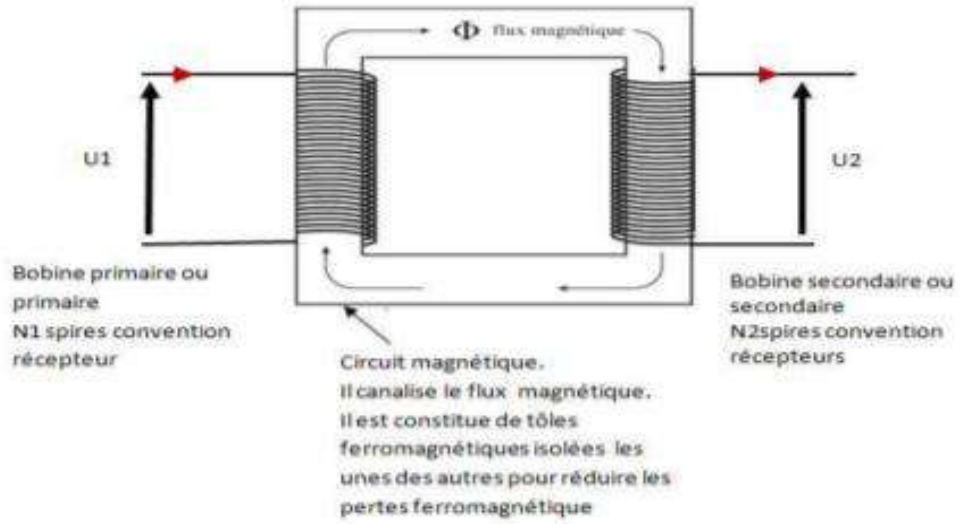


Figure I. 7 :bobines primaire et secondaire d'un transformateur.

- **Représentation des enroulements**

- Enroulement primaire :Le courant circulant dans l'enroulement primaire est faible d'intensité mais la tension très élevée à laquelle il est soumis impose une section de conducteurs plus faible et l'enroulement qui comporte le nombre de spires le plus élevé est l'enroulement haut tension.
- Enroulement secondaire : Le courant circulant dans cet enroulement est d'intensité très grande. Pour la réalisation de cette caractéristique, on impose un nombre de spires limité, et une section des conducteurs relativement importante.

I.5.2.La partie constructive

Les pièces constructives du transformateur sont :

• **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. [5]

• **Le couvercle** : Il sert à couvrir la cuve et aussi de support aux accessoires, tels que : les isolateurs, le conservateur d'huile, etc……. . [5]

• **Le conservateur d'huile** : permet le remplissage de la cuve et réduit la surface de l'huile en contact avec l'aire extérieure humide.

• **Les isolateurs (MT)** :sont au nombre de trois et ont pour rôle d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire(HT) et les lignes d'arrivées.

• **Les traversées (BT)** : sont au nombre de quatre et sont formés de deux parties placées de part et d'autre du couvercle reliées par une tige entre les extrémités du secondaire (BT) et les lignes de départ.

I.5.3.Isolation

L'isolation des transformateurs de puissance est constituée d'huile et d'isolants cellulosiques (papiers). Ces matériaux ont des propriétés qui se complètent, pour permettre de réaliser l'isolement entre spires, entre bobinages, ou entre bobinages et masse, et de conférer à l'ensemble une cohésion suffisante, pour supporter les efforts mécaniques, tout en assurant l'évacuation des pertes dissipées dans les enroulements (cuivre). L'isolation diélectrique qu'elle soit solide ou liquide doit permettre au transformateur de résister à la fois à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans décharge électrique. Pour ce faire, elle doit homogénéiser le champ électrique dans le transformateur.

I.6. Le principe de fonctionnement. [6]

En vertu la loi de Faraday, lorsque un flux d'induction magnétique variable φ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement (dφ/dt) et au nombre de spire due comporte cet enroulement. Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spire du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spire de secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire.

Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique tel que montré par la figure suivante.

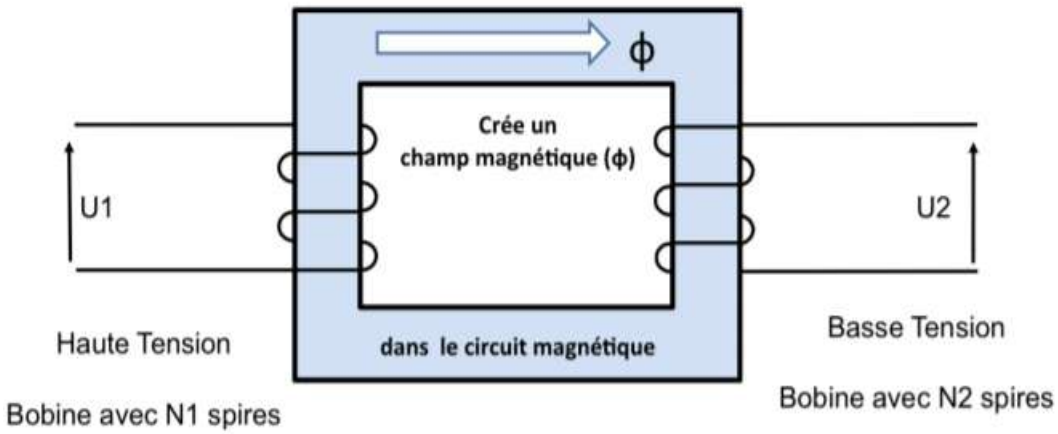


Figure I.8 :Schéma de principe d'un transformateur.

I.7. La construction du transformateur

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

I.7.1.Transformateurs immergés

Le circuit magnétique et les enroulements sont immergés dans un diélectrique liquide qui assure isolation et 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 posent 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) . [7]



Figure I. 9 : Transformateurs immergés.

I.7.2.Les 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.. [7]



Figure I. 10 :Transformateur sec.

I.8. Les couplages

I.8.1.Mode de couplage. [8]. [9]. [10]

Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile (Y) soit en triangle (D). Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile (Y), triangle (d) et zigzag (z).

➲ **Couplage étoile :**

Il permet la sortie du point neutre, très utile en BT. Deux tensions sont disponibles : tension simple et tension composée. Il peut être avec au sans neutre

– **Sans neutre :**

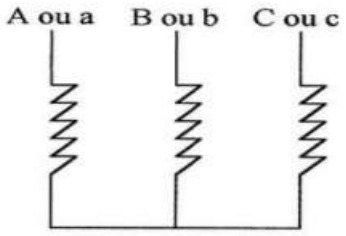


Figure I. 11 :couplage étoile.

– **Avec neutre** :

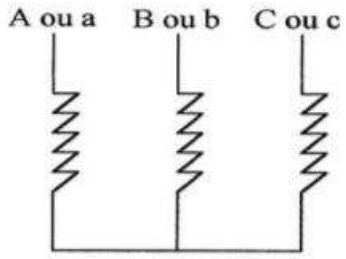


Figure I. 12 :couplage étoile avec neutre.

➲ **Couplage triangle :**

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

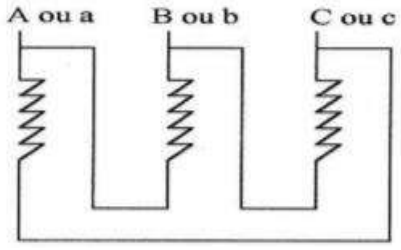


Figure I. 13 : couplage triangle.

➲ **Couplage zig-zag :**

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

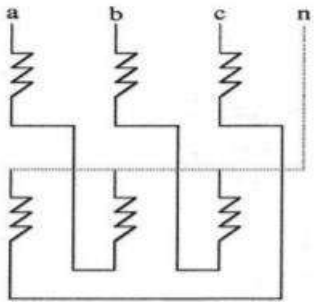


Figure I. 14: couplage zig-zag.

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

1) Y-y : étoile-étoile
2) Y-d : étoile-triangle
3) Y-z : étoile-zigzag
4) D-y : triangle-étoile
5) D-d: triangle-triangle
6) D-z: triangle-zigzag.

I.8.2.Choix du couplage :

On a intérêt à choisir:

- Un couplage étoile: aux très hautes tensions. Chaque enroulement supporte une tension :

$$V = U/\sqrt{3} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Un couplage triangle : aux forts courants. L'intensité par enroulement est :

$$J = I/\sqrt{3} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Si on souhaite disposer de deux tensions :

- ✓ Une tension basse pour l'éclairage et une tension élevée pour le chauffage d'un moteur, on adopte un couplage étoile au secondaire : cas du transformateur 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 les transformateurs de distribution, utilisés comme élévateur de tension, à la sortie des centrales de distribution.
- Couplage étoile-zig-zag Yz : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution pour compenser le déséquilibre.

I.9. Les différents types de transformateur : [10]

Le domaine d'utilisation des transformateurs est très vaste. Selon le domaine d'utilisation, les appareils présenteront certaines différences dans les caractéristiques de construction. Le principe de fonctionnement des différents types de transformateurs est le même.

Il existe plusieurs types de transformateurs :

Les transformateurs de puissance destinés au transport et la distribution de l'énergie électrique.

L'autotransformateur destiné au réglage de la tension et à mettre en marche des moteurs alternatifs.

Les transformateurs de mesure de tension et de courant.

Les transformateurs de phase destinés à alimenter les installations à convertisseurs statiques (redresseurs…).

Les transformateurs d'essais HT, THT.

Les transformateurs de puissance spéciaux pour l'alimentation de fours, postes de soudage.

Transformateur d'isolement qui crée une isolation galvanique entre son primaire et son secondaire et il sert à assurer la sécurité d'une installation.

Ces transformateurs ont le même nombre de spires au primaire et au secondaire.

I.10. Exemples d'utilisation

Les transformateurs remplis d'huile peuvent être utilisés dans presque tous les domaines de distribution de l'énergie. La mise en œuvre de ces transformateurs est avant tout

rentable dans les postes de distribution fixe des compagnies de distribution d'énergie et de l'industrie

On utilise les transformateurs dans les domaines suivants:

• Distribution industrielle modification de la tension.

• Radio- télévision alimentation tube image.

• Sécurité: transformateur de séparation galvanique.

• Adaptation de l'impédance en télécommunication (translateur).

• Mesure (transformateur de courant ou de tension)

I.11. Différents types de fonctionnement

I.11.1.Fonctionnement à vide en régime équilibré

Soit un transformateur triphasé dont les enroulements présentent :

- par phase, N1 spires au primaire et N2 spires au secondaire ;
- des couplages quelconques (étoile ou triangle) Appliquons respectivement aux bornes des phases du primaire les tensions sinusoïdales équilibrées

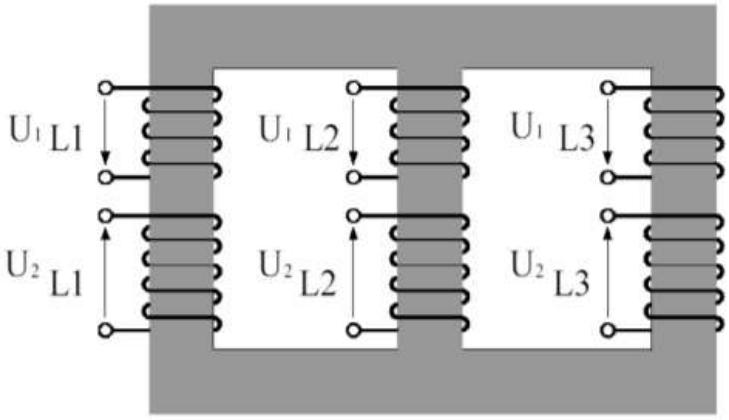


Figure I. 15 : le transformateur triphasé.

Les flux magnétiques induisent dans les trois phases du secondaire des tensions sinusoïdales équilibrées, de sens opposé à celles du primaire

I.11.2.Fonctionnement en charge

On raccorde les 3 phases du secondaire sur 3 récepteurs identiques de facteur de puissance ($\cos \varphi$ 2)

Soient $I_1L1\ [A]$; $I_1L2[A]$; $I_1L3[A]$ les courants dans les 3 phases du primaire.

Soient$I_2L1\ [A]$; $I_2L2[A]$; $I_2L3[A]$ les courant dans les 3 phase du secondaire.

La première colonne fonctionne comme un transformateur monophasé parfait de rapport

$$m = \frac{U_{2L1}}{U_{1L1}} \text{.....(3)}$$

Il en est de même pour les deux autres colonnes, soit pour résumer :

$$m = \frac{U_{2L1}}{U_{1L1}} = \frac{U_{2L2}}{U_{1L2}} = \frac{U_{2L3}}{U_{1L3}} \text{ .....(4)}$$

En régime équilibré, toute la théorie du transformateur monophasé est applicable à condition de raisonner « phase par phase », c'est-à-dire « à une phase du primaire correspond une phase du secondaire ».

I.11.3.Fonctionnement en régime déséquilibré

Le cas le plus fréquent du fonctionnement d'un transformateur triphasé en régime déséquilibré est celui des réseaux de distribution électrique. Il est nécessaire de savoir choisir le couplage des enroulements primaires et secondaires. Pour savoir quel couplage il convient d'adopter au primaire et au secondaire, il faut considérer un transformateur triphasé dont :

• Le primaire est alimenté par une ligne à 3 fils (les tensions sont équilibrées)

Le secondaire à son neutre sorti. Ce transformateur est soumis aux conditions limites suivantes :

- La phase du secondaire bobinée sur la 1ère colonne est chargée.
- Les 2 autres phases du secondaire sont à vide.

I.12. Défauts fréquents dans les transformateurs :

I.12.1.Défaut d'isolement de la partie active :

Le défaut d'isolement de la partie active est caractérisé par la perte, ou la très forte diminution, d'isolement d'un circuit électrique par rapport à son environnement, dont il doit être normalement isolé. Typiquement ce cas est rencontré dans les situations suivantes :

Amorçage entre enroulements normalement isolés entre eux

Amorçage entre la masse (la cuve ou le circuit-magnétique typiquement) et un enroulement, une connexion ou une traversée

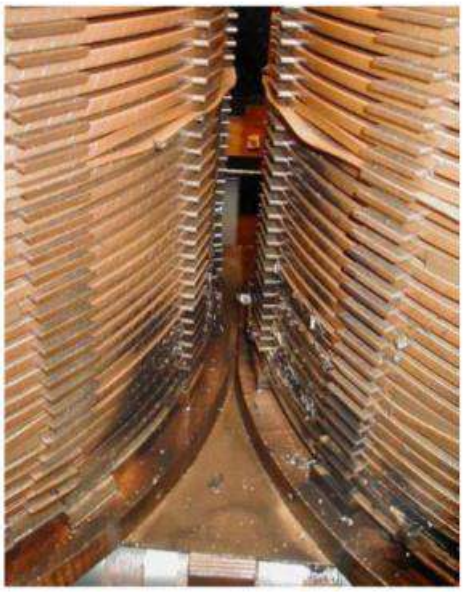


Figure I. 16: Amorçage entre enroulements.

I.12.2.Amorçage diélectrique entre spires

C'est un amorçage entre spires d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux figure (I.17). L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit, localement.



Figure I. 17: Amorçage entre spires, sans court-circuit.

I.12.3.Court-circuit entre spires :

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement qui devraient être normalement isolées entre elles Figure (I.18). Cela arrive souvent suite à un amorçage diélectrique entre spires entretenu, ou le déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements. Ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas.



Figure I. 18: Court-circuit entre spires.

I.12.4.Décharges Partielles :

Les décharges partielles, sont un phénomène local de micro-décharges dues à une faiblesse de l'isolant. Un exemple entre des cales de bobinages est visible sur la Figure (I.19). Les décharges en elles-mêmes sont rarement destructives, mais leur évolution peut l'être. Car à terme le carbone, conducteur, qu'elles génèrent peut se propager et diminuer la tenue diélectrique entre certains éléments sous tension et ainsi aller jusqu'à provoquer un amorçage.

Des mesures de décharges partielles sont possibles mais nécessitent des moyens de mesures haute tension lourds. Ils sont donc généralement réalisés au cas par cas en dehors des usines de transformateurs

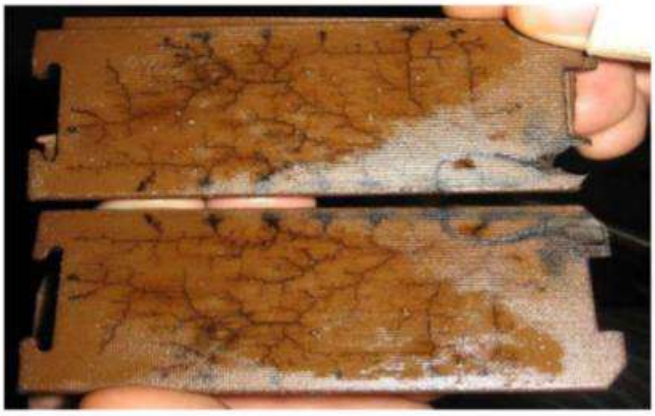


Figure I. 19: Décharges partielles sur des cales.

I.12.5.Coupure du circuit électrique :

La plupart des cas de coupure d'un circuit électrique sont le résultat d'un défaut interne, suite

- un amorçage de puissance entre spires, qui les fusionne et coupe le conducteur.
- un point chaud qui dégénère, au niveau des brasures des connexions internes, pouvant aller du débrasage jusqu'à la fusion du contact figure (I.20).

I.12.6.Un mauvais alignement d'un régleur



Figure I. 20: Coupure suite à la fusion d'un Conducteur.

I.12.7.Déformation géométrique des enroulements :

Il est possible mécaniquement de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement suite à des courts-circuits extérieurs qui provoquent des courants extrêmement élevés, qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes Figure (I.21), à noter sans amorçages entre spires, ni courts-circuits internes).

Il est possible de déformer un enroulement, ce qui fragilise inévitablement son isolement papier se trouvant au contact des conducteurs, sans nécessairement avoir d'amorçages entre spires ou à la masse. Un transformateur avec une telle déformation mécanique peut dans certains cas fonctionnés à son régime nominal. Il reste néanmoins fragilisé et il n'est absolument pas certain qu'il puisse ainsi tenir des perturbations de court-circuit ou de surtensions ultérieures sans amorcer.



Figure I. 21:Déformation mécanique d'un enroulement.

I.13. Techniques de diagnostic défauts dans les transformateurs :

L'utilisation des techniques de diagnostic, a une grande utilité car elle permet d'évaluer l'état des composants du transformateur et de programmer des activités préventives ou rectificatives, de manière à faciliter la programmation des travaux et réduire les temps d'indisponibilité. Dans ce cadre, les actions de diagnostic effectuées SONELGAZ-GRTE sur les transformateurs de puissances sont :

I.13.1.Analyse d'huile :

Le fonctionnement dans de bonnes conditions des transformateurs, dépend dans une large mesure de la qualité des huiles minérales isolantes utilisées. Les caractéristiques des huiles se dégradent par l'effet de la contamination, de l'humidité et du vieillissement.

L'huile isolante est l'un des éléments les plus importants dans un transformateur qui nécessite une surveillance et un entretien car sa fonction est d'assurer l'isolation et le refroidissement de celui-ci.

L'huile est un fluide qui pénètre dans toutes les parties internes du transformateur, sa circulation permet l'évacuation de la chaleur produite par les enroulements, par convection à travers la cuve du transformateur.. [11]

La connaissance de l'état de l'huile et des gaz qui peuvent être dilués dans ce dernier est d'une importance fondamentale pour assurer un bon fonctionnement des transformateurs, il est par conséquent nécessaire d'effectuer une vérification régulière de l'état de l'huile. . [12]

I.13.2.Mesures diélectriques :

Les isolants électriques des équipements sont soumis à un vieillissement donnant lieu à une perte progressive de leurs caractéristiques diélectriques pouvant être la cause des défauts du transformateur.

L'objectif des mesures diélectriques est de décaler d'éventuelle dégradations dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenu d'un incident due à une avarie.

La condition d'isolement est un facteur essentiel de la fiabilité opérationnelle des transformateurs.

I.13.3.Analyse des furanes :

La dégradation des matériaux cellulosiques constituant l'isolation solide des enroulements du transformateur conduit à la des dérivées franques, leurs présences dans les huiles du transformateur est un bon outil de diagnostic de l'état de l'isolation de ce dernier. [13]

Les composés francs sont générés quand la cellulose est décomposée thermiquement, par conséquent un contenu élevé de composés franques indique un haut degré de dégradation du papier isolant.

I.13.4.Mesures électriques :[14]

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont:

I.13.4.1.Mesure du courant d'excitation : [12]

La technique d'essai consiste à injecter une tension alternative de valeur réduite (jusqu'à 12KV), De différents niveaux, et réaliser une mesure du courant de magnétisation, en observant s'ils existent une non-linéarité dans les valeurs observées qui identifient des problèmes potentiels dans le noyau.

I.13.4.2.Mesure de rapport de transformation : [12] [15]

Il consiste à mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régleur et les comparer avec les valeurs de conception pour valider les connexions intérieures. Des déviations indiquent des courts-circuits entre spires, un circuit ouvert, des problèmes de connexion ou un défaut dans le régleur. Les mesures sont effectuées : - A la mise en service - Lors d'un entretien détaillé. - En cas d'une défaillance. - Après une réparation. La technique d'essai consiste à injecter des tensions alternes dans le bobinage haut tension, en mesurant les tensions résultantes dans les autres.

I.13.4.3.Mesure de la résistance d'enroulements : [15]

La mesure de la résistance a pour objectif de déterminer l'existante des déviations sur les valeurs de conception des résistances dans chaque bobinage. Entre autres cette mesure détermine les pertes par effet joule dans les enroulements et les connexions.

La mesure est effectuée par l'application du courant continu sur le bobinage, en mesurant ensuite la chute de tension par conséquent sa résistance. En prenant le soin de relever la température des enroulements afin de pouvoir ramener les valeurs mesurées vers des valeurs à la température référence.

I.13.4.4.Mesure de la réactance de fuite :

La mesure de la réactance de fuite ou impédance de court-circuit, permet par comparaison aux valeurs des mesures lors des essais en usine du transformateur de détecter des changements très importants (>±50%) qui devrait amenée à des investigations plus importantes ; un circuit ouvert ou des courts-circuits entre spires, ou entre enroulement et cuve.

I.14.Conclusion

Du point de vue technologique le transformateur est très simple. Alors que son étude théorique est assez compliquée.

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 avec un circuit magnétique pour les circuits couplés en haute fréquence.

➢ *Chapitre II*

Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle

CHAPITRE II : Modèles du transformateur pour une analyse fréquentielle

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre on va établir les principaux modèles des transformateurs triphasés qui existent dans la littérature, dans le but de choisir le modèle le mieux adapté à notre étude. Le transformateur de puissance comporte des bobines sous forme de galettes. Enroulées autour d'un noyau de fer et placées dans un liquide diélectrique. La tâche principale des constructeurs de ces transformateurs de puissance consiste à placer dans un volume le plus réduit possible des enroulements capables de supporter sans défaillance les surtensions dues aux ondes de chocs rapides ou aux oscillations internes entretenues. Ainsi un transformateur relié à un réseau très haute tension est soumise à différents types de tension dont la connaissance est importante pour établir les contraintes auxquelles sont soumis les diélectriques [16].

II.2. L’analyse de la réponse en fréquence (FRA) :

II.2.1. Définition :

L’Analyse de la réponse en fréquence (FRA) est un outil qui peut donner une indication du mouvement du noyau ou d’enroulement dans les transformateurs. Ceci est fait en effectuant une mesure simple, tout en regardant à quel point un enroulement de transformateur peut transmettre un signal de basse tension qui varie en fréquence. Tout cela est lié à son impédance, dont les éléments capacitifs et inductifs sont intimement distribués dans la construction physique du transformateur. Les changements de la réponse en fréquence mesuré par des techniques FRA peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur du transformateur, dont la cause doit être en suite identifiée et analysé [17].

II.2.2. Principe de la méthode :

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductances et de résistances; un circuit très complexe (figure II.1) qui génère une empreinte digitale ou signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des réponses sont représentées sous forme de courbe [18].

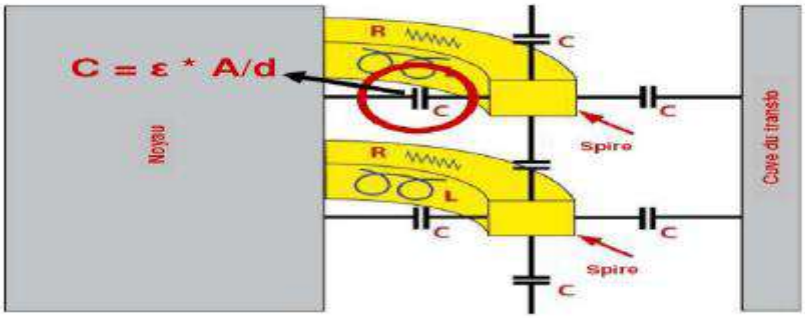


Figure II. 1 : Modèle d'un enroulement de transformateur

La capacitance est déterminée en fonction de la distance entre les conducteurs. Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacitances [19].

Le principe de fonctionnement est d'injecter un signal d'excitation électrique sur l'un des enroulements et de mesurer le signal de réponse sur une large plage de fréquence (Méthode de balayage en fréquence). Le rapport de ces deux signaux donne la réponse exigée. Ce rapport s'appelle la fonction de transfert du transformateur à partir duquel la grandeur et la phase peuvent être obtenues.

II.2.3. Objectifs des mesures par FRA

Le principal intérêt des mesures par FRA sur les transformateurs est de détecter des déformations des enroulements qui peuvent résulter des forces électromagnétiques très importantes qui s'exercent du fait des surintensités apparaissant au moment de défauts directs, de défauts dans le régleur, de mauvaises synchronisations [20].

II.2.4. Quand faut-il faire un test FRA ?

Les applications typiques de la mesure de la FRA sont [21]:

- Contrôle du transformateur après le test en court-circuit.
- Vérification de l'intégrité des transformateurs après un transport.
- Evaluation de l'état d'un transformateur ayant été soumise à des courants de défaut transitoires élevés
- Mesures de diagnostic de routine.
- Diagnostic consécutif à une alarme du transformateur ou un déclenchement de protection
- Test consécutif à des changements significatifs des valeurs contrôlées en ligne (ex : gaz dissous).

- Inspection approfondie consécutive à l'observation de résultats de tests inhabituels.
- Après un séisme.
- Recherches scientifiques.

II.2.5. Type d'essais par FRA

Les principaux types d'essais par FRA sont :

II.2.5.1. Essais entre extrémités :

On injecte le signal tour à tour à une extrémité de chaque enroulement et l'on mesure le signal à l'autre extrémité (figure II.2) .

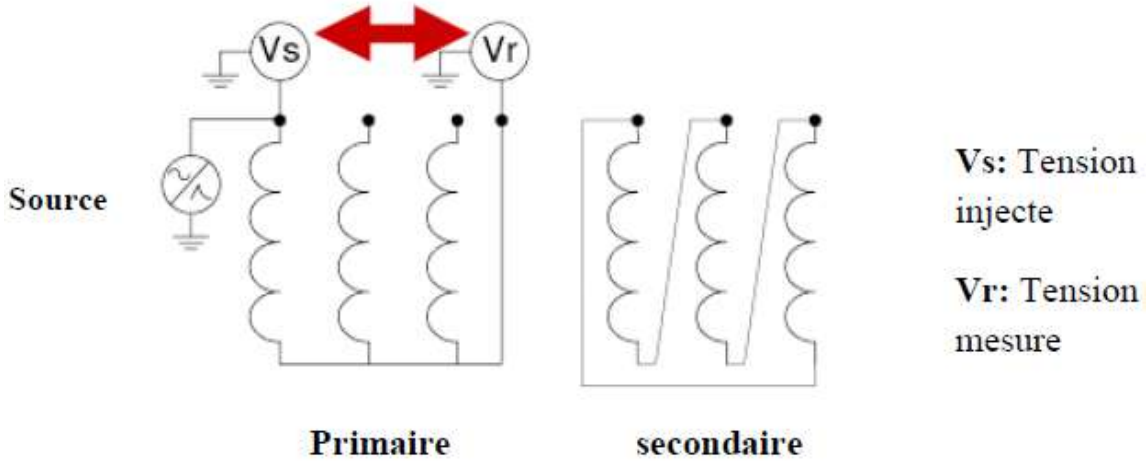


Figure II. 2.Essai entre extrémités

L'impédance de magnétisation du transformateur est le principal paramètre caractérisant la réponse en fréquence basse (en-dessus du premier point de résonance) quand on utilise cette configuration.

Cet essai est celui que l'on utilise le plus communément pour sa simplicité et la possibilité qu'il offre d'examiner séparément chaque enroulement.[22]

II.2.5.2. Essais en court-circuit

Cet essai ressemble à la mesure entre extrémités mais avec un enroulement court-circuite sur la même phase voir (figure II.3) , de telles mesures permettent d'éliminer l'influence du noyau en dessus de 10-20 KHz environ du fait que la réponse en fréquence basse est caractérisée par l'inductance de fuite au lieu de l'inductance de magnétisation. La réponse pour des fréquences plus élèves est similaires à celle que l'on obtient en utilisant la mesure entre extrémité.[23]

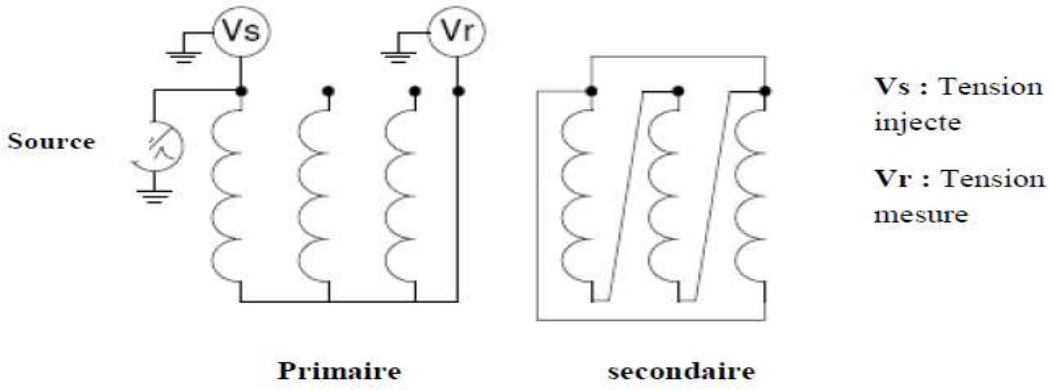


Figure II. 3. Essai en court-circuit

II.2.5.3. Essai capacitif entre enroulements

On applique le signal à une extrémité d'un enroulement et l'on mesure la réponse à une extrémité d'un autre enroulement de la même phase (non relie au premier) (figure II.4) [22].

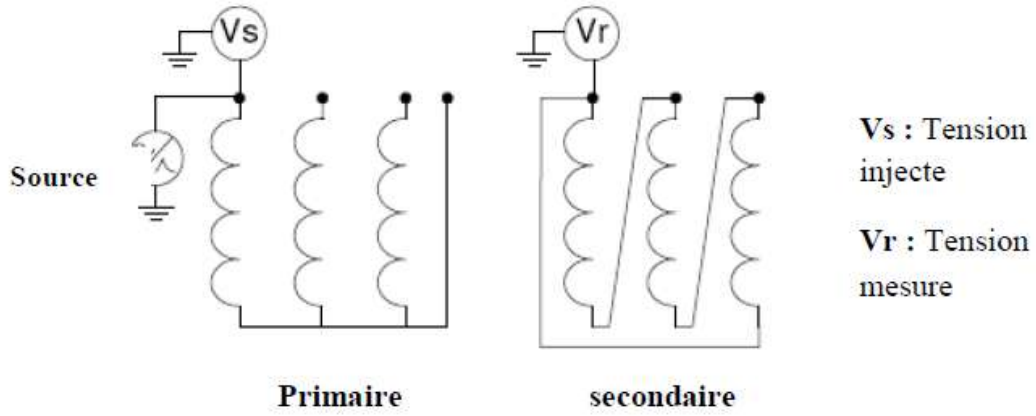


Figure II. 4.Essai capacitif entre enroulements

II.2.5.4. Essai inductif entre enroulements

On injecte le signal sur une borne coté HT, et l'on mesure la réponse sur la borne correspondante coté BT, les autres extrémités des deux enroulements étant reliées à la terre (figure II.5) [22].

Pour cette mesure, la plage en basse fréquence est déterminée par le rapport des nombres de spires des enroulements.

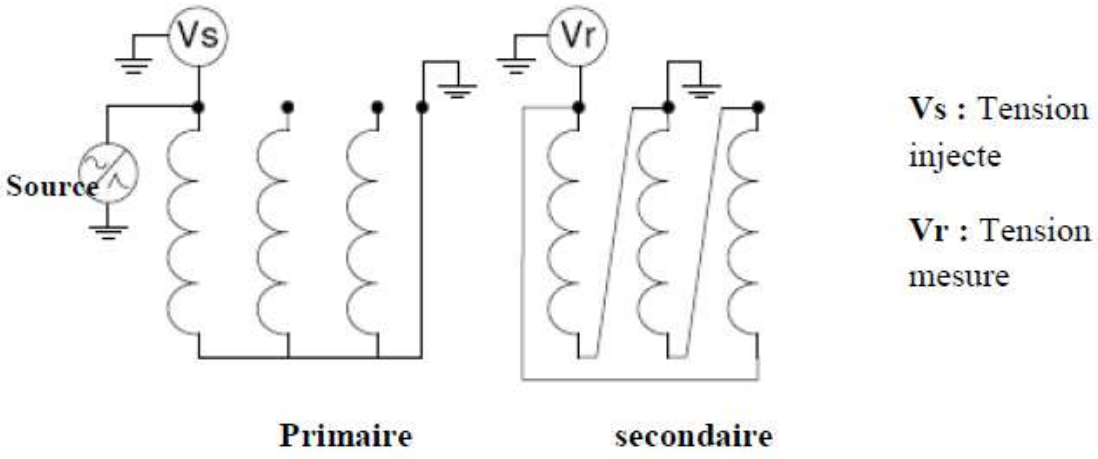


Figure II. 5. Essai inductif entre enroulements

II.2.6. L'équipement de mesure

Le matériel nécessaire pour mener une bonne mesure de l'analyse de la réponse en fréquence se compose des éléments suivants:

II.2.6.1. Le FR Analyzer

Le FR Analyzer est un analyseur de réponse au balayage en fréquence pour le diagnostic des enroulements de transformateur de puissance. Son concept matériel universel commandé par un logiciel opérant sur un PC fait du FR Analyzer un outil efficace et d'une grande souplesse d'emploi pour le diagnostic des enroulements et des noyaux magnétiques des transformateurs de puissance.[24]

Le FR Analyzer mesure la réponse en fréquence des enroulements d'un transformateur sur une large plage de fréquences et compare cette réponse à celle qu'on obtiendrait pour un enroulement en bon état. Les écarts de la réponse en fréquence permettent de révéler de nombreux types de défauts différents sur les enroulements et les noyaux magnétiques des transformateurs.[24]

II.2.6.2. Connecteurs et commandes

Le FR Analyzer présente les connecteurs et les commandes suivants [25]:

En face avant (figure II.6):

• Connecteur OUTPUT (sortie du signal source)

• Connecteur REFERENCE (CH 1) (entrée du canal de référence)

• Connecteur MEASUREMENT (CH 2) (entrée du canal de mesure)



Figure II. 6.Vue de la face avant du FR Analyzer

En face arrière (figure II.7):

- Interrupteur d'alimentation
- Entrée d'alimentation en courant continu
- Borne de terre équipotentielle
- Sortie de courant continu 5 V
- Connecteur USB



Figure II. 7.Vue de la face arrière du FR Analyzer

II.2.6.3. Câbles pour les essais

L'approche recommandée consiste à utiliser trois câbles blindes haute fréquence (ayant une impédance caractéristique connue et constante) pour les mesures de FRA : un pour l'injection de tension, un pour la mesure de la tension de référence sur la borne d'entrée et un pour la mesure de la tension de réponse. La longueur des câbles haute fréquence doit être suffisante pour atteindre les bornes alors que l'équipement d'essai est installé au pied du transformateur. Il est nécessaire d'adapter l'impédance des câbles à haute fréquence afin d'éviter les réflexions.[19]

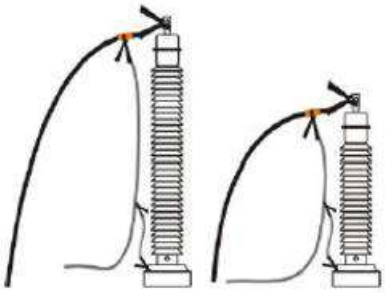


Figure II. 8. Bon raccordement à la terre

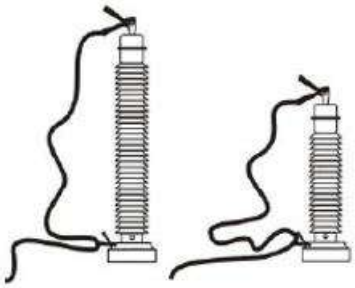


Figure II. 9.Mauvais raccordement à la terre

II.2.7. Procédure d'essai

L'analyse de la réponse de balayage de la fréquence des enroulements des transformateurs de puissance ne doit être entrepris que par du personnel qualifié et formé à cette tâche. La procédure se déroulera de la façon suivante :

II.2.7.1. Consignation du transformateur

Avant de raccorder un câble de test quelconque au transformateur à tester, observez toujours les règles de sécurité suivantes :[24]

- Le transformateur à examiner doit être déconnecté du réseau électrique associé à toutes les bornes (ligne et neutre), sauf les services auxiliaires pour les changeurs, les pompes, les ventilateurs.
- Le transformateur à examiner devrait être dans son état normal de service, c'est-à-dire entièrement monté et rempli d'huile.
- De préférence le noyau de transformateur devrait être exempt de magnétisme résiduel, car le magnétisme résiduel influe sur les résultats d'essai de FRA à de basses fréquences. Si le magnétisme résiduel est extrême, il sera nécessaire de démagnétiser le noyau avant l'essai de FRA.

- Les essais à courant continu, par exemple mesure de la résistance d'enroulement, peuvent causer le magnétisme résiduel ; par conséquent des essais de FRA devraient être réalisés avant tous les essais à courant continu.
- Ouverture des sectionneurs de barres.
- Condamnation des sectionneurs de barres en position ouverte.
- Vérification d'absence de tension.
- Mise à terre des liaisons (cordes ou câbles).
- Déconnexion des liaisons sur les bornes de traversées.
- Ne touchez aucune borne qui n'est pas visiblement connectée à la terre.
- N'ouvrez pas le boîtier du FR Analyzer.
- Ne réparez pas, ne modifiez pas et n'adaptez pas le FR Analyzer, ou les accessoires.

II.2.7.2. Mise en service du FR Analyzer

La procédure de mise en service du FR Analyzer se déroule comme suit :[24]

- Raccordez respectivement les câbles coaxiaux jaune, rouge et bleu aux connecteurs OUTPUT, REFERENCE et MEASUREMENT du FR Analyzer (figure II.10).



Figure II. 10. Connexion des câbles coaxiaux

- Raccordez le câble de terre à la borne de terre équipotentielle en face arrière du FR Analyzer, et pincez son autre extrémité à la cuve du transformateur (figure II.11).



Figure II. 11.Raccordement à la terre du FR Analyzer

- Mise sous tension du FR Analyzer : Le FR Analyzer est alimenté soit par un adaptateur de courant alternatif soit par le bloc batterie.

II.2.7.3. Paramétrage des mesures grâce au logiciel FR Analyzer

Le paramétrage du FR Analyzer consiste à définir le transformateur ainsi que la mesure. Il permet aussi d'avoir une base de données pouvant contenir toutes les mesures effectuées. La préparation des mesures doit passer par les étapes suivantes :

- Connexion du FR Analyzer au PC : Grâce au câble USB et au cordon d'alimentation du convertisseur USB optique.
- Démarrage du logiciel FR Analyzer.
- Ajout d'un nouveau transformateur et introduction des données :
- Constructeur
- Année de fabrication
- Puissance nominale
- Tension
- Couplage
- Emplacement physique
- Numéro de série
- Ajout d'un nouveau test et introduction des détails du test :
- Nom du test
- Testeur
- Température de l'huile
- Date et heure de l'essai
- Ajout de toutes les traces que l'on souhaite enregistrer (Une trace de test est la réponse en fréquence d'un enroulement de transformateur soumis au test).

II.2.7.4. Raccordement du FR Analyzer à un transformateur de puissance

Le raccordement du FR Analyzer au transformateur de puissance à l'essai se fait comme suit :[24]

1. Fixer une pince de mesure sur la borne de référence de traversée du transformateur.

Le choix de la borne de référence se fait comme suit :

- couplage étoile : injection sur la borne neutre **N** à travers les deux câbles (rouge et jaune).
- couplage triangle : injection sur une phase à travers les deux câbles (rouge et jaune).

2. Raccorder les câbles coaxiaux jaune et rouge via un adaptateur BNC livré au connecteur BNC de la pince (figure II.12).



Figure II. 12.Raccordement de la pince pour borne de traversée aux câbles coaxiaux jaunets rouge

3. Raccorder les tresses en aluminium à la pince pour borne de traversée à l'aide des visse trouvant sur la pince et serrer les vis à fond (figure II.13).

Si nécessaire, utiliser la gaine isolante livrée pour éviter tout contact électrique entre la tresse en aluminium et le transformateur.



Figure II. 13.Serrage de la pince à visser

4. Raccorder les tresses en aluminium à la cuve de transformateur en utilisant les pinces à vis.

Assurez-vous que toutes les pinces et les tresses sont vissé à fond et qu'il existe un contact électrique entre les pinces et la cuve du transformateur. En cas de doute, décapez la couche de vernis à l'aide de la lime livrée.

5. Fixer une autre pince sur la borne de mesure de traversée du transformateur.

6. Raccorder le câble coaxial bleu au connecteur BNC sur la pince pour borne de traversée (figure. II.14)



Figure II. 14.Raccordement de la pince pour borne de traversée au câble coaxial bleu

7. Pour mettre à la terre la pince pour borne de traversée de mesure, répéter les étapes 3 et 4.

II.2.8. Méthodes d'interprétation

II.2.8.1. Interprétation Méthodologique

La FRA est une méthode comparative pour évaluer l'état des transformateurs de puissance. Pour évaluer les résultats de FRA, on compare, généralement par une simple observation visuelle des courbes, les informations actuelles avec les informations de référence [19].

Il y a trois approches pour obtenir des informations de références :

- Mesures préalables sur le même transformateur (Empreinte digitale)
- Mesures sur des transformateurs identiques (Jumeaux)
- Mesures sur des phases d'un même transformateur testes séparément

II.2.8.2. Domaine de fréquence pour les interprétations

Le Tableau II-1 montre le domaine d'interprétation de FRA compte tenu des limites venant de la géométrie des installations d'essai et de certaines conditions d'incertitude liées à des flux rémanents.

En règle générale, les spires court-circuitées, l'aimantation et d'autres défauts reliés au noyau magnétique altèrent la forme de la courbe aux basses fréquences. Les moyennes fréquences quand elles représentent des mouvements axiaux ou radiaux de l'enroulement, et les hautes fréquences indiquent des défauts quant aux câbles qui relient les enroulements aux traversées et aux changeurs de prise.

Tableau. II-1 : Domaines typiques d'interprétation de FRA

f < 2000 Hz	Déformationsdu noyau, magnétismerésiduel
2000 Hz < f < 20 kHz	Court-circuit entre spires, circuits ouverts.
20kHz < f < 200 kHz	Déplacements relatifs entre les enroulements.
200kHz < f < 2 MHz	Deformationsproper's d'enrollment.
2 MHz < f < 10 MHz	Disposition de couplages et câbles de mesure.

II.3. Modélisation de transformateur de puissance triphasé:

II.3.1. modélisation en haute fréquence :

En HF, on néglige l'effet non linéaire du noyau de fer, mais la modélisation du transformateur reste plus complexe par rapport à celle de 50 Hz. En raison de plusieurs phénomènes à savoir :

- Effets des courants de Foucault dans le noyau et dans les conducteurs de l'enroulement ;
- Actions des capacités apparaissant entre les spires et entre les spires et la masse;
- Possibilités de phénomènes de résonances.

II.3.2. Les modèles usuels des transformateurs :

Dans ce chapitre on va représenter les modèles et les méthodes les plus fréquent dans le domaine haut fréquence

II.3.2.1. Modèle de RESEL :

RESEL est un programme conversationnel pour l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques, son premier objectif était l'étude des phénomènes transitoires dans les transformateurs[26]. II nécessite la modélisation du transformateur à l'aide de deux schémas couplés. L'un traduit le comportement électrique du transformateur, l'autre exprime son comportement magnétique. Le circuit électrique est composé de plusieurs cellules résistances, capacités et forces électromotrices .

L'association de ces cellules dépend des techniques de bobinage du transformateur. Le circuit magnétique est composé d'un réseau de réluctances et de forces électromotrices. Les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique. Les sources du circuit magnétique sont liées au courant dans les enroulements. Pour prendre en compte les effets de la fréquence, le circuit magnétique est décomposé en éléments de géométrie simple pour lesquels la résolution des équations de Maxwell est relativement simple. Les réluctances complexes ainsi calculées se composent de cellules résistances - inductances.

La figureII.15illustre la modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL.

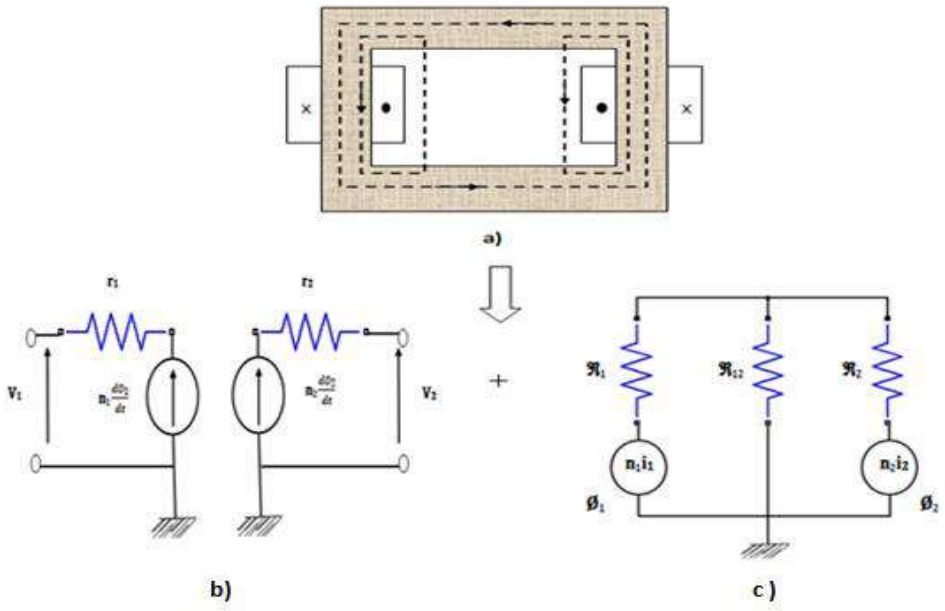


Figure II. 15. La modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL.

II.3.2.2. Modèle d'EMTP :

EMTP est une abréviation du mot « Analyse des transitoires électromagnétiques », ce code est utilisé pour simuler le comportement en régime transitoire des réseaux électriques.

Pour modéliser un transformateur sous EMTP consiste à faire un schéma équivalent comprenant :[27] [28]

- Des transformateurs parfaits.
- Une branche magnétisante saturable modélisant le noyau de fer.
- Des résistances des enroulements, des capacités de couplage et des inductances de fuite.
- Des inductances de fuite des groupes (galettes, couches, ou bobines).

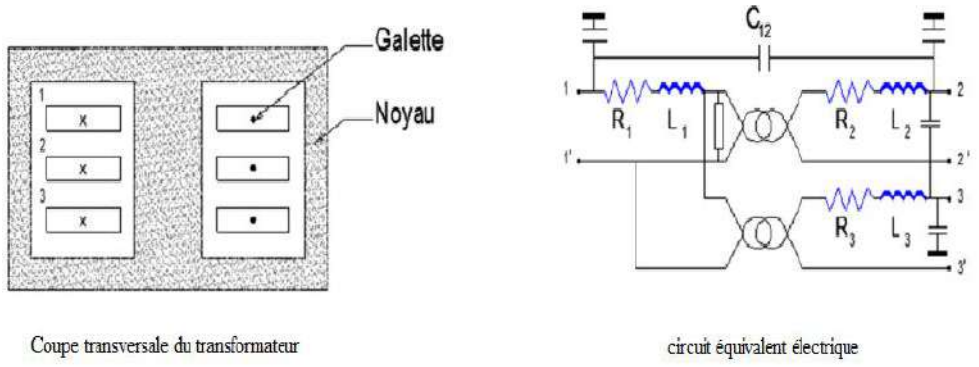


Figure II.16.Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP

Les paramètres sont déterminés soit par la mesure (essai à vide, essai en court-circuit…), soit par le calcul direct de la géométrie .L'intérêt du modèle est son utilisation dans EMTP permettant d'intégrer des schémas non-linéaires (parafoudres, ...), des lignes à constantes réparties, et d'effectuer des études d'interaction du transformateur avec le réseau dans des configurations réelles. Mais, dans certains cas, l'utilisation du code de calcul EMTP, pour modéliser un transformateur, ne représente pas la réalité .[29]

II.3.2.3. Modélisation par la théorie de lignes :[30]

En même temps que l'évolution de la théorie et l'analyse modale de lignes de transmission, des modèles, basés sur la même théorie, sont développés, pour modéliser les transformateurs figure Pour cela, l'enroulement d'un transformateur est décomposé en spires élémentaires, en considérant que le flux magnétique ne pénètre pas dans le noyau magnétique, et que la vitesse de la propagation est constante dans l'enroulement. La mise en équation de ce système donne une relation linéaire, entre la matrice d'inductance et la matrice de capacité .

Les résultats donnés par cette méthode ne sont valables que pendant plusieurs centaines de nanosecondes. L'application de cette méthode donne de bons résultats avec la mesure, dans le cas d'un transformateur avec un nombre de spires limité (inférieur à 12).

L'application de cette méthode dans le cas d'un transformateur de puissance n'a jamais été abordée. Mais, vu les hypothèses (le flux magnétique ne pénètre pas dans le noyau magnétique, et que la vitesse de la propagation est constante dans l'enroulement), un tel modèle donnerait des résultats erronés .

Cette méthode a été ensuite généralisée au cas de N enroulements, afin de tenir compte du noyau magnétique, sur le calcul des impédances, Pour cela, les enroulements sont considérés avec des épaisseurs suffisamment fines. La précision de cette méthode est liée directement au degré de la discrétisation du transformateur. Musil a utilisé la même approche, afin de comprendre les résonances internes du transformateur, dans le cas d'un court-circuit de la ligne.

A l'issue de cette étude, il s'est intéressé aux réflexions des ondes au point d'interconnexion du transformateur et de la ligne, toujours en modélisant le transformateur par une ligne de transmission

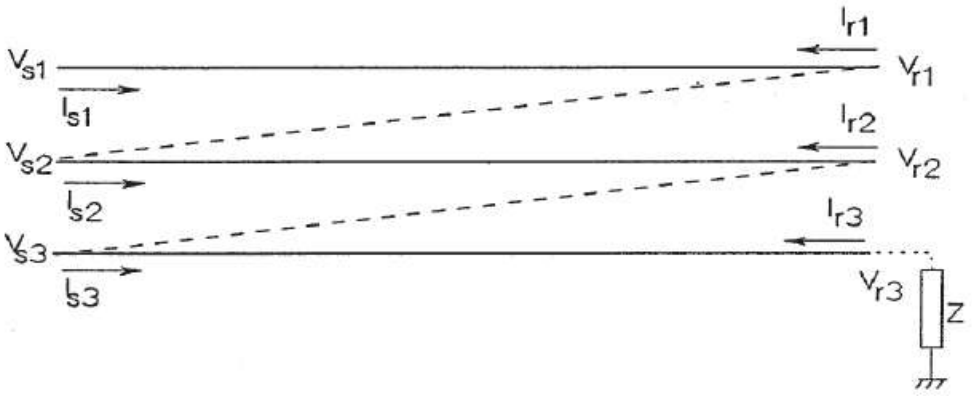


Figure II.17. Schéma équivalent d'un enroulement.

Malgré les conclusions positives de ces diverses études, la modélisation par la théorie de lignes semble avoir un domaine d'application spécifique et restreint : elle est limitée pour les études d'interaction entre transformateur et ligne. La figure (II.18) la détermination des paramètres n'est pas aisée (impédance caractéristique de la ligne équivalente au transformateur.

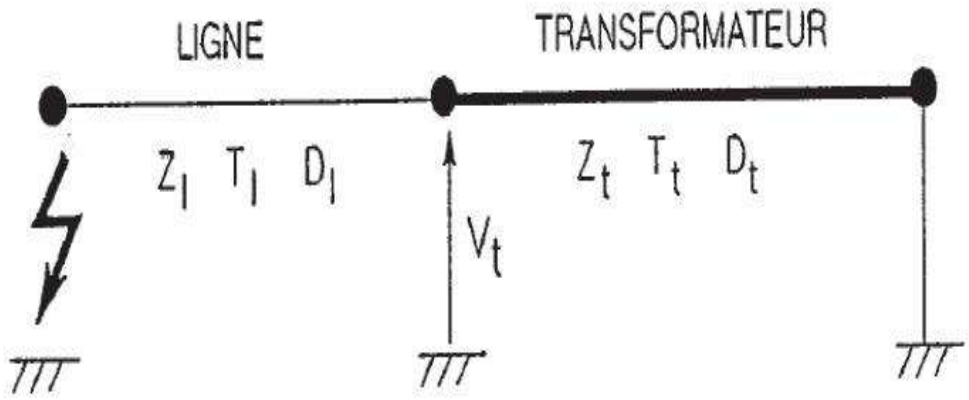


Figure II. 18. Modélisation du transformateur par une ligne

- Z impédance caractéristique.
- T temps de propagation.
- D facteur d'amortissement.

II.3.2.4. Modélisation par des circuits ou des transformées :

Des travaux ont combiné l'approche des ondes mobiles pour simuler la ligne avec un circuit équivalent du transformateur, par unité de longueur, pour l'étude des interactions ligne transformateur. Ils ont utilisé une inversion numérique de la transformée de Laplace, en identifiant la fonction de Laplace à inverser.

La modélisation du transformateur est très simplifiée : distribution constante des capacités par rapport à la masse, valeurs constantes pour les résistances et inductances, et les mutuelles sont omises [31].

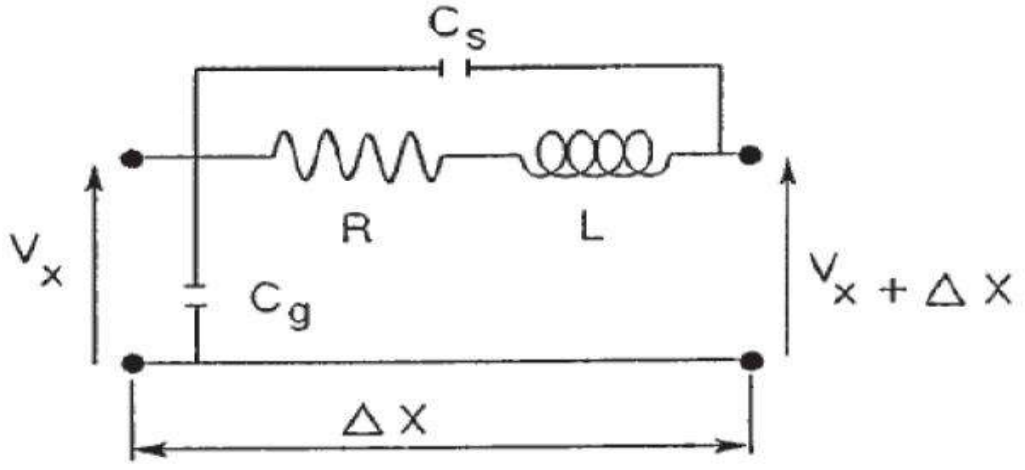


Figure II.19. Circuit équivalent du transformateur monophasé pour une section longueur ΔX.

II.3.2.5. Modélisation par inductances propres et mutuelles :

Heller et V Severka ont montré que le comportement d'un enroulement soumis à une onde de choc est assimilable à celui d'un système de condensateurs, de résistances, et d'inductances. C'est le principe du modèle de transformateur de puissance basé sur les inductances propres et mutuelles. Selon l'étude envisagée, c'est-à-dire selon qu'oins intéresse au phénomène de propagation, ou aux modes de résonance du transformateur ,ces paramètres peuvent être répartis ou concentrés. Cette approche peut être plus ou moins précise, et plus ou moins coûteuse en temps de calcul, suivant le degré de raffinement atteint dans la représentation des enroulements.

Le transformateur est discrétisé par spires, par galette, ou encore par groupement de spires, que l'on appellera éléments ou spires équivalentes Figure(II.20).

Au point de vue inductif, chaque élément est représenté par son inductance propre. Cette dernière est couplée à toutes les autres inductances, par des inductances mutuelles. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages, et pour chaque élément est représenté par son inductance propre. Cette dernière est couplée à toutes les autres inductances, par des inductances mutuelles. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages, et pour chaque élément, une capacité par rapport à la masse.

Ces éléments sont calculés, en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage, ainsi que des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau magnétique [32].

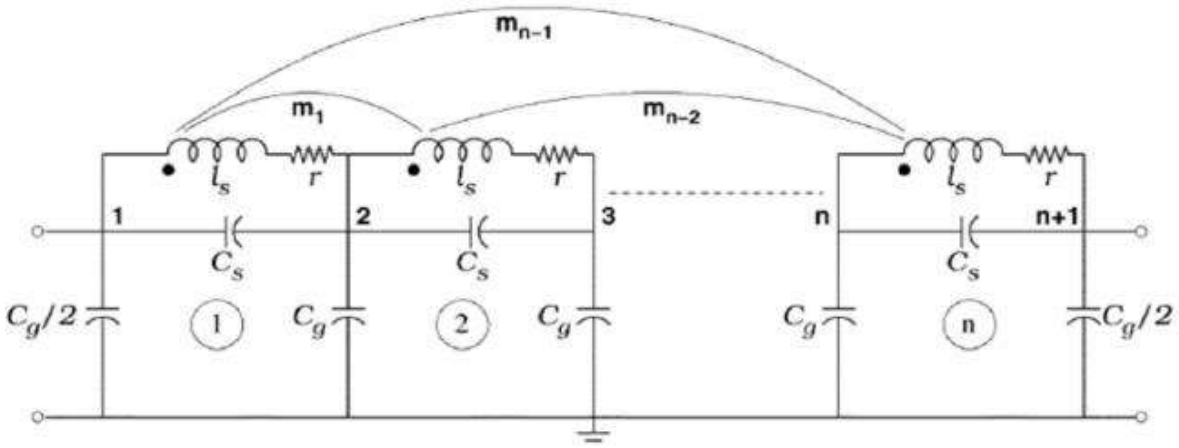


Figure II.20.modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié.

Avec :

Cs : capacité série.

Cg : capacité shunt.

r: résistance.

L : l'inductance propre.

M_{1N} : représenté les inductances mutuelles.

II.3.2.6 Le modèle équivalent du transformateur en HF :

La structure de ce modèle est basée sur la théorie du quadripôle en. Elle établit la correspondance entre les différentes impédances qui peuvent être mesurées entre les bornes d'entrée et de la sortie d'une phase du transformateur, les impédances obtenues sont exploitées pour construire un modèle en du transformateur.

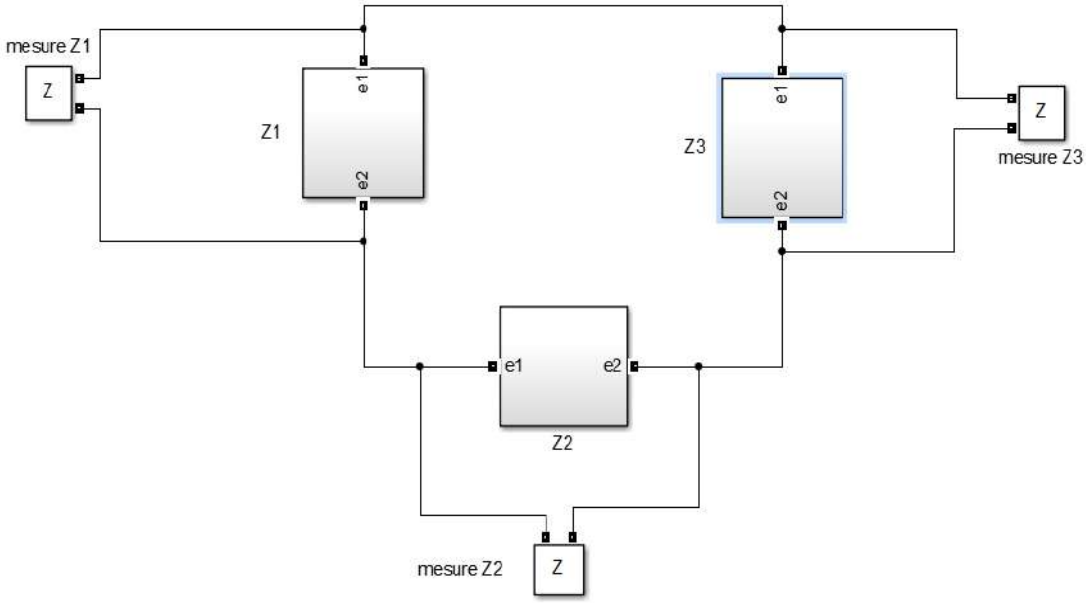


Figure II.21 : Structure de modèle d'un quadripôle.

Le circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases est montré dans la figure. II.22.

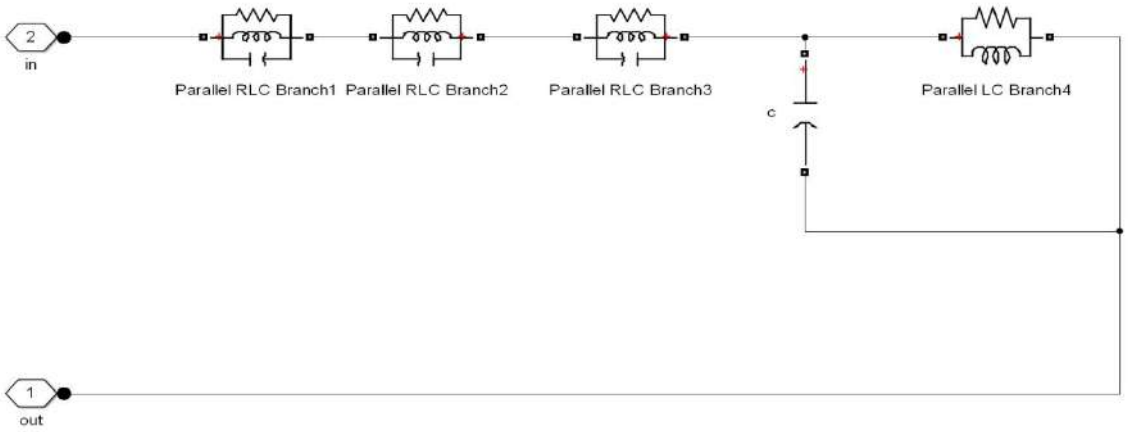


Figure II.22 : Circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases.

Conclusion :

Nous avons vu dans cette étude bibliographique les divers modèles de transformateur de puissance en haute fréquence, existants dans la littérature.

Le modèle R,L,C basé sur les inductances propres, mutuelles, et de fuites est le plus adapté à notre travail, et donc retenu pour étudier le comportement des transformateurs de puissance, en régime transitoire.

Pour notre étude, nous adoptons l'approche fréquentielle qui peut nous donner les fréquences de résonance. Cependant, avec ce choix, un compromis entre précision et temps de calcul s'impose, du fait qu'à chaque fréquence nous devons résoudre le même réseau (schéma équivalent).

➢ *Chapitre III*

Modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF

CHAPITRE III : Modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéressera à la modélisation et simulation d'un transformateur triphasé en HF, elle est basée sur le calcul des impédances de chacune des phases dans une gamme de fréquences 0-200000 Hz., afin d'identifier les paramètres du modèle proposé

Le modèle le plus approprié pour notre étude est le modèle équivalent en ɪɪ du transformateur en HF à base d'inductance propre et mutuelle, pour sa simplicité d'une part et d'autre part pour il contient parfaitement à une étude en haute fréquences, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur.

III.2. But principal:

L'objectif principal est la détection et la classification des défauts résistifs dans un enroulement de transformateur triphasé par l'observation de la variation entre les grandeurs simulées par rapport à une signature de référence d'un enroulement sain.

Une autre approche de diagnostic a été adoptée en utilisant une comparaison entre les paramètres du schéma équivalent à l'enroulement sain et ceux calculés à partir des réponses collectées sur l'enroulement défaillant.

III.3. Simulation :

III.3.1. Logiciel utilisé :

III.3.1.1. Définition

MATLAB pour Matrix LABoratory, est une application qui a été conçue afin de fournir un environnement de calcul matriciel simple, efficace, interactif et portable, permettant la mise en œuvre des algorithmes développes dans le cadre des projets linpack et eispack.

MATLAB est constitué d'un noyau relativement réduit, capable d'interpréter puis d'évaluer les expressions numériques matricielles qui lui sont adressées :

– soit directement au clavier depuis une fenêtre de commande ;

– soit sous forme de séquences d'expressions ou **s**cripts enregistrées dans des fichiers-texte appel ´es m-files et ex ´écoutées depuis la fenêtre de commande ;

– soit plus rarement sous forme de fichiers binaires appelés Mex-files ou fichiers . Mex génère à partir d'un compilateur C ou fortran.

Ce noyau est complet par une bibliothèque de fonctions prédéfinies, très souvent sous forme de fichiers m-files, et regroupées en paquetages ou toolboxes . A cote des toolboxes requises local et Matlab, il est possible d'ajouter des toolboxes spécifiques `à tel ou tel problème mathématique ,Optimisation Toolbox, Signal Procession Toolbox par exemple ou encore des toolboxes crées par l'utilisateur lui-même. Un système de chemin d'accès ou patch permet de préciser la liste des répertoires dans lesquels MATLAB trouvera les différents fichiers m-files.

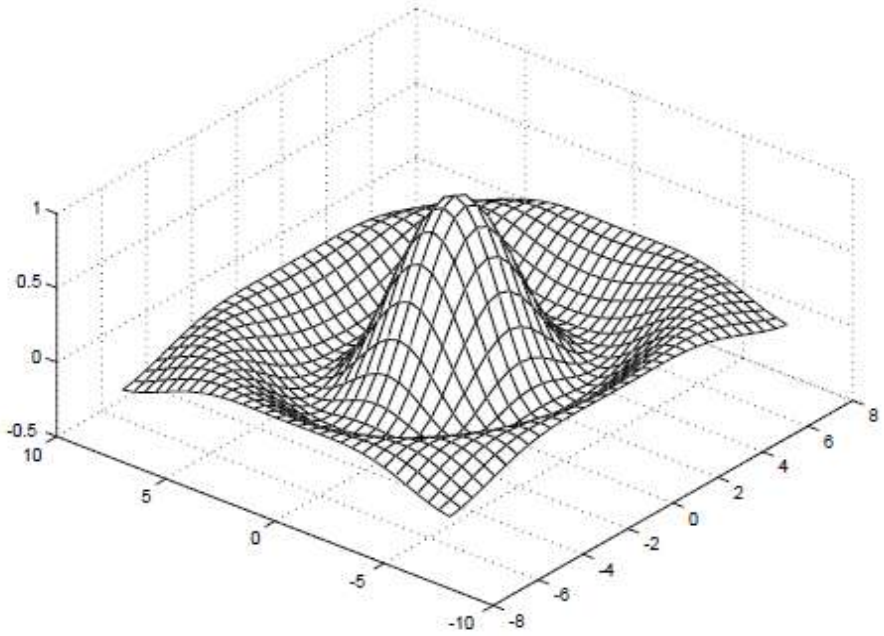


Figure III.1 : interface graphique 3D sous Matlab.

III.3.1.2. Ecran de base

L'écran de base comprend l'écran (fenêtre) de contrôle ainsi que des fenêtres complémentaires permettant de suivre le fonctionnement général d'une application.

III.3.1.3. Simulink

Le Toolbox Simulink est une fonction lancée depuis Matlab qui donne accès à une description graphique des problèmes avec application au traitement du signal, l'automatique classique, la logique floue...

La base est une description en schéma-bloc hiérarchique, chaque bloc étant une fonction décrite en langage Matlab ou à partir d'autres blocs.

Pour l'utilisateur, la description et l'exécution de Matlab est transparente dans les problèmes usuels. Il ne se préoccupe que de la construction graphique de son problème avec éventuellement création de nouveaux blocs pour les problèmes avancés.

La sauvegarde des applications Simulink est un fichier texte d'extension m .

Pour démarrer Simulink, frapper dans la fenêtre de commande :>> Simulink ou bien appuyer sur le bouton Simulink Library de la fenêtre principale de Matlab.

Dès le lancement, Simulink propose dans une fenêtre la bibliothèque des structures prédéfinies usuellement rencontrées, ainsi que les objets graphiques définis dans les Toolbox.

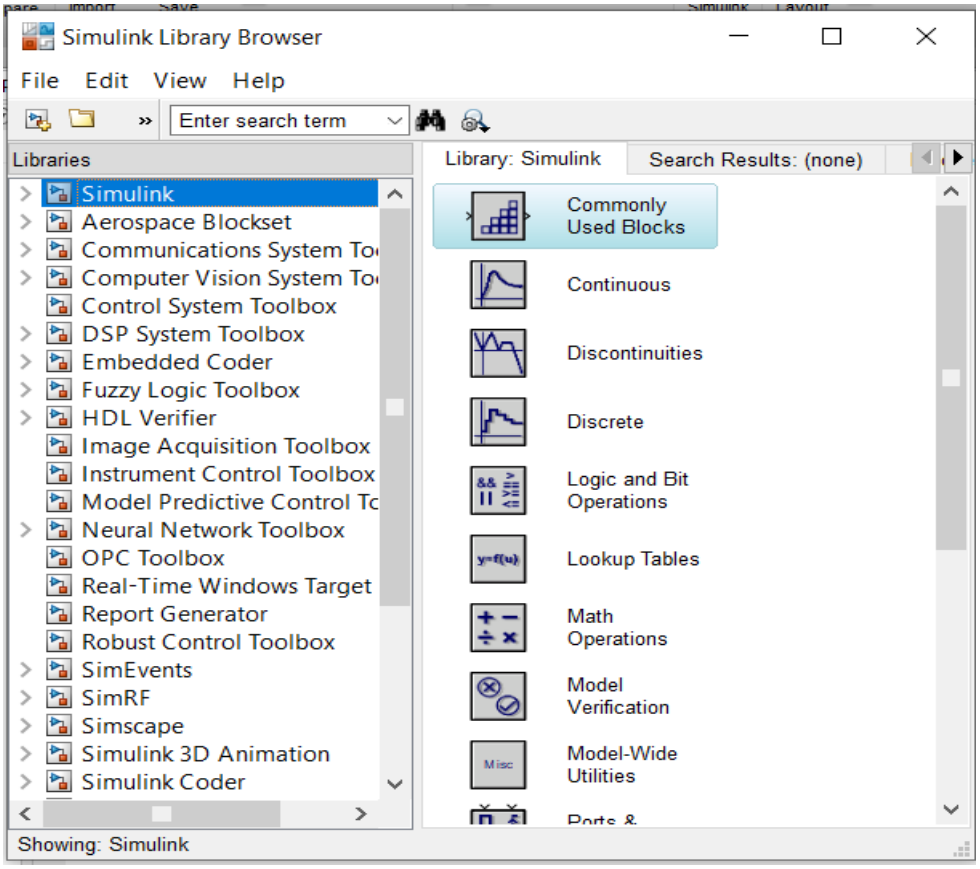


Figure III.2 : la fenêtre Simulink .

III.3.1.4 Version utilisée :

Matlab R2013a (8.1.0.604).

III.4 Description du modèle approuvé :

Cette partie présente l'étude de la configuration proposée, et la détermination des valeurs des paramètres de chaque branche. Cette dernière est réalisée sous MATLAB Simulink, dans une gamme de fréquences variant de 0Hz à 200000Hz.

Le modèle équivalent en π du transformateur en HF à base d'inductance propre et mutuelle contient parfaitement à une étude en haute fréquences, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur (Dans notre cas on va injecter un défaut résistif).

III.4.1 Modèle simplifié en π du transformateur en HF :

Le schéma block de notre model réalisé par logiciel Matlab. Le modèle décrit à la figure III.3 vise à fournir un outil de simulation et d'analyse du comportement du transformateur. Ce modèle est basé sur la réponse fréquentielle de l'impédance du transformateur.

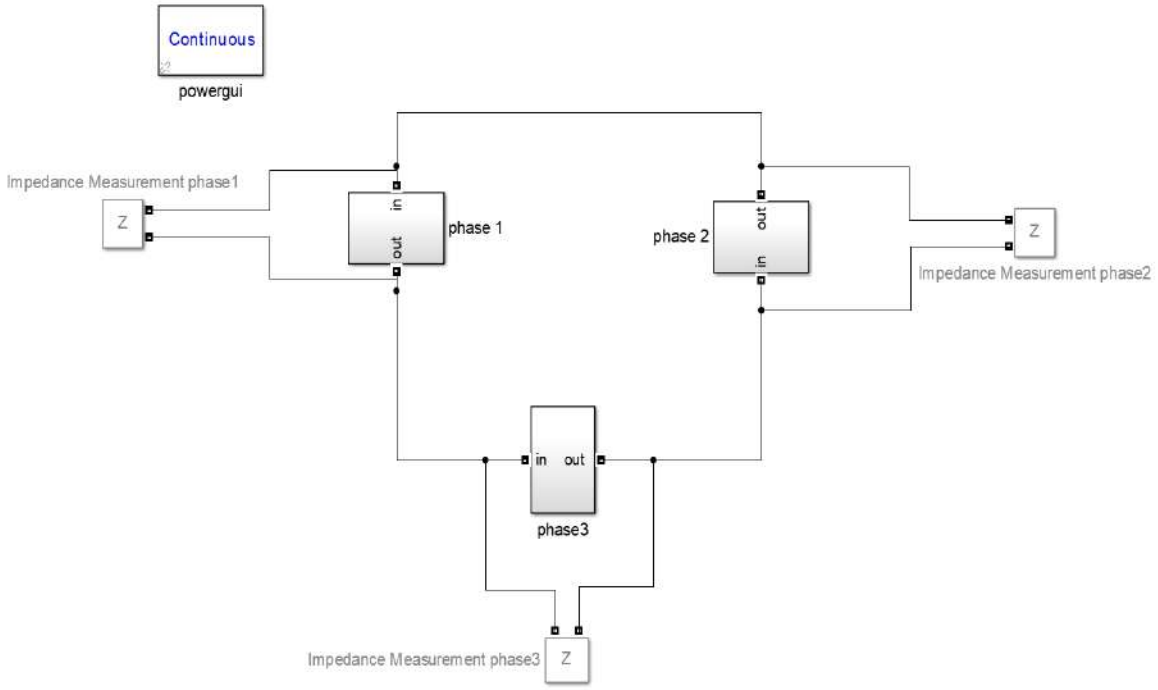


Figure III.3 : Modèle en π simplifié d'un transformateur triphasé.

Le circuit équivalent de chaque phase :

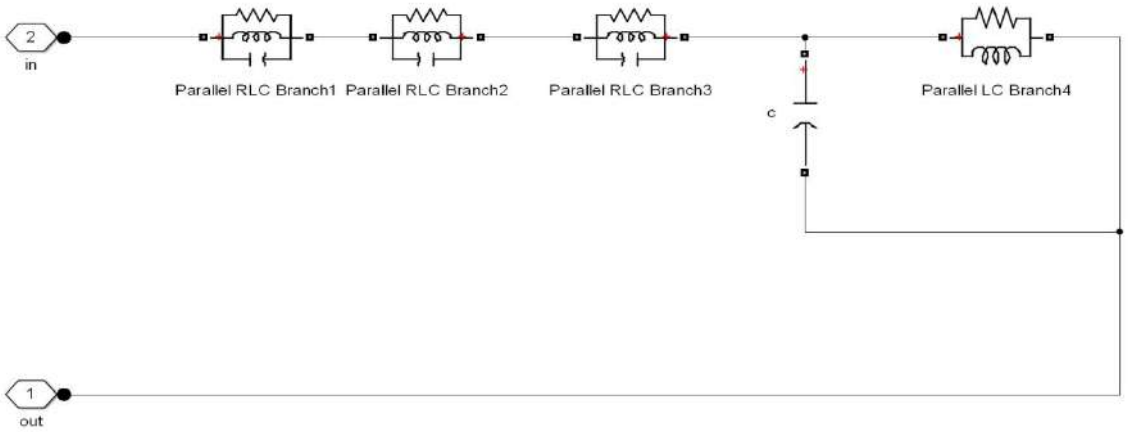


Figure III.4 : Le circuit équivalent de chaque phase.

III.4.2 Méthodologie de calcul des paramètres [31] [32]

➔ Afin de déterminer les paramètres du modèle adopté en HF du transformateur, on propose la méthodologie suivante :

- Une simulation sur chacune des trois phases du transformateur.
- Une estimation des valeurs obtenues.

A l'issue de cette méthode utilisée, un circuit composé de trois cellules RLC en séries en

parallèle avec une autre cellule RL et C est synthétisé dont sa réponse en fréquences et ensuite comparée à la réponse estimée.

- ➔ Les paramètres L_1, L_2 et L_3 représentent les inductances de magnétisation des trois branches RLC en séries telles exprimées par les équations (III.1 - III.3) où R_1, R_2et 3 sont les reluctances magnétiques et N1, N2 et N3 sont les nombres de spires sur chaque enroulement.
- ➔ Les variations des paramètres L_1, L_2 et L_3 peuvent indiquer des aimantations résiduelles, ou des défaillances associées au noyau magnétique.

$$L_1 = \frac{{N_1}^2}{R_1} \quad \text{.....(III.1)}$$

$$L_2 = \frac{{N_2}^2}{R_2} \quad \text{.....(III.2)}$$

$$L_3 = \frac{{N_3}^2}{R_3} \quad \text{.....(III.3)}$$

- ➔ Les pertes fer peuvent être représentées en ajoutant les trois paramètres résistifs R_1, R_2 et R_3 exprimées en (III.4- III.6) où V_1, V_2 et V_3 sont les tensions d'essai et P_{01}, P_{02} et P0W3sont les pertes fer.
- ➔ Des variations dans les paramètres R_1, R_2 et R_3 peuvent indiquer des problèmes associésau noyau magnétique.

$$R_1 = \frac{{V_1}^2}{P_{01}} \text{.....(III.4)}$$

$$R_2 = \frac{{V_2}^2}{P_{02}} \quad \text{.....(III.5)}$$

$$R_3 = \frac{{V_3}^2}{P_{03}} \quad \text{.....(III.6)}$$

- ➔ En fin, le modèle en HF (Fig.III.3) est complété par l'addition des paramètres C représentant la capacité d'enroulement du chacune des branches RLC.
- ➔ Des variations dans les paramètres C1, C2 et C3 peuvent indiquer des problèmes tels quele mouvement global des enroulements.
- ➔ Les paramètres Ra La et Ca telles exprimées par les équations (III.7 – III.9)

$$R_aX = \frac{\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{|Y_{med_i}|^2}\}}{\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{G_i}{|Y_{med_i}|^2}\}} \quad \text{(III.7)}$$

$$L_aX = \frac{(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{|Y_{med_i}\cdot|^2}1)^2-(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{\omega_{i^2}\cdot|Y_{med_i}|^2}1)\cdot(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{\omega_{i^2}}{|Y_{med_i}|^2}1)}{(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{\omega_i\cdot|Y_{med_i}|^2}1)(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{\omega_{i^2}}{|Y_{med_i}|^2}1)-(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{|Y_{med_i}|^2}1)\cdot(\sum_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{S_i\cdot\omega_i}{|Y_{med_i}|^2}1)} \quad \text{(III.8)}$$

$$C_{LV}X = \frac{(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}1\frac{1}{\omega_i\cdot|Y_{med_i}|^2}1)\cdot(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}1\frac{1}{|Y_{med_i}|^2}1)-(.\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{\omega_{i^2}\cdot|Y_{med_i}|^2}1)\cdot(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{S_i\cdot\omega_i}{|Y_{med_i}|^2}\})}{(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}1\frac{1}{|Y_{med_i}|^2}1)^2-(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{1}{\omega_{i^2}|Y_{med_i}|^2}1)(\Sigma_{i=1}^{n_{mflv}}\{\frac{\omega_{i^2}}{|Y_{med_i}|^2}\})} \quad \text{(III.9)}$$

III.4.3 Calcul des impédances Zph1, Zph2 et Zph3 par simulation :

Les effets des impédances Zph1, Zph2 et Zph3 sont mélangés du fait du couplage magnétique lorsqu'une mesure de circuit ouvert de bout en bout est obtenue. Par exemple, l'impédance mesurée Zsiml1 obtenue entre deux bornes de circuit (Figure III.5) est égale à la connexion en parallèle de Zph1et (Zph2 + Zph3). Dans ce cas, une variation de l'impédance Zsiml1 simulée peut être déduite de toute impédance Z ph1, Zph2 ou Zph3, et l'emplacement précis de la phase défaillante n'est pas simple. Le même effet de couplage et le même inconvénient sont présents pour les impédances simulées Zsiml2 et Zsiml3.

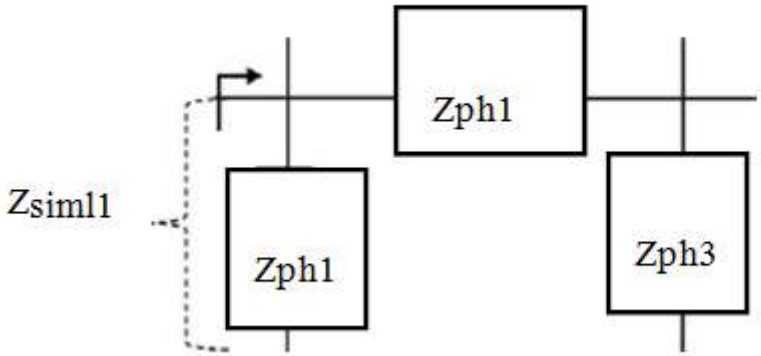


Figure III.5 : Modèle de noyau de transformateur représenté par trois impédances ZU, ZV et ZW contenant les caractéristiques de chaque phase.

III.4.4 Paramètres de simulation *:*

Le tableau.III.1 indique les paramètres de simulation de chaque phase**.**

Tableau III.1 : Paramètres de simulation.

	Phase 1	Phase2	Phase 3
Fréquence (HZ)	[0 200000]	[0 200000]	[0 200000]
Le pas	10	10	10
R1(KΩ)	125.5	124.7	125.1
L1(mH)	0.51817	0.48074	0.50038
C1(nF)	42.22	39.59	40.38
R2(KΩ)	579.016	583.497	578.244
L2(mH)	0.11057	0.11048	0.1256
C2(nF)	4290.4	4267.3	4231.6
R3(KΩ)	579.016	583.497	578.244
L3(mH)	0.11057	0.11048	0.1256
C3(nF)	4290.4	4267.3	4231.6
Ra(KΩ)	1696.652	1700.94	1683.945
La (mH)	0.10204	0.11221	0.11832
Ca (nF)	79494	80023	79537

III.4.5 Simulation de l'impédance Zph1 :

L'impédance Zph1 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.6.

$$Z_{ph1} = Z_1||(Z_2 + Z_3) \quad \text{.....(III.10)}$$

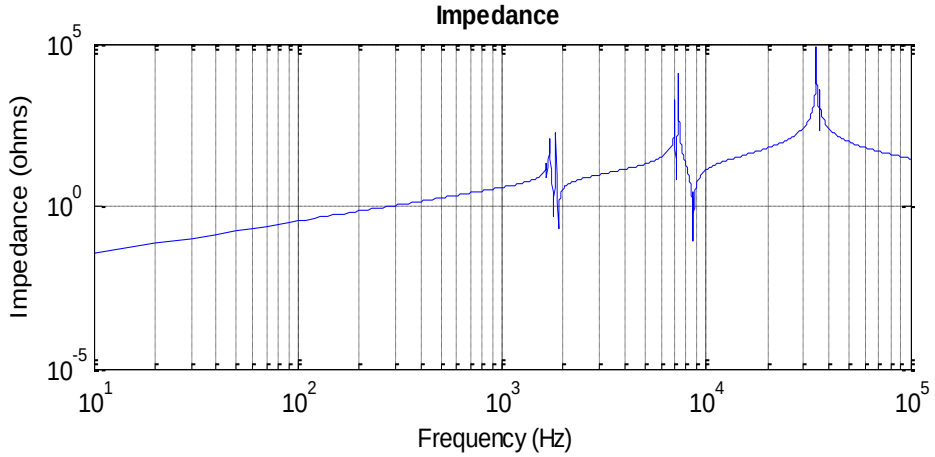


Figure III.6 1: Module d'impédance Zph1 en fonction de la fréquence.

III.4.6 Simulation de l'impédance Zph2 :

L'impédance Zph2 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.7.

$$Z_{ph2} = Z_2||(Z_1 + Z_3) \quad \text{.....(III.11)}$$

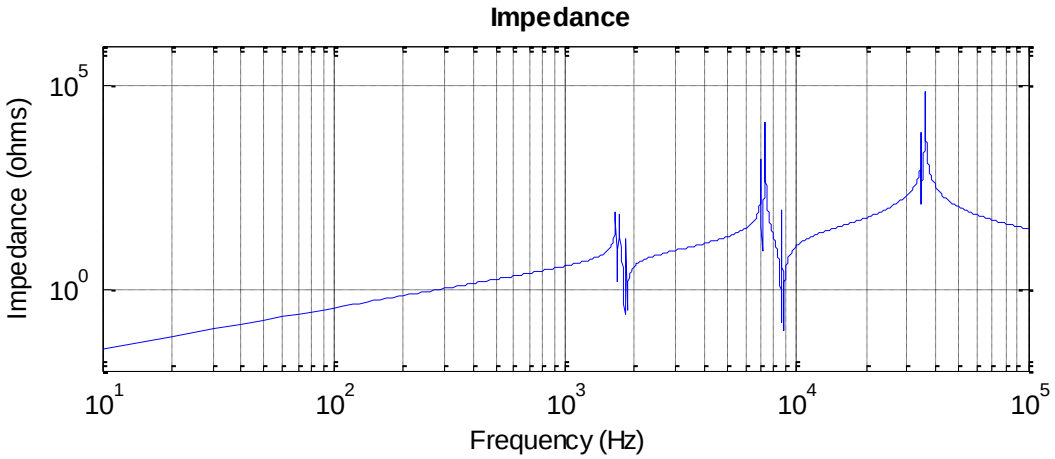


Figure III.7 2: Module d'impédance Zph2 en fonction de la fréquence.

III.4.7 Simulation de l'impédance Zph3 :

L'impédance Zph3 du modèle adopté est effectuée du côté primaire du transformateur comme le montre la figure III.8.

$$Z_{ph3} = Z_3||(Z_1 + Z_2) \quad \text{.....(III.12)}$$

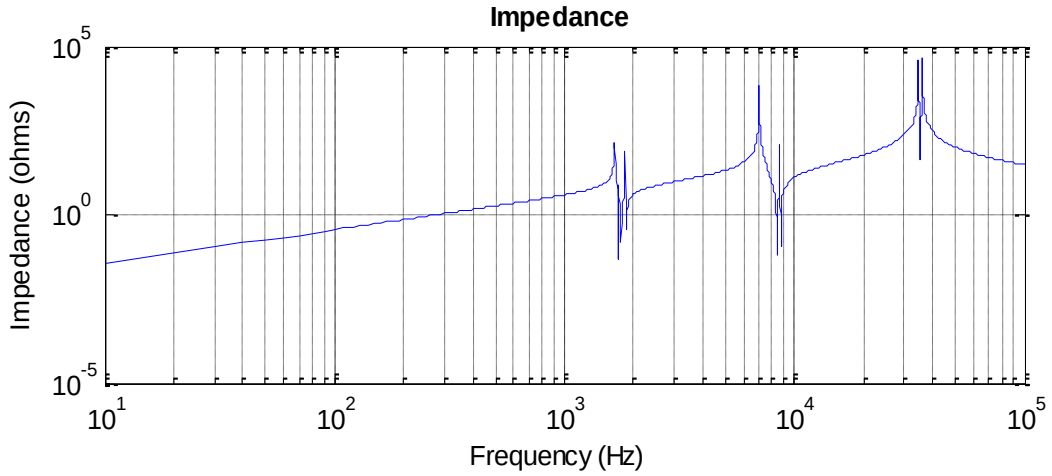


Figure III.8 3: Module d'impédance Zph3 en fonction de la fréquence.

Donc, le système d'équation des impédances Z_{siml1}, Z_{siml2} et Z_{siml3} est donnée par les équations (III.13 – III.15) respectivement.

$$Z_{siml1} = \frac{Z_{ph1}^2+Z_{ph2}^2+Z_{ph3}^2-2*(Z_{ph1}*Z_{ph2}+Z_{ph1}*Z_{ph3}+Z_{ph2}*Z_{ph3})}{2*(Z_{ph1}-Z_{ph2}-Z_{ph3})} \quad \text{.....(III.13)}$$

$$Z_{siml2} = \frac{Z_{ph1}^2+Z_{ph2}^2+Z_{ph3}^2-2*(Z_{ph1}*Z_{ph2}+Z_{ph1}*Z_{ph3}+Z_{ph2}*Z_{ph3})}{2*(Z_{ph2}-Z_{ph1}-Z_{ph3})} \quad \text{.....(III.14)}$$

$$Z_{siml3} = \frac{Z_{ph1}^2+Z_{ph2}^2+Z_{ph3}^2-2*(Z_{ph1}*Z_{ph2}+Z_{ph1}*Z_{ph3}+Z_{ph2}*Z_{ph3})}{2*(Z_{ph3}-Z_{ph1}-Z_{ph2})} \quad \text{.....(III.15)}$$

Les figures (III.9 – III.11), représentent respectivement les modules des impédances Z_{siml1}, Z_{siml2} et Z_{siml3} simulées en fonction de la fréquence à partir des équations (III.13 – III.15).

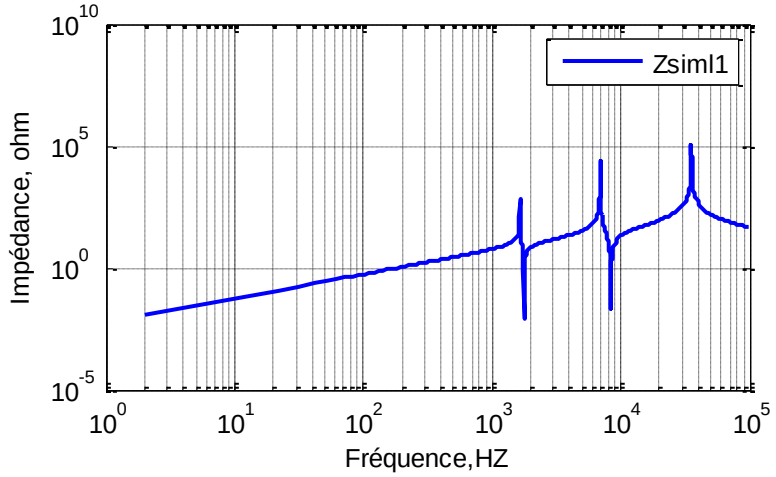


Figure III.9 4 : Module d'impédance Zsiml1 en fonction de la fréquence

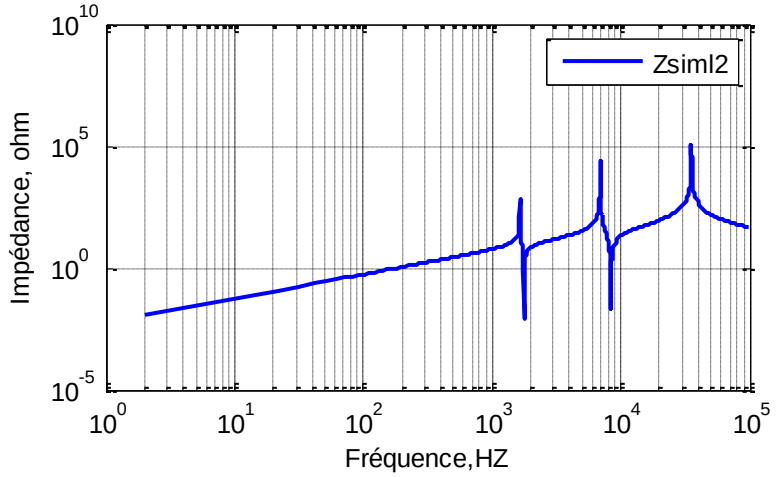


Figure III.10 5 : Module d'impédance Zsiml2 en fonction de la fréquence

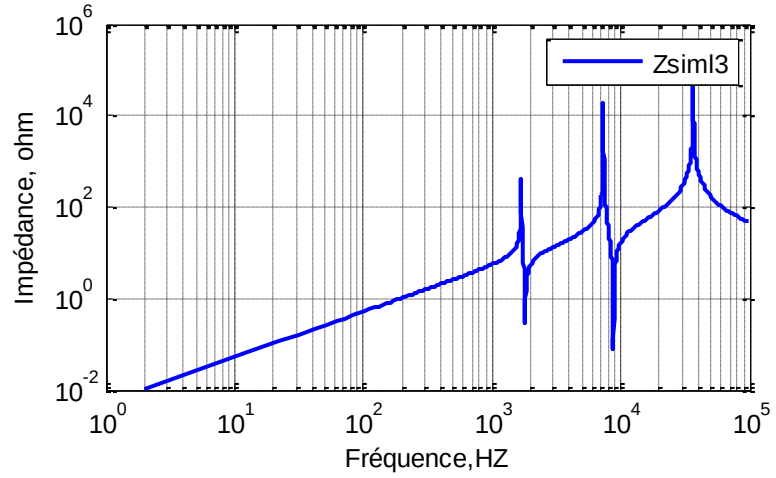


Figure III.11 6 : Module d'impédance Zsiml3 en fonction de la fréquence

Les résultats des réponses **Zsiml** simulées et les réponses **Zestm** estimées en fonction des fréquences obtenues sont représentés sur les figures (III.12 – III.14).

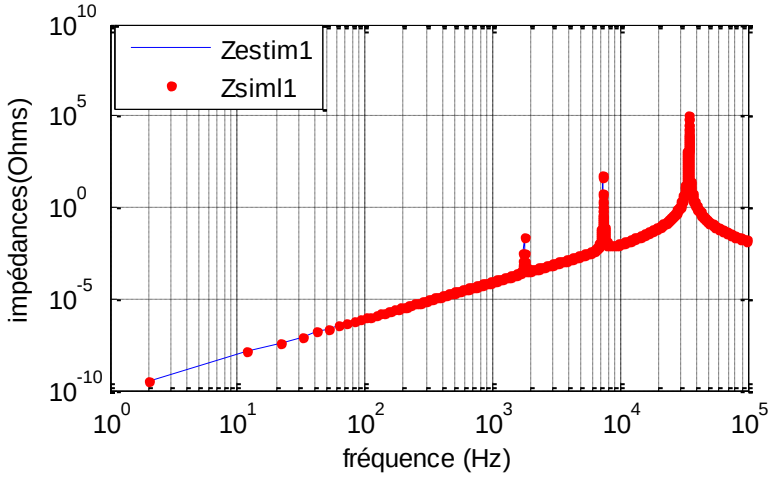


Figure III.12 7 : La courbe de la réponse **Zsiml1** simulée et la réponse **Zestm1** estimée en fonction de la fréquence **.**

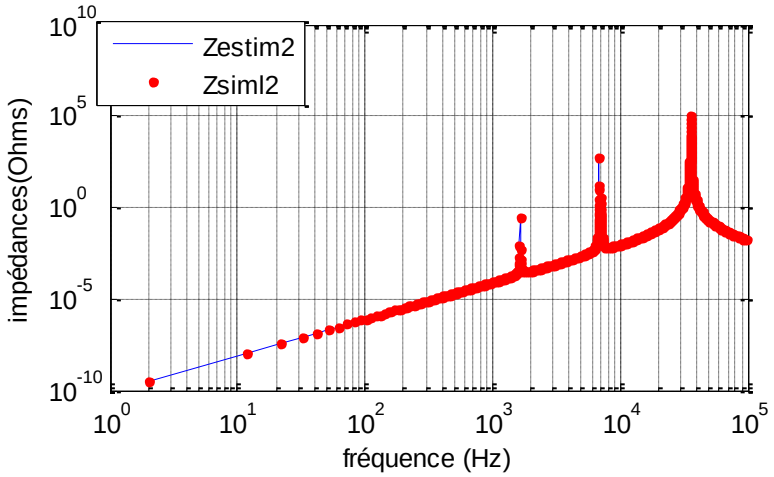


Figure III.13 8 : La courbe de la réponse **Zsiml2** simulée et la réponse **Zestm2** estimée en fonction de la fréquence**.**

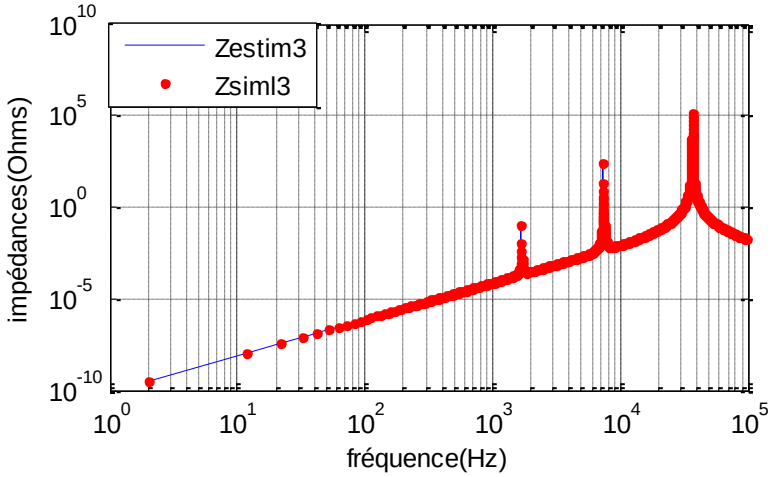


Figure III.14 9 : La courbe de la réponse **Zsiml3** simulée et la réponse **Zestm3** estimée en fonction de la fréquence**.**

III.4.8 Interprétation des résultats :

La comparaison graphique entre les réponses en fréquence estimées et simulées montrées sur les figures (III.12 – III.14) démontre que:

- ✓ Les résultats obtenus par la simulation sont concordants avec ceux obtenus par estimation.

III.5 Classification et localisation des défauts résistifs dans les phases de transformateur :

Après avoir validé notre modèle approuvé de l'enroulement par une comparaison entre les réponses simulées et estimée, dans ce qui suit on procédera à l'introduction de variations paramétriques dans le modèle afin de simuler des différents défauts résistifs qui peuvent avoir lieu dans l'enroulement réel.

III.5.1 Classification des défauts

Classification d'un défaut est un système organisé et hiérarchisé de différentes catégorisations afin de déterminer l'endroit du défaut afin de réparer le plus rapidement possible ces défauts et rendre le service d'alimentation aux clients [33].

III.5.2 Localisation des défauts

D'une manière générale, la localisation d'un défaut consiste en la détermination de sa position géographique. Ce mot peut aussi faire référence à l'adaptation d'un défaut pour une région particulière [34].

La localisation des défauts peut permettre :

- Soit de réaliser une localisation de la zone en défaut
- Soit de calculer de façon la plus précise possible, la distance entre le défaut et un point de référence.

III.5.3 Défaut résistif

Un défaut résistif est traduit par des augmentations de la résistance du noyau de chacune des phases ; l'augmentation de cette résistance peut être expliquée par l'augmentation de température du noyau magnétique suite à une surcharge ou/et à la circulation des courants harmoniques dans les phases du transformateur.[35]

$$R_T = R_0 + \alpha \Delta T \quad \text{.....(III.16)}$$

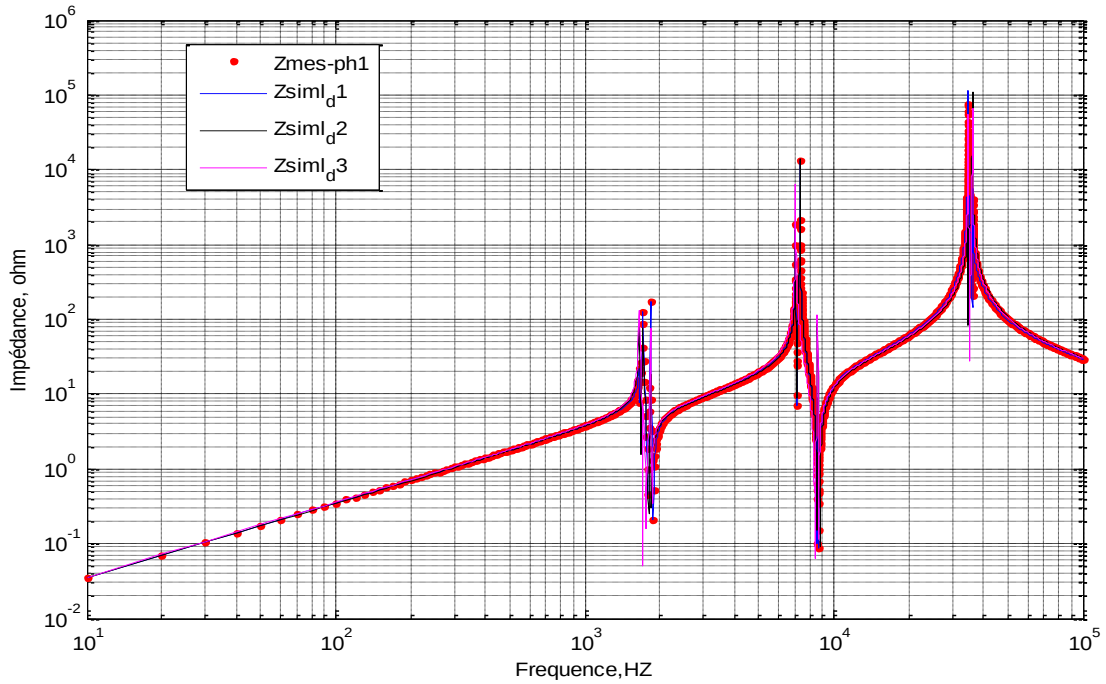
R_T: Résistance en fonction de la température $[\Omega] R_0$: Résistance sain $[\Omega]$

α: Facteur de dilatation thermique $[K^{-1}]$

ΔT: Variation de la température [C]

III.5.4 Comparaison des réponses fréquentielles en cas du défaut résistif :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement sain par rapport à celles des défauts résistifs injectés sur le côté primaire du transformateur étudié est illustrée sur les figures (III.15-III.17).



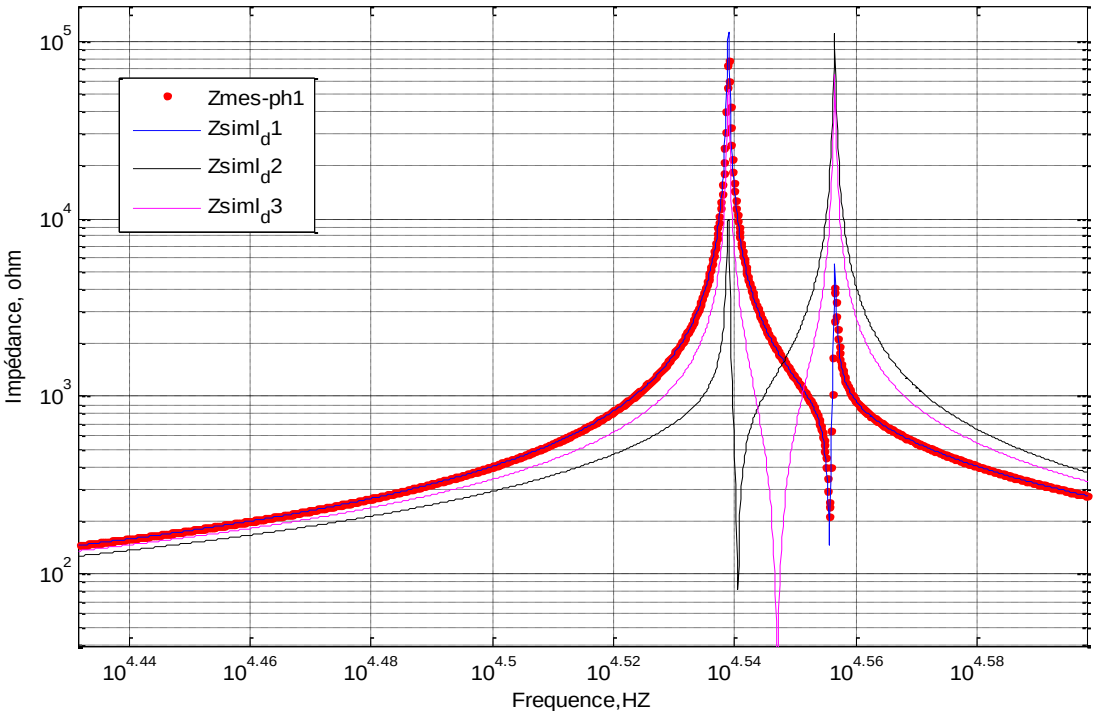
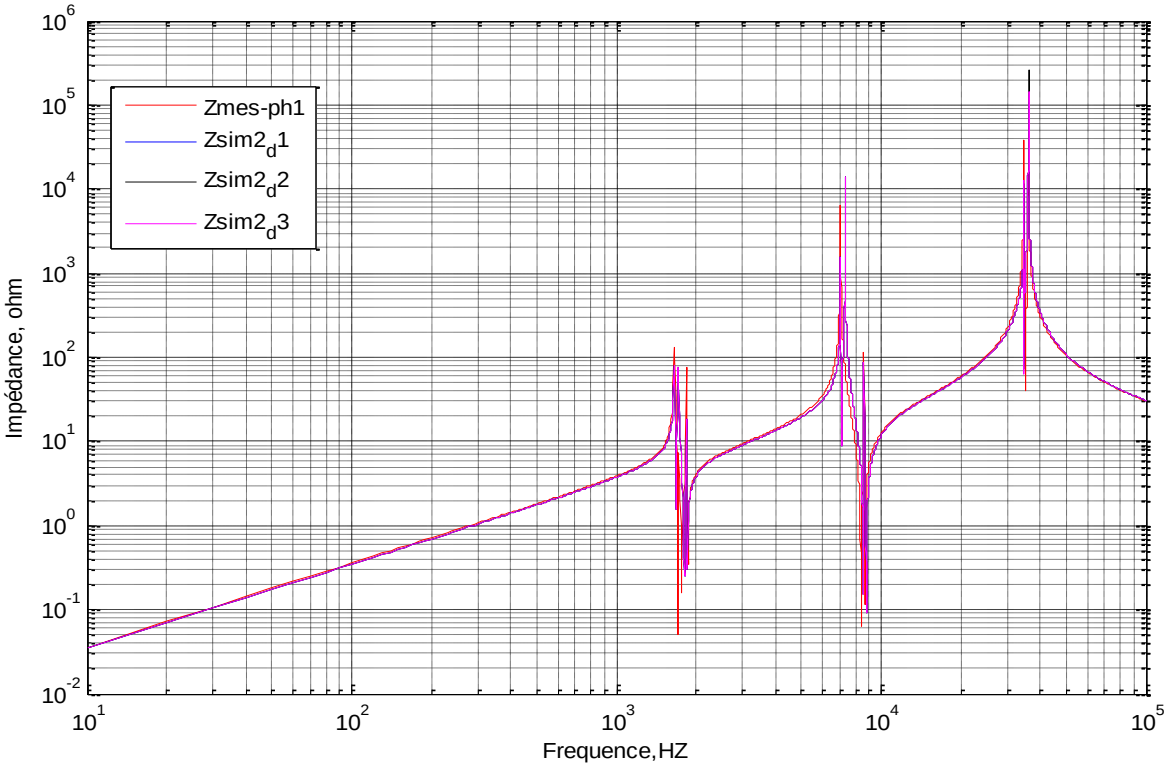


Figure III.15 10 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 1 et d'un enroulement sain



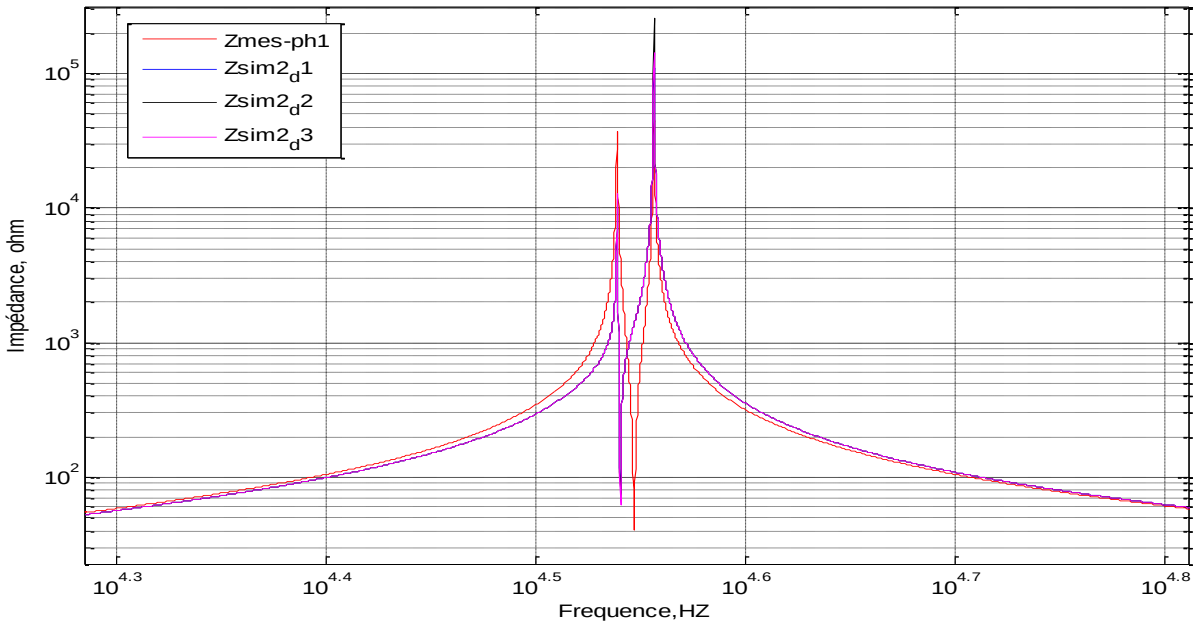
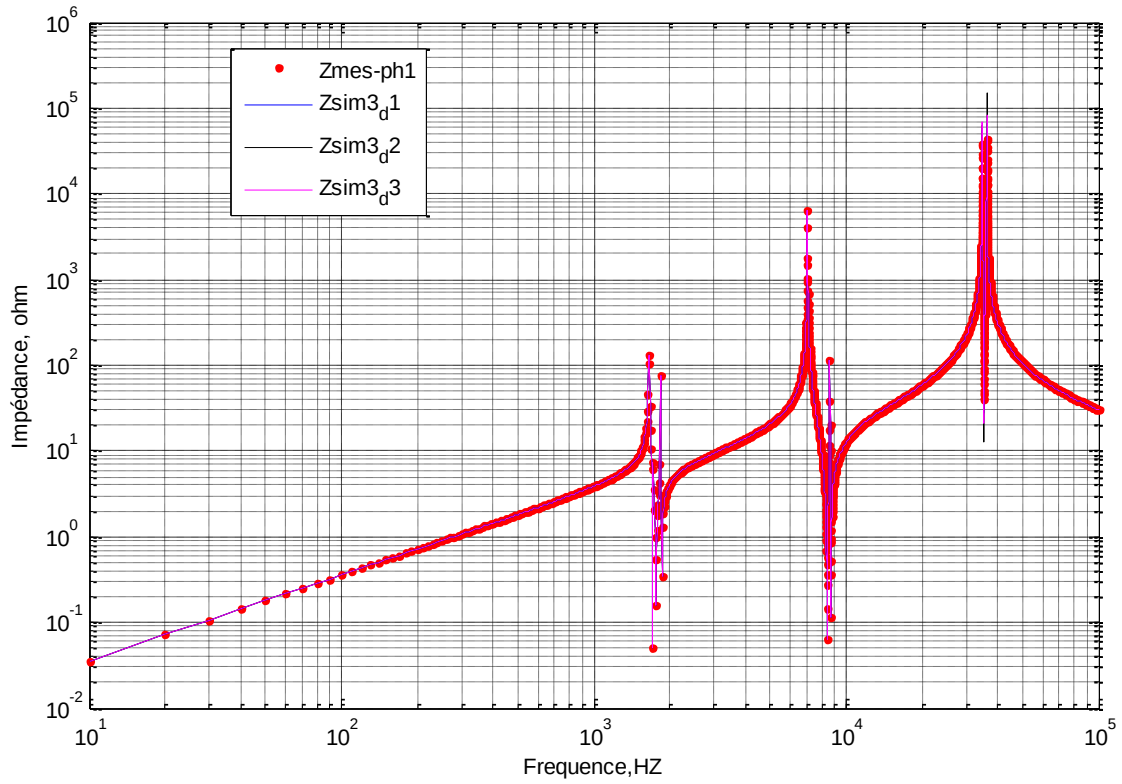


Figure III.1611 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 2 et d'un enroulement sain **.**



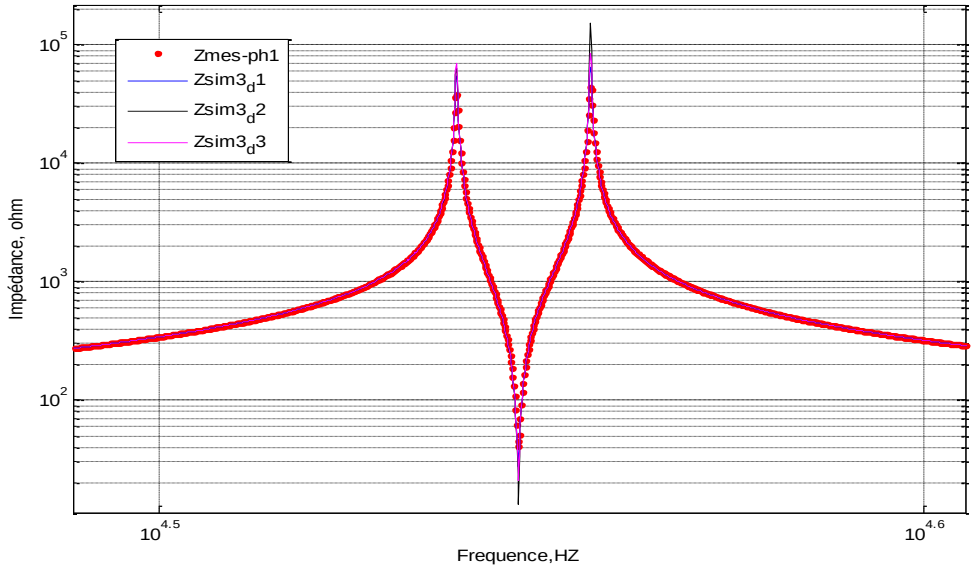


Figure III.1712 : Comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement présentant un défaut résistif dans la phase 3 et d'un enroulement sain **.**

III.5.5 Résultats et discussions :

Les tableaux (III.2- III.4) indiquent le degré des défauts résistifs en injectant un défaut résistif sur le côté primaire du transformateur triphasé étudié.

Les défauts résistifs sont simulés par une augmentation de la résistance dans une plage de 1.5 R_{sain} , 1.7 R_{sain} et 2 R_{sain}.

Tableau III.2 : Degré des défauts résistifs par une augmentation d'une résistance dans de 1.5 R_{sain}

	Phases1	Phases2	Phases3
Rd1(KΩ)	188.25	187.05	187.65
Rd2(KΩ)	868.524	875.2455	867.366
Rd3(KΩ)	868.524	875.2455	867.366
Rda(KΩ)	2544.978	2551.41	2525.9175

Tableau III.3: Degré des défauts résistifs par une augmentation d'une résistance dans de 1.7 R_{sain}

	Phases1	Phases2	Phases3
Rd1(KΩ)	213.35	211.99	212.67
Rd2(KΩ)	984.327	991.9449	983.0148
Rd3(KΩ)	984.327	991.9449	983.0148
Rda(KΩ)	2884.3084	2891.598	2862.7065

Tableau III.4 : Degré des défauts résistifs par une augmentation d'une résistance dans de 2 R_{sain}

	Phases1	Phases2	Phases3
Rd1(KΩ)	251	249.4	250.2
Rd2(KΩ)	1158.032	1166.994	1156.488
Rd3(KΩ)	1158.032	1166.994	1156.488
Rda(KΩ)	3393.304	3401.88	3367.89

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a effectué une méthodologie pour obtenir les paramètres d'un modèle de base, du transformateur triphasé en haute fréquence basé sur les données de sa réponse fréquentielle.

D'après l'étude menée les points suivants sont retenus :

- L'enroulement du transformateur peut être représenté en haute fréquence par un circuit composé de trois cellules RLC en séries en parallèle avec une autre cellule RL et C est synthétisé dont sa réponse en fréquence.
- Les résultats obtenus par simulation en utilisant deux méthodes sont concordants.
- Tout défauts résistifs apparus dans l'enroulement est traduit par une variation de sa réponse fréquentielle ce qui rend cette dernier un outil important pour le diagnostic.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail est consacré à l'analyse de la réponse du gain en fréquence des enroulements d'un transformateur de puissance en vue de son diagnostic.

Nous avons présenté l'intérêt des informations que peut apporter l'utilisation des techniques de diagnostic dans les transformateurs de puissance, en termes de réduction de la probabilité de défaillance ou de dégradation du service et d'amélioration de l'espérance de vie du transformateur.

Plusieurs modèles de transformateurs sont également développés ainsi que la méthode de diagnostic utilisée, laquelle est basée sur la technique d'analyse fréquentielle FRA.

Le modèle le plus approprié pour notre recherche est le modèle équivalent en π du transformateur en HF à base d'inductance propre et mutuelle, pour sa simplicité d'une part et d'autre part pour il contient parfaitement à une étude en haute fréquences, exploité pour l'étude des différentes défaillances des enroulements de ce transformateur.

Ce modèle permettra de modéliser de gros transformateurs et d'étudier leur comportement interne (la répartition de la tension le long des enroulements, Gradient de tension, fréquence de résonance, etc.). Cependant, il est important de trouver un bon programme permettra de calculer les paramètres du modèle afin d'avoir une bonne précision du résultat.

Notre étude de modélisation et de simulation a été réalisée sous logiciel Matlab.

Nous avons injecté des défauts résistifs dans le model approprié de transformateur.

En résumé, le modèle obtenu présente des avantages importants en matière de diagnostic de défaillances des enroulements du transformateur en haute fréquence.

Comme perspectives, pour ce travail, on propose :

- Utilisation du modèle adopté pour un transformateur de puissance industriel.
- Une analyse détaillée et un calcul plus affiné des paramètres des éléments des modèles équivalents du transformateur en HF, en tenant compte de la variation paramétrique en fonction de la fréquence et de la température par exemple.

Références bibliographiques

[1] A. Bourgeois, « Etude du phénomène d'électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance », PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2007.

[2] B. Multon, « Modèles électriques du transformateur électromagnétique », *Rev. 3 E I*, p. pp.31-36, déc. 1997

[3] R.MERLET, « Technologie d'électricité générale et professionnelle », édition Dunond Paris, 1969.

[3] A.LEFEVRE, « contribution a la modélisation électrique, électromagnétique et thermiques des transformateurs », Ecole polytechnique de Nantes, 2006.
[4] M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI, « Machines électriques : Tome I », , édition MIR, MOSCOU 1976.
[5] Jean Sanchez. Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance. Autre.
Université Grenoble Alpes, 2011.

[6] « Document_technique_Les_transformateurs_triphases.pdf ».

[7]BERNARD HOCHART «Transformateurs de puissance »

[8]LOUNIS AZIZ et GILBERT SYBILLE «Impact du changement de l épaisseur de la tôle magnétique sur le dimensionnement d'un transformateurs » Mémoire master 2 UMMTO. PROMOTION 2013

[9]BELKACEMILAMIA et BOUABDELLAH DEHBIA. «Influence des resistances des enroulements du transformateurs sur les surtension ».

Mémoire d ingenieur UMMTO ,promotion 2009

[10]: C. Andrieu, E. Dauphant D. Boss, ≪ A Frequency-Dependant Model For a MV/LV Transformer≫ International Conference on Power Systems Transients (IPST), Budapest, Hungary, June 20-24, 1999.

[11]: B. Gustavsen, A. Semlyen. ≪ Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients ≫. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.

[12]: T. Noda, H. Nakamoto, S. Yokoyama, ≪Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.

[13]: Xose M. L.F and Casimiro A.M. « Computation method for transients in power transformer with lossy windings » IEEE Transactions on Magnetics, Vol. N.3, March 2009, pp 1863-1866.

[14] : LEFEVRE.A, «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs », Ecole Polytechnique de Nantes, 1998.

[15] : Ahmad AHMAD, : «Contribution a la modélisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute fréquence » Thèse de doctorat, L'ECOLE CENTRALE
DE LYON, 1992. Analysis Transformer Applications A Technical Paper from Doble Engineering' Version 1.0, 01/2003.

[**16]: Charles Sweeter, B.Sc., M.Sc. Dr. Tony McGrail,** 'Sweep Frequency Response

[17] : OMICRON electronics [« FR Analyzer Manuel d'utilisation »Référence -VESD0662 Version du manuel : FRA.FR.1, 2006.

[18] :M.jose Ignacio ANGUS GOMES, Mlle Ana AZNAR BLANES « Technique de diagnostic des transformateurs de puissance », Formation sur le diagnostic des transformateurs, Ayant lieu à EL-HAMMA, Du 27/10 au 29/10/2007.

[19] :**H.Houassine** « Etude des surtensions dans les blocs alternateur-transformateurs des centrales électriques », Thèse de Doctorat, Département Génie électrique, Université de Tizi-Ouzou 2010.

[20]: M.J. Manyahi, M. Leijon, R. Thouttappillil, Transient response of transformer with XPLE insulation cable winding design. , Electrical power & energy systems, Vol 27 pp. 69- 80, 2005.

[21] L. Bouchaoui, K. E. Hemsas, S. Belahneche, « Diagnostic des Transformateurs de Puissance par l'Analyse de la Réponse Fréquentielle (FRA) *LAS, Université Ferhat Abbas, Sétif Laboratoire d'Analyse Régionale - Sonelgaz- GRTE – SETIF ».

[22] OMICRON electronics, « « FR Analyzer Manuel d'utilisation » Référence -VESD0662 Version du manuel : FRA.FR.1, 2006. »

[23] H. Houassine, « Etudes des surtensions dans les blocs alternateur-transformateurs des centrales électriques », PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri, 2010.

[24] : S. Boudraa «Analyse de gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.

[25] :M.jose Ignacio ANGUS GOMES, Mlle Ana AZNAR BLANES « Technique de diagnostic des transformateurs de puissance », Formation sur le diagnostic des transformateurs, Ayant lieu à EL-HAMMA, Du 27/10 au 29/10/2007.

[26] HENNEBIQUE L, FLUERASU C, "RESEL: programme conversationnel pour l'analyse des régimes transitoires dans les réseaux électriques", EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, Série B, N°l, 1987, pp. 25-33.

[27] A. Rakotomalala, « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régimes hautes fréquences », PhD Thesis, Ecully, Ecole centrale de Lyon, 1996.

[28] A. Morched, L. Marti, et J. Ottevangers, « A high frequency transformer model for the EMTP », IEEE Trans. Power Deliv., vol. 8, no 3, p. 1615–1626, 1993.

[29] Dommel, H.W., « Electromagnetic Transients Program: Reference Manual:(EMTP theory book). 1986: Bonneville Power Administration. »

[30] : Andrianirina RAKOTOMALALA, « contribution a la modélisation des transformateurs De puissance en régime haute fréquence » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Le 27 octobre 2006

[31] R. C. Guimarães, « Modelo elétrico da impedância do transformador baseado em células RLC passivas », 2010.

[32] C. González García, « Procedimiento de Modelado basado en el Análisis de la Respuesta en Frecuencia y aplicación en Transformadores Trifásicos de Potencia para su Caracterización y Diagnóstico », 2012.

Références bibliographiques

[33] Sandro Gianny Aquiles Perez, « “Modeling relays for power system protection studies” PhD. Dissertation July 2006, University of Saskatchewan, Canada ».

[34] Fatima Zahra, « Artificial neural network approach to transmission line relaying, Master of science September 1998, Memorial University of Newfoundland, Canada ».

[35] Abdi Sif eldine, « Modélisation et diagnostic des défaillances dans les enroulements d’un transformateur triphasé ».