

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Projet de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme De

« MASTER ACADEMIQUE »

Spécialité : Electromécanique

Thème

**Modélisation en HF d'un transformateur triphasé
en vue de son diagnostic**

Préparé et présenté par :

M. LARFI ABD EL FETTEH

M. KORICHI ABD SALAM

Proposé et dirigé par :

Dr. HOUASSINE HAMZA

Année Universitaire : 2017/2018

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à,

Mes très chers parents pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu les gardes.

- ❖ A mon promoteur dr. H.HOUASSINE et mon binôme Larfi Abd Elfetteh .*
- ❖ A mes très chers frère Sofiane, Mohamed, Abd Elmoniim, Fares*
- ❖ A mes sœurs Asma, Fatima El Zahraa,*
- ❖ A mon porte bonheur ma petite Rihame et son père Ibrahim*
- ❖ A mes chers amis Alilou, Said, Othmane*
- ❖ A toute ma famille de près ou de loin sans exception.*
- ❖ A mes chers amis de mon quartier.*
- ❖ A toute mes chers amis de l'université de BOUIRA.*
- ❖ A tout les promotions 2016-2017, 2017-2018 électromécanique sans exception.*
- ❖ Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment .*

Abdeslam korichi

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à,

Mes très chers parents pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu les gardes.

❖ *A mon promoteur dr. H.HOUASSINE et mon binôme Larfi Abd Elfetteh .*

❖ *A mes très chers frère Sofiane, Mohamed, Abd Elmoniim, Fares*

❖ *A mes sœurs Asma, Fatima El Zahraa,*

❖ *A mon porte bonheur ma petite Rihame et son père Ibrahim*

❖ *A mes chers amis Alilou, Said, Othmane*

❖ *A toute ma famille de près ou de loin sans exception.*

❖ *A mes chers amis de mon quartier.*

❖ *A toute mes chers amis de l'université de BOUIRA.*

❖ *A tout les promotions 2016-2017, 2017-2018 électromécanique sans exception.*

❖ *Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment .*

Abdeslam korichi

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que J'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l'accomplissement de cette thèse.

*Nous adressons de chaleureux remerciements à notre encadreur **Dr. HOUASSINE***

***Hamza**, Docteur à l'université **Akil Mhand Oulhaj** de **BOUIRA** pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail, et Mr **.Sahnoune chaouche moustafa** nous les remercies encore pour son aide si précieuse sur les plans conseils et orientations.*

Nous remercions les membres du jury pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelles perspectives.

*Nous tenons à présenter nos vifs remerciements au **Dr BENS Aid** Samir et au membre du laboratoire de recherche Laboratoire des Matériaux et Développement Durable (**LMDD**) a la faculté **FSSA** de l'université **BOUIRA** de disposition pour faire aboutir ce travail.*

*Nous remercions également tous les enseignants de département génie électrique de **Akil Mhand Oulhaj** de **BOUIRA** qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.*

Enfin, nous ne pouvons oublier de remercier nos familles pour leur soutien au cours de ces Cinq années et sans lesquelles nous n'en serais pas là

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que J'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je necessitais pour l'accomplissement de cette thèse.

*Nous adressons de chaleureux remerciements à notre encadreur **Dr. HOUASSINE***

***Hamza**, Docteur à l'université **Akil Mhand Oulhaj de BOUIRA** pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail, et Mr **.Sahnoune chaouche moustafa** nous les remercies encore pour son aide si précieuse sur les plans conseils et orientations.*

Nous remercions les membres du jury pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelles perspectives.

*Nous tenons à présenter nos vifs remerciements au **Dr BENSAID** Samir et au membre du laboratoire de recherche Laboratoire des Matériaux et Développement Durable (**LMDD**) a la faculté **FSSA** de l'université **BOUIRA** de disposition pour faire aboutir ce travail.*

*Nous remercions également tous les enseignants de département génie électrique de **Akil Mhand Oulhaj de BOUIRA** qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.*

Enfin, nous ne pouvons oublier de remercier nos familles pour leur soutien au cours de ces Cinq années et sans lesquelles nous n'en serais pas là

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes et abréviations

Introduction générale.....01

Chapitre I :

Généralité sur le transformateur triphasé et son diagnostic

I.1 Introduction :	03
I.1.1 Définition :	03
I.2 Différents types des transformateurs :	05
I.2.1. Transformateurs émergés :	05
I.2.2. Transformateurs secs :	06
I.3. Constitution :	06
I.3.1. Circuit magnétique :	06
I.3.2. Système d'isolation et protection :	07
I.3.2.1. La cuve :	08
I.3.2.2. Les tubes de refroidissement :	08
I.3.2.3. Les enroulements :	08
I.3.2.3. Traversées :	09
I.4. Principe de fonctionnement :	09
I.5. Mode de couplage :	11
I.5.1. Choix du couplage :	12
I.6. Les défauts :	13
I.6.1 Les défauts diélectrique :	13
I.6.2 Les défauts électriques :	14
I.6.3 Les surintensités :	14
I.6.4 Le court-circuit :	15
I.6.5 Les défauts électromagnétique :	15
I.6.6 Les défauts mécanique :	15
I.6.7 L'échauffement :	16
I.7. Méthodes de diagnostic des transformateurs :	16
I.7.1. Analyse d'huile :	16
I.7.2. Les méthodes des mesures de diagnostic :	17
I.8. Conclusion :	21

Chapitre II :
modélisation du transformateur et analyse FRA

- II.1 Introduction :.....22**
- II.2 Modélisation en 50 Hz : 22**
- II.3 modélisation en haute fréquence : 23**
 - II.3.1 Modèle de RESEL :.....23**
 - II.3.2 Modèle d’EMTP :.....24**
 - II.3.3 Modélisation par inductances de fuite :.....26**
 - II.3.4 Modélisation par la théorie de lignes :26**
 - II.3.5 Modélisation par des circuits ou des transformées :.....28**
- II.4 modèle adopté pour la FRA : 29**
 - II.4.1 Modélisation par inductances propres et mutuelles :.....29**
 - II.4.2 Intérêt de ce modèle :.....30**
 - II.4.3 Inconvénients de ce modèle :30**
- II.5 L’analyse de la réponse en fréquence (FRA) :.....31**
 - II.5.1 Définition : 31**
 - II.5.2 Buts de la FRA : 31**
 - II.5.3 Utilisation des tests FRA : 31**
 - II.5.4 Détection de défaut par FRA: 32**
 - II.5.5 Principe de la méthode : 32**
 - II.5.6 Fonction de transfert d’un transformateur de puissance : 34**
- II.6 Conclusion :..... 35**

Chapitre III :

Diagnostic des défauts dans le transformateur : Modélisation, Test et Validation

III.1.Introduction :	36
III.2.Méthodologie :	36
III.3.Théorie fondamentale :	40
III.3.1.Circuit RLC parallèle :	40
III.3.2.Outil de calcul:	42
III.4.Essais expérimentaux et calculs des paramètres du modèle adopté :	44
III.4.1 Calcul des éléments des cellules RLC :	46
III.4.2 La pulsation de résonance et les pulsations de demi-puissance (supérieur et inférieur) :	48
III.4.3. Calcule la bande passante et le facteur de qualité :	48
III.4.4. Calcule des cellules R, L, C :	49
III.5.Résultats de calcul de tout les phases dans tout les essais:	51
III.5.1.Interprétation :	56
III.6.Conclusion :	56
conclusion générale:	56

Liste des figures

Chapitre I:

Figure(I.1): Trois transformateurs monophasés identiques	03
Figure(I.2): Transformateur triphasé (flux forcés $\vec{\Phi}_A + \vec{\Phi}_B + \vec{\Phi}_C = \vec{0}$).....	03
Figure(I.3): Transformateurs triphasé de type émergé.....	04
Figure (I.4): Transformateurs triphasé de types secs.....	05
Figure(I.5): Disposition des enroulements autour du noyau.....	06
Figure(I.6): Coupe d'un transformateur triphasé.....	06
Figure(I.7): enroulement en couche.....	07
Figure(I.8) : enroulement en galettes.....	07
Figure(I.9) : Traversée condensateur haute tension.....	08
Figure(I.10): schéma simplifié d'un transformateur.....	09
Figure(I.11): Couplage de primaire.....	10
Figure(I.12): Couplage de secondaire.....	10
Figure(I.13) : Explosion de transformateur.....	12
Figure(I.14) : Amorçage franc entre spires	13
Figure(I.15): Echauffement excessif d'un enroulement.....	13
Figure(I.16): Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM).....	14
Figure(I.17): Déformation mécanique d'un enroulement.....	14

Chapitre II:

Figure(II.1): Modèle d'une phase du transformateur en basse fréquence	20
Figure(II.2): Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP	22
Figure(II.3): Principe de la M2C découpage en éléments inducteurs	23
Figure (II.4): Schéma électrique équivalent de la M2C	24
Figure(II.5): Schéma équivalent d'un enroulement	25
Figure(II.6): Modélisation du transformateur par une ligne Z impédance caractéristique, T temps de propagation, D facteur d'amortissement	26
Figure(II.7): L'application est faite sans comparaison avec la mesure	26
Figure(II.8) : modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié	27
Figure(II.9) : Modèle d'un enroulement de transformateur	31
Figure(II.10): Principe de la FRA	32

Chapitre III :

Figure(III.1): Module de comportement de l'impédance d'un circuit RLC parallèle en fonction de la fréquence.....	36
Figure(III.2) : modèle classique électrique de transformateur.....	37
Figure(III.3) : Comportement du module d'impédance d'un transformateur réel.....	38
Figure(III.4) : Modèle proposé dans le domaine fréquentiel composé par cellules RLC.....	39
Figure(III.5) : la courbe de module d'impédance mesurée en fonction de la fréquence.....	39
Figure(III.6) : Circuit parallèle RLC.....	40
Figure (III.7) : organigramme visé a calculer les paramètre de modèle proposée.....	43
Figure(III.8): Banc d'essai Expérimental.....	44
Figure(III.9) : graphe de l'impédance en fonction de fréquence.....	46
Figure(III.10) : graphe de point de résonance de l'impédance en fonction de fréquence.....	46
Figure(III.11) : le modèle dans Matlab simulink.....	47
Figure (III.12) : l'impédance et phase en fonction de fréquence de phase U secondaire en court-circuit.....	47
Figure(III.13) : les impédances des les trois phases en fonction de la fréquence	49
Figure(III.14) : les impédances des trois phases en fonction de fréquence.....	50
Figure (III.15) : les impédances des trois phases en fonction de fréquence.....	50
Figure(III.16) : l'impédance de phase U en fonction de fréquence.....	55
Figure(III.17) : les impédances dans les trois phases secondaire court circuit.....	55

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau (I.1) : représentations symboliques des couplages.....12

Tableau (I.2) : les défauts trouvés dans le transformateur triphasé et leur méthode de diagnostic. 20

Chapitre III :

Tableau (III .1) : pulsation de résonance et les pulsations de demi-puissance.....48

Tableau (III .2) : les valeurs de la bande passante B et du facteur de qualité Q48

Tableau (III.3) : R, L C des cellules.....49

Tableau(III.4) : les pulsations de résonance.....51

Tableau(III.5) : pulsation demi puissance.....52

Tableau(III.6) : les valeurs de bande passante et facteur de qualité53

Tableau (III.7) : R, L, C des les trois phases dans tout les essais.....54

Listes des acronymes et abréviations

A: Ampère

a : rapport de transformation

α : Constant de distribution initiale de la tension

B: bande passante

C: capacité

C_{eq} : La capacité équivalente

C_{geff} : La capacité au sol

C_S : Capacité longitudinale

C_g : Capacité transversale

[C]: Matrice des capacités

F: Farad

f: Fréquence

f_0 : fréquence de résonance

FEM : force électromotrice

FRA: Frequency Response Analysis

H: Henry

I_{in} : Courant d'entrée

I_p : Courant dans l'enroulement primaire

I_s : Courant dans l'enroulement secondaire

I_0 : Le courant appliqué à l'entrée

kHz: Kilo Hertz

kV: Kilo Volt

L: Inductance

[L] : Matrice des inductances

L_{eq} : L'inductance équivalente

L_m : Inductance de magnétisation de transformateur

L_p : Inductance de perte dans l'enroulement primaire

L_s : Les inductances propres

L_f : inductance de fuite

M : Les inductances mutuelles

M2C : methodes des circuit couplés
MHz: Méga Hertz
N : Nombre des cellules
Q: facteur de qualité
R: résistance électrique
rad/s: radian par second
RLC: Resistance-Inductance-Capacité
 r_g : La résistance interne de générateur
 R_m : Résistance de magnétisation
 R_p : Résistance électrique de l'enroulement primaire
 R_s : Résistance électrique de l'enroulement secondaire
 R_f : resistance de fuite
S: Siemens
Scdcc : secondaire en court-circuit
scdccMT : secondaire en court-circuit mis a la terre
scdO : secondaire en circuit ouvert
 U_0 : La tension applique à l'entré
 V_{out} : Tension de sortie
 V_p : Tension de l'enroulement primaire
 V_s : Tension de l'enroulement secondaire
 X_m : Réactance de magnétisation
 X_p : Reactance de perte de l'enroulement primaire
 X_s : Réactance de perte de l'enroulement secondaire
Y: admittance
Z: Impédance
 Z_p : Impédance primaire
 Z_f : inductance de fuite
 Ω : Ohm
 ω : La pulsation
 ω_{LO} : Pulsation de demi-puissance inferieure
 ω_{HI} : Pulsation de demi-puissance supérieure
 ω_0 : Pulsation de résonance

Introduction générale

Le transformateur de puissance est un dispositif indispensable dans les domaines qui se basent sur l'énergie électrique quelque soit le domaine industriel ou urbain, à cause de sa rôle dans le transport et distribution de l'énergie électrique, et aussi pour économiser les coûts. ce qui implique une large gamme d'utilisation de transformateur, y compris que l'étude du transformateur nous aide également à comprendre le fonctionnement d'un grand nombre des machines telles que moteurs d'induction, alternateurs, compensateurs synchrones, etc., car ces machines utilisent aussi le principe de l'induction électromagnétique.

Alors l'impact d'une défaillance du transformateur peut être catastrophique. car il peut provoquer des pannes prolongées, des réparations coûteuses et des avaries potentiellement graves, ce qui nécessite un diagnostic périodique pour conserver une longue durée de vie, une qualité et la continuité de service.

Le diagnostic de transformateur c'est un ensemble des actions et des testes qui nous permettent à suivre l'états de fonctionnement d'une entité avec la détection et la localisation des défaillances qui peuvent produit sur eux.

Mais les testes classiques réalisés sur les transformateurs de puissance peuvent seulement détecter les dommages de nature permanente. elles basent sur des signaux mesurables comme la tension, le courant, la température qui peuvent fournir des information sur ces défauts. Mais elles ne peuvent pas par exemple de détecter les déformations mécaniques les plus mineures qui se développent par la suite en défauts diélectriques ou thermiques.

Ce qui nous exige de développer des nouvelles méthodes peuvent de détecter ce genre de défauts, parmi ces méthodes la méthode d'analyse de la réponse fréquentiel (**FRA**), qui est le sujet de notre travail. Cette méthode n'exige pas d'ouvrir le transformateur en raison de sa sensibilité élevée pour détecter les défauts, dont on l'utilise sur un transformateur considéré comme une boîte noire.

FRA est une méthode comparative, dans laquelle les résultats expérimentaux sont comparés aux données de référence correspondantes, la comparaison des spectres de fréquence est traditionnellement effectuée par une inspection graphique et se concentre sur l'identification des changements dans la forme générale de la réponse tel que l'apparition de nouvelles fréquences de résonance, une disparition des fréquences de résonances, décalages ou amortissement des résonances existantes.

Introduction générale

La méthode FRA se base sur la repense en fréquence de l'impédance , donc elle permet de calculer et déterminer les paramètres de transformateur pour établir un modèle construit par des cellule RLC parallèle en cascade . visé a détecter les défauts. ce qui était notre objectif au cours de ce travail.

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

Le premier chapitre contient une présentation générale de transformateur (composant, principe de fonctionnement, couplage....etc) , ainsi les contraintes et les defaults les plus connues avec les méthodes de diagnostic usuelles.

Le deuxième chapitre consiste a la modélisation de transformateur. on présente les modales les plus fréquent ainsi quelque avantages et inconvénients ensuite le modèle adopté. on explique aussi dans ce chapitre la méthode FRA, ses types, ses avantages et ses inconvénients.

Le troisième chapitre , on explique brièvement quelque théories et lois fondamentaux utilisés dans cette méthode de diagnostic, puis on construit le modèle adopté afin de le validé expérimentalement.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats obtenus.

I.1. Introduction :

Le transformateur triphasé joue un rôle fondamental pour le transport et la distribution de l'énergie électrique.

En effet, les alternateurs des centrales sont triphasés et la tension qu'ils produisent est relativement basse (soit 20KV pour les centrales moderne). Si on veut que de transport de l'énergie soit économique, il faut que celui-ci soit assuré à une tension beaucoup plus élevée (soit 400KV pour le réseau Français). Cette élévation de la tension est assurée par des transformateurs triphasés [3]

Les transformateurs triphasés 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 triphasés peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux magnétiques [4].

I.1.1. Définition :

Le transformateur triphasé est un appareil électrique classée comme une machine électrique statique, parce qu'il convertit l'énergie électrique d'un état a un autre état, en effet, on peut le considéré comme un convertisseur statique (**AC / AC**). Il consiste à garder la puissance active constante en variant les déférents paramètres de l'énergie (courant, tension) [11] .

le transformateur triphasé est très important dans les domaines qui utilisent l'énergie électrique quel que soit le domaine (industriel, domestique, militaire ...etc.), alors son secteur d'utilisation est très divers et vaste d'où il se permet de transporter l'énergie et la distribuer d'une façon économique , il est nécessaire pour la continuité de l'alimentation et la stabilité des réseaux électrique , on l'utilise aussi pour le démarrage des moteurs asynchrones , il est employé pour la liaison entre la partie de commande et la partie de puissance des équipements électrique .dans les composante électronique **BT** et **TBT** le transformateur c'est un composante indisponible [11]

On effect pour réaliser un transformateur triphasé on peut choisir un parmi deux choix :

- Soit 3 transformateurs monophasés identiques :

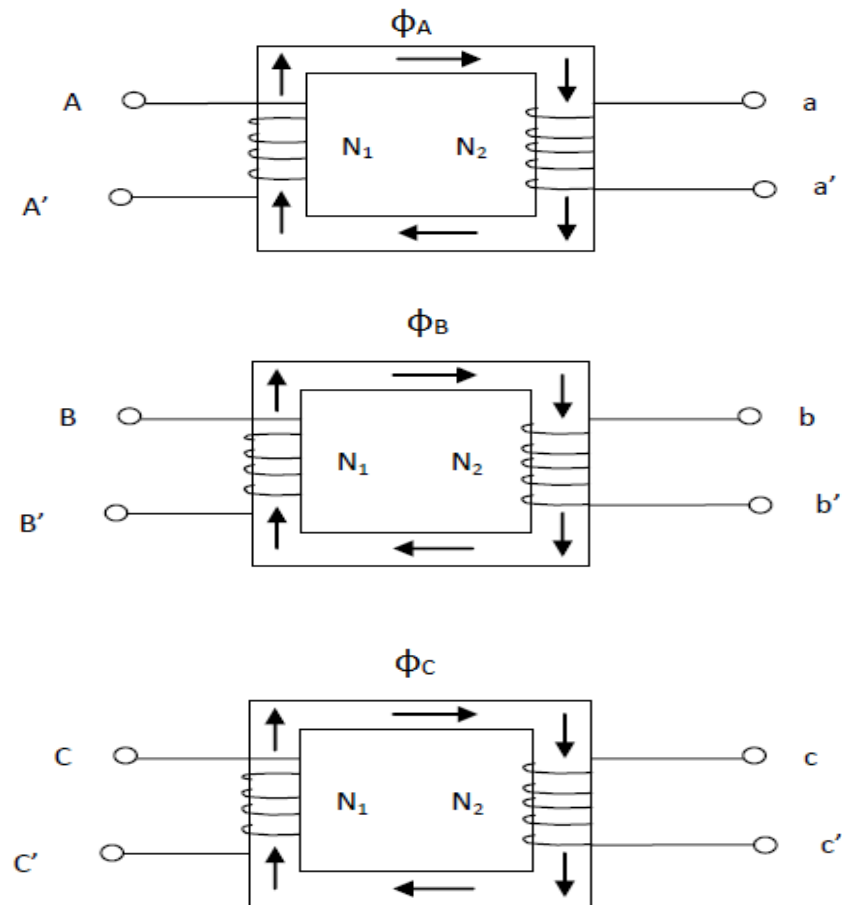


Figure (I.1) : Trois transformateurs monophasés identiques ($\vec{\Phi}_A + \vec{\Phi}_B + \vec{\Phi}_C = \vec{0}$).[11]

- Soit par un seul transformateur triphasé de 6 bobines (3 primaire, 3secondaire) cet choix c'est plus économique que l'autre :

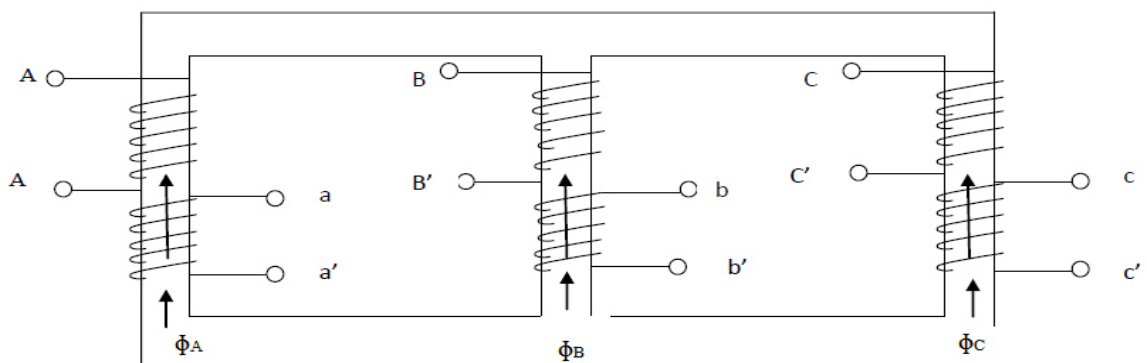


Figure (I.2) : Transformateur triphasé (flux forcés $\vec{\Phi}_A + \vec{\Phi}_B + \vec{\Phi}_C = \vec{0}$).[11]

▪ Remarque :

On convient de repérer les bornes comme suit :

- Enroulements primaires par des lettres majuscules(A.B.C)
- Enroulements secondaires par des lettres minuscules (a.b.c)

Les bornes désignées par le même lettre sont dites »Homologues » [11].

I.2. Différents types des transformateurs :

I.2.1. Transformateurs émergés :

La partie active est placée dans une cuve remplie d'un diélectrique de l'une des familles suivantes :

- huiles minérales : produits pétroliers économiquement intéressants, mais ayant un point d'inflammabilité bas qui entraîne dans certains cas des contraintes d'installation.
- huiles silicones : diélectrique liquide difficilement inflammable.
- L.I.H.T. (Liquide Isolant Halogéné pour Transformateur) : diélectrique de synthèse ininflammable non toxique. Il remplace les PCB(Polychlorobiphényles) dont l'usage est aujourd'hui interdit dans de nombreux pays.

Le diélectrique liquide sert également au transit des calories entre enroulement et système de refroidissement.

Le diélectrique varie donc en température, il se dilate ou se rétracte au rythme de la charge que débite l'appareil. Le transformateur doit donc être conçu pour absorber les variations de volume du diélectrique.

Deux principes sont utilisés : transformateurs respirant et transformateurs hermétiques. [5]



Figure (I.3) : Transformateurs triphasé de type émergés.[]

I.2.2. Transformateurs secs :

Assuré par l'air ambiant sans liquide intermédiaire. Ils appartiennent à l'une des familles suivantes :

- Imprégnés classe H : appareils dont les bobinages sont réalisés par imprégnation et polymérisation des vernis. Le choix des isolants et des vernis évite la propagation de l'incendie, le dégagement de fumées et de vapeurs toxiques.
- Enrobés : appareils dont les bobinages sont pris dans un moulage exécuté à chaud avec une résine époxydique. Cette résine peut être renforcée de tissus de verre et est spécialement étudiée pour éviter la propagation de l'incendie [5]



Figure (I.4) : Transformateurs triphasé de type secs.

I.3.Constitution :

en générale le transformateur triphasé se compose par :

I.3.1. Circuit magnétique :

Formé de trois noyaux fermés par 2 culasses .Il est fabriqué en tôles magnétiques feuilletées .chaque noyau porte :

- un enroulement primaire.
- Un ou plusieurs enroulements secondaires.
- Un isolent Sépare les enroulements primaires et secondaires. [11] .

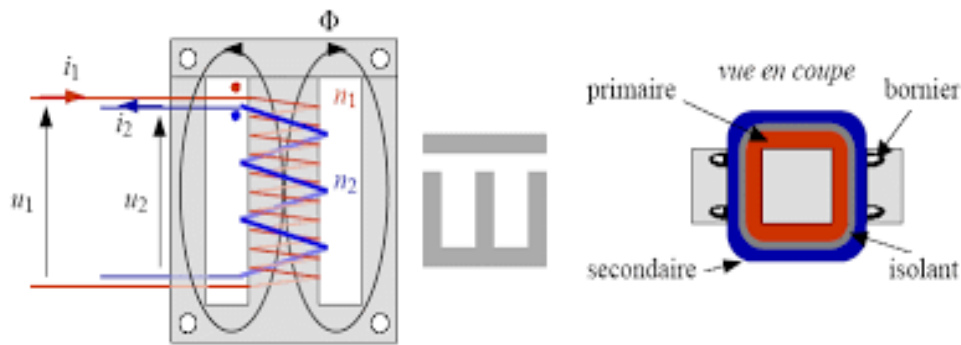


Figure (I.5) : Disposition des enroulements autour du noyau.

▪ **Remarque :**

L'enroulement primaire (à n_1 spires) et l'enroulement secondaire (à n_2 spires) étant bobinés dans le même sens et traversés par le même flux les tensions et sont En phase u_1 et u_2 sont en phase[11] .

I.3.2.Système d'isolation et protection :

La forme de transformateur triphasé est montre de l'extérieur comme suit dans la figure :

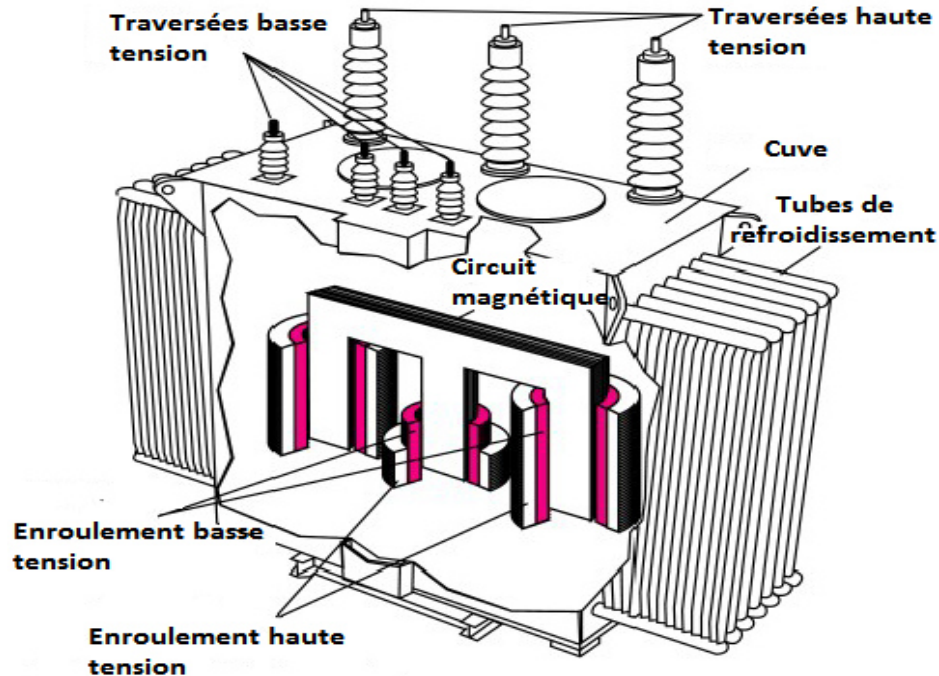


Figure (I.6) : Coupe d'un transformateur triphasé.[]

Le rôle de chaque composant :

I.3.2.1. La cuve :

Est une assemblage mécano-soudé en acier qui protège l'ensemble de la partie active et Permet son immersion dans l'huile diélectrique. [2]

I.3.2.2 Les tubes de refroidissement :

Sont généralement remplacés par des radiateurs ou des aéroréfrigérants de nos jours. [2]

I.3.2.3. Les enroulements :

Les enroulements du transformateur sont fabriqués principalement en cuivre électrolytique recuit avec 99.9 % de pureté et sous forme de barres isolées usuellement en papier Kraft.[1]

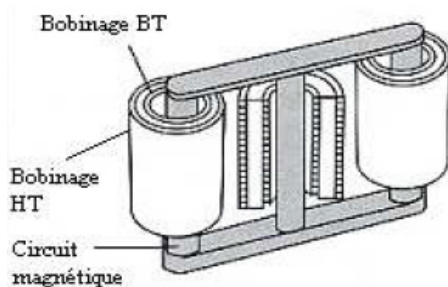
L'utilisation des barres en n'importe quel cas cuirassé-imbriqué ou concentrique est faite normalement en faisceaux (plusieurs barres en parallèles). leurs nombres et leurs dimensions dépendent de la valeur du courant.[6]

Les enroulements permettent la circulation du courant électrique dans des meilleures conditions, en utilisant des métaux bons conducteurs de l'électricité.[7]

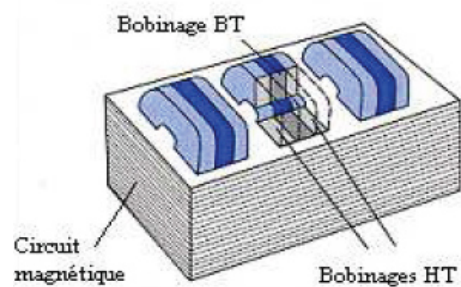
Le cuivre possède d'excellentes propriétés mécaniques, et il possède la plus haute conductivité des métaux commerciaux. Son importance dans les transformateurs est particulièrement significative dû aux bénéfices importants sur la sauvegarde de place et de minimisation des pertes en charge par rapport à d'autres métaux.[8]

En fin les enroulements Permettre le transfert de la puissance du primaire vers le secondaire (tertiaire) tout en modifiant la tension, (Circulation du courant). [7]

On distingue deux types de bobinages :



Figure(I.7): enroulement en couche.



Figure(I.8): enroulement en galettes.

I.3.2.3. Traversées :



Figure(I.9) : Traversée condensateur haute tension

ils existent deux types :

A. Les Traversées (condensateurs) :

Lorsque la tension devient élevée (>40 KV) la traversée nécessite des aménagements internes destinés à répartir les gradients électriques [9].

Elle se présente sous la forme monobloc (voir figure I.6), composée d'un tube en cuivre qui constitue l'ossature de la traversée et sur lequel seront fixés le corps isolant, la porcelaine, la prise supérieure et la bride de fixation [9].

Le corps isolant est composé de papier roulé avec interposition d'électrodes pour répartir linéairement le champ électrique. Il est soit imprégné d'huile soit de résine.

L'espace vide entre le corps isolant et la porcelaine est rempli d'huile [10].

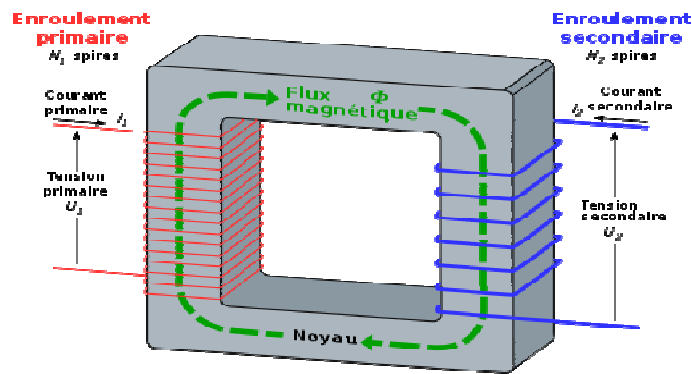
B. Les Traversées (porcelaines) :

La borne porcelaine est un dispositif servant à guider un conducteur à travers un couvercle métallique tout en l'isolant électriquement. En fonction de la tension et de l'intensité, différents systèmes sont utilisés [10].

La fixation de ce type de traversée est assurée par clabotage et l'étanchéité par des joints appropriés [9]. Le conducteur traversant est assuré soit par un câble soudé sur l'embout soit une tige en cuivre [10].

I.4.Principe de fonctionnement :

Le transformateur est un circuit magnétique, les enroulements de primaire crée un flux magnétique variable, dont les sont soumis a une tension et un courant alternatif variable, ce qui induit une force électromotrice dans les enroulements secondaire ce qui engendres une tension alternatif de même fréquence de celle de primaire mais d'une amplitude déférent [2].



Figure(I.10) : schéma simplifié d'un transformateur [2]

Ce phénomène s'explique par la loi de Faraday et loi de Lenz :

➤ **Loi de Faraday :**

Une variation du flux à travers une spire crée une force électromotrice. Inversement, une fréquence variable dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci .

$$e = - d\Phi/dt \quad \text{et pour N spires on aura:} \quad e = - N \cdot d\Phi/dt$$

➤ **Loi de Lenz :**

Toute action sur un milieu se traduit par une réaction de celui-ci, ayant tendance s'opposé a l'action qui lui donné naissance .donc si on fait varier un flux magnétique traversant une spire, provoque l'apparition d'une tension et créant un courant dont les s'oppose a la variation du flux qui lui donnée naissance [7] :

➤ **Fonctionnement :**

- Le primaire 1 reçoit l'énergie d'une source sous une tension U_1 alternatif sinusoïdale le courant primaire crée un flux variable alternatif qui va parcourir le circuit magnétique (lois de faraday).
- Ce flux variable induit une **FEM** dans l'enroulement primaire et une **FEM** dans l'enroulement secondaire.
- Le secondaire 2 raccordé à une charge fournit l'énergie au récepteur sous une tension U_2 .
- Si le transformateur est idéal (sans perte) :

$$U_2=U_1 \cdot n_2/n_1.$$

- L'énergie « reçue » est égale à l'énergie « fournit ».

On donne ci dessous les représentations symboliques des couplages normalisés :

Type de Couplage	Couplages	Représentation symboliques
Etoile-étoile (Y-y)		
Etoile-triangle (Y-d)		
Etoile- zigzag (Y-z)		

Tableau (I.1) : représentations symboliques des couplages

Chacune des schémas de tableau est une représentation conventionnelle qui suppose que les deux enroulements d'un même noyau sont rabattus de part et d'autre de la plaque à bornes. Compte tenu de la remarque précédente on pourrait dire que :

- Dans le couplage Y-d : \vec{V}_A et \vec{U}_{ac} sont en phase.
- Dans le couplage Y-z : \vec{V}_A ; \vec{v}_a' et \vec{v}_a'' sont en phase [11] .

I.5.1. Choix du couplage :

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

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

➤ Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre I_n est \vec{V}_A Supérieur à 0.1 le courant nominal), le secondaire doit être couplé en zigzag.

- Coté haute tension on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser).
- Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle [11] .

I.6. Les défauts :

Le transformateur est un appareil relativement fiable, sa durée de vie est de l'ordre de **40** ans. mais comme toute les entités, au cours de sa fonctionnement il doit tenir des défaillances. Cette dernière. Est très divers car le transformateur est un appareil complexe mais on peut les identifiees par des catégories de défauts selon sa nature ou selon ses causes par exemple dans le pire des cas il est possible parfois d'aller jusqu'à l'explosion du transformateur comme (Figure I.13) : [2] .



Figure(I.13) : Explosion de transformateur.[2]

on vous représenté les défauts les plus connus comme suit :

I.6.1 Les défauts diélectrique :

Les défauts diélectrique es caractérisé la tenue en tension des déférents éléments de transformateur, cette tenue diélectrique est lies a l'état des isolants les défauts les plus connu dans cette catégorie :

- l'amorçage des pièces sous tension entre elles (entre spires ou entre enroulement), ou avec la masse.
- les décharges partielles : au sein d'un solide, classiquement solide dans le transformateur ce sont des micro décharges locales qui tendent a se propager dans le temps.

Tout ses défauts créent de carbone, qui es conducteur, impactant ainsi la tenue diélectrique localement. Ce phénomène étant irréversible, il est possible de retrouver un fonctionnement normal suite à un amorçage diélectrique. [2]



Figure(I.14) : Amorçage franc entre spires.[2]

I.6.2. Les défauts électriques :

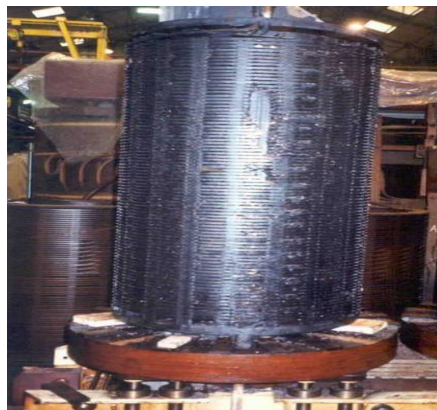
Le passage de courant à travers des différents contacts dans le transformateur peut produire quelques défauts comme :

- Création d'un point chauds dus à des échauffements au niveau de quelques éléments de transformateur ce qui provoque la dégradation des isolants.
- Coupures des circuits électriques. [1]

I.6.3. Les surintensités :

Comme le transformateur est un circuit électrique il est obligé par le passage de courant, ce qui engendre une force de Laplace qui est proportionnelle au carré de ce courant. Elle influe sur le transformateur et se fait apparaître de quelques défauts comme :

- chute de tension au secondaire qui perturbe la stabilité de réseau.
- Des efforts électrodynamiques
- Échauffement élevé des enroulements et des spires. [1]



Figure(I.15): Échauffement excessif d'un enroulement [2]

I.6.4 Le court-circuit :

Un court-circuit est la disparition intempestive de l'isolement relatif de deux conducteurs de tensions différents à la même source, sans interposition d'une impédance convenable [2].

I.6.5 Les défauts électromagnétique :

Le passage de courant au niveau du circuit magnétique de transformateur peut créer des points chauds causés par :

- courant Foucault induit, anormalement important

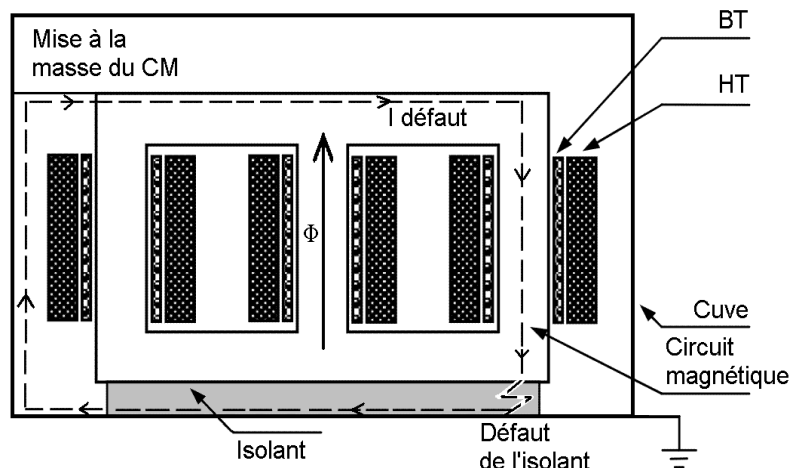


Figure (I.16) : Schéma d'une boucle de courant de défaut avec le circuit magnétique (CM).[2]

I.6.6 Les défauts mécanique :

Généralement il concerne l'anatomie de transformateur et ses composants alors que le défaut le plus connu c'est la déformation géométrique des spires ou des enroulements [2].



Figure(I.17): Déformation mécanique d'un enroulement. [2]

I.6.7 L'échauffement :

Ce défaut est très dangereux au transformateur ou au opérateur qui travaille eux comme ce défaut due a par les autre défauts et par plusieurs autre cause comme :

- une défaillance dans le système de refroidissement comme la lésion de l'huile ou problème dans le système qui la fait circuler dans le transformateur, l'arrêt de ventilateur de refroidissement dans les transformateurs isolé par l'air.
- La température élevée par le climat et l'entourage
- L'humidité et l'oxygène [2].

I.7. Méthodes de diagnostic des transformateurs :

Pour des raisons économique, La maintenance préventive c'est une opération très importante pour n'importe quel entité Au cours de sa fonctionnement, le transformateur néssecite un diagnostique durable qu'il se fait par des entretiens quotidien ou périodique et inspection contenue

La diversité des défaillances et les composantes de transformateur implique des plusieurs méthodes de diagnostique pour estimer ou localiser le défaut rapidement et avoir un cout moins cher le plus cher, y compris faire l'intervention en protégeant le transformateur et les gens interviennent [2].

I.7.1. Analyse d'huile :

Des liquides isolants ont été employés dès le tout début du développement de la construction des équipements électriques haute tension. En général, les liquides sont associés à des isolants solides pour améliorer la tenue aux décharges partielles et au claquage de l'isolation. Dans certain cas, notamment dans les transformateurs et quelques câbles de puissance, le liquide isolant est avant tout un fluide de transfert thermique qui sert à évacuer les calories produites au cœur de l'appareil [13].

Les transformateurs de puissances sont des composants essentiels des systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ils constituent l'un des éléments les plus chers et il est donc fondamental qu'ils fonctionnent correctement durant de nombreuses années. La plupart des transformateurs de puissances à travers le monde sont remplis de liquides isolants. Ces liquides isolants permettent d'assurer aussi bien l'isolation électrique (par imprégnation des isolants solides, cellulosique en particulier), que le transfert de chaleur.

En effet en plus de leurs propriétés diélectriques, ils ont de bonnes propriétés de dissipation de chaleur comparés aux isolants solides et gazeux [14]. L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance, d'une part pour ses propriétés physico-chimiques et d'autre part pour son faible coût. En revanche.

Cette dernière présente une faible résistance au feu et c'est pourquoi entre les années 1930 et le milieu des années 1970 des liquides ininflammables comme les polychlorobiphényles (PCB) étaient utilisés comme isolants dans les transformateurs, cependant ces derniers ont été reconnus comme dangereux pour les populations, les animaux et l'environnement, notamment par le fait qu'ils pouvaient dégager des dioxines lors d'une combustion incomplète [15]. Et la découverte d'une pollution mondiale par les polychlorobiphényles (PCB) a montrée du doigt la famille des liquides isolants dans son ensemble, et elle est devenue la cible des médias. Il en résulte une suspicion de plus en plus grande à leur égard, leur emploi est de plus en plus restreint et soumis à des réglementations par les autorités nationales. C'est cette phobie qui a entraîné des recherches pour essayer de trouver des substituts verts [13]

I.7.2. Les méthodes des mesures de diagnostic :

1. Mesure de la capacité et du facteur de puissance/dissipation :

- a) à 50 Hz ou 60 Hz par.
- b) paliers de tension.
- c) à fréquence variable.

Cet mesure consiste à l'étude de l'état de traversées et l'isolation de l'huile, donc elle se fait par mesure de conductivité de l'huile et les variations de la capacité peuvent révéler une rupture partielle entre les couches capacitives des traversées.

Le facteur de dissipation, également appelé $\tan(\delta)$, est calculé via la tangente de l'angle δ entre le courant mesuré et le courant idéal qui existerait en l'absence de pertes. [12]

2. Mesure de la résistance d'enroulement et vérification du CPeC :

Cette mesure consiste à évaluer les défauts possibles dans les enroulements ou les problèmes de contact, par exemple entre les traversées et les enroulements, entre les enroulements et le changeur de prises, etc....

Pour réaliser ce mesure les enroulements il faut être charger d'une façon que la circuit magnétique devient saturé, on détermine la résistance des enroulement en mesurant la tension et courant continus. [12]

3. Mesure du rapport de transformation (TTR) :

Ces mesures c'est la première pas après l'installation de transformateur et avant le mise en service. Elle permet à vérifier la fonction fondamentale d'un transformateur de puissance, En mesurant le rapport et le déphasage d'un enroulement à l'autre. [12]

4. Mesure du courant de magnétisation :

Cette mesure basé, sur l'étude de l'influence déformation de l'agencement des tôles magnétiques sur la réluctance du circuit magnétique, entraîner un changement dans le courant de magnétisation. Cette mesure se réalisé quand le transformateur est hors charge[12] .

5. Mesure de la tension de court-circuit/réactance de fuite :

D'importants courts-circuits ou le transport du transformateur de puissance peuvent entraîner le déplacement ou la déformation des enroulements. Cette mesure se fait par alimenter le primaire et mise le secondaire en court-circuit. On mesure la tension et compare avec celui de test après la réception de transformateur [12].

6. Mesure de réponse en fréquence des pertes parasites supplémentaires (FRSL) :

C'est la seule méthode électrique permettant d'identifier des courts-circuits entre conducteurs parallèles et un point chaud dû à des pertes par courants de Foucault excessives. la procédure du test FRSL sont identiques au test de tension de court-circuit/réactance de fuite et les deux tests peuvent être réalisés simultanément. A partir du courant, de la tension et du déphasage mesurés, la composante résistive de l'impédance de court-circuit est calculé à des fréquences différentes comprises entre 15 et 400 Hz. Les pertes par courants de Foucault dans le transformateur étant plus significatives aux hautes fréquences, une augmentation de la composante résistive en fonction de la fréquence peut être observée [12].

7. Démagnétisation :

Dès qu'un transformateur de puissance est isolé du système d'alimentation de manière brusque, un flux rémanent demeure dans le circuit magnétique. Le magnétisme résiduel reste également après l'application d'un courant continu au niveau du circuit magnétique du transformateur, par exemple pendant les tests de résistance d'enroulement de routine sur site ou en usine.

En raison du magnétisme résiduel présent dans le circuit magnétique, des courants d'appel élevés, pouvant atteindre le courant de court-circuit maximum, peuvent survenir. Cela crée des contraintes indésirables sur le transformateur lors de sa remise en service. En outre, le magnétisme résiduel peut influencer bon nombre de mesures de diagnostic, et donc affecter la fiabilité de l'évaluation en conséquence [12]

8. Analyse de la réponse diélectrique (en fréquence) :

Cette mesure est utilisée pour évaluer la teneur en humidité de l'isolation cellulosique et permet donc d'en déterminer l'état. Pour effectuer cette mesure, on raccorde la sortie de tension à l'enroulement primaire et l'entrée de mesure à l'enroulement secondaire. Les courants capacitifs et résistifs indésirables sont déviés par le câble de garde raccordé à la cuve, et mesuré sur une plage de fréquences très étendue [12].

9. Analyse de la réponse au balayage en fréquence (SFRA) :

Cette mesure permet d'identifier les problèmes mécaniques ou électriques survenant dans les enroulements, courts-circuits ou chocs pendant le transport du transformateur peuvent entraîner le déplacement ou la déformation des enroulements. On peut assimiler les transformateurs de puissance à un réseau électrique complexe de capacité, d'inductances et de résistances. Chaque réseau électrique possède sa propre réponse en fréquence. Une tension d'excitation sinusoïdale, dont la fréquence augmente en continu, est injectée à une extrémité de l'enroulement du transformateur, puis le signal de réponse provenant de l'autre extrémité est mesuré. La comparaison des signaux d'entrée et de sortie génère une réponse en fréquence unique qui peut être comparée à l'empreinte de référence [12].

10. Analyse des transformateurs de courant :

Ces mesures permettent de vérifier si les TC envoient les bons signaux au système de protection du poste. Des signaux incorrects entraînent un dysfonctionnement du système de protection pouvant endommager les éléments connectés. On fait cette mesure en testant chaque phase séparément, les phases non testées doivent être court-circuitées. Une tension est appliquée via le côté secondaire, ce qui produit l'excitation magnétique et l'induction magnétique dans le circuit magnétique du TC. L'erreur de rapport est calculée à l'aide de la charge et des données du modèle de TC (schéma équivalent), dont les paramètres sont déterminés [12].

11. Analyse des décharges partielles :

En fonction du type de traversée utilisé, le système d'analyse de DP est raccordé à la prise capacitive des traversées ou à un condensateur de couplage externe. Ce montage permet d'effectuer des mesures de DP électriques sur le transformateur [12].

12. Localisation des décharges partielles :

Plusieurs capteurs acoustiques sont montés magnétiquement sur la surface de la cuve d'un transformateur de puissance. Chaque capteur mesure le temps de propagation du signal acoustique depuis la source de DP jusqu'à la paroi de la cuve. L'emplacement des défauts est ensuite calculé en fonction des différences de temps, de la position des capteurs et de la vitesse de propagation [12].

Chapitre I : Généralité sur le transformateur triphasé et son diagnostic

En fin, pour plus de détail nous pouvons mentionner dans le tableau suivant un ensemble des défauts trouvés dans chaque partie du transformateur triphasé et leur méthode de diagnostic :

Composant	Défauts détectables	Méthodes de mesure possibles
Traversées	Claquage partiel entre les couches capacitives de répartition, fissures dans l'isolation enduite de résine	1a .1c .8.10
	Vieillessement et pénétration d'humidité	1a .1c .8
	Connexion de la prise de mesure ouverte ou défectueuse	1b.1c
	Décharges partielles dans l'isolation	1b.11
TC	Erreur de rapport de courant ou de déphasage en tenant compte de la charge, magnétisme résiduel excessif, non conformité à la norme IEEE ou CEI applicable	10
	Rapport de courant et déphasage dépendant de la charge	10
	Spires en court-circuit	10
Connexions Internes	Problèmes de contact	2.9
	Déformation mécanique	9
Changeur de prises	Problèmes de contact au niveau du sélecteur de prise et du commutateur	2.4.9
	Circuits ouverts, spires en court-circuit, ou connexions fortement résistives dans les réactances du Changeur de Prises en Charge	2.4.9
	Problèmes de contact dans le Changeur de Prise hors charge	2.4.9
Isolation	Humidité dans l'isolation solide	1a.1c.8
	Vieillessement, humidité, contamination des liquides isolants	1a.1c.8
	Décharges partielles	1b.11.12
Enroulements	Court-circuit entre les enroulements ou entre les spires	2 .3.4.9
	Courts-circuits entre les conducteurs	6.9
	Circuits ouverts dans les conducteurs parallèles	2.6.9
	Court-circuit à la terre	1a.1c.4
	Déformation mécanique	1a.1c.5.9
	Problèmes de contact, circuits ouverts	2.9
Circuit magnétique	Déformation mécanique	1a.1c.9
	Terre du circuit magnétique flottante	1a.1c.9
	Tôles du circuit magnétique en court-circuit	4.9
	Magnétisme résiduel	4.7.9

Tableau (I.2) : les défauts trouvés dans le transformateur triphasé et leur méthode de diagnostic.[4]

I.8. Conclusion :

Ce chapitre c'est une présentation générale de transformateur on a commencé par son anatomie, on a présenté les types des transformateurs triphasés, nous avons aussi donné les caractéristiques et les particules de la machine et son rôle sur eux ; ainsi que les méthodes de couplage.

A fin de ce chapitre, nous avons étudié la partie de diagnostic on 'a présenté les différents défauts possible et les méthodes de diagnostic.

II.1.Introduction :

L'étude d'un système se fait par la modélisation .Qui se fait par ramener un système physique en un système mathématique. Autrement mise en équation les paramètres d'un système physique en établissant un modèle mathématique sans le compliqué exagérément et prenant en compte la représentation de la réalité avec la plus précision possible.

La modélisation nous aider adimensionné le système voulus pour optimiser un cahier de charge ou le diagnostic dans une durée plus courte et moins couteuse.

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 aux quelles sont soumis les diélectriques [17].

II.2.Les types de modélisation de transformateur de puissance triphasé:

II.2.1.Modélisation en 50 Hz :

Le modèle basse fréquence (Figure.ci-dessus) prend en compte la présence du matériau magnétique représenté par l'inductance magnétisante L_F , les pertes dans le matériau magnétique R_F , les pertes par effet de peau et effet de proximité dans les conducteurs représentées par r_1 et r_2 ainsi que les fuites magnétiques au primaire et secondairereprésentées par l_1 et l_2 . Cette modèle basse fréquence ne prend pas en compte les couplages capacitifs entre spires et entre bobinages. Les éléments du modèle sont indépendants de la fréquence. [20]

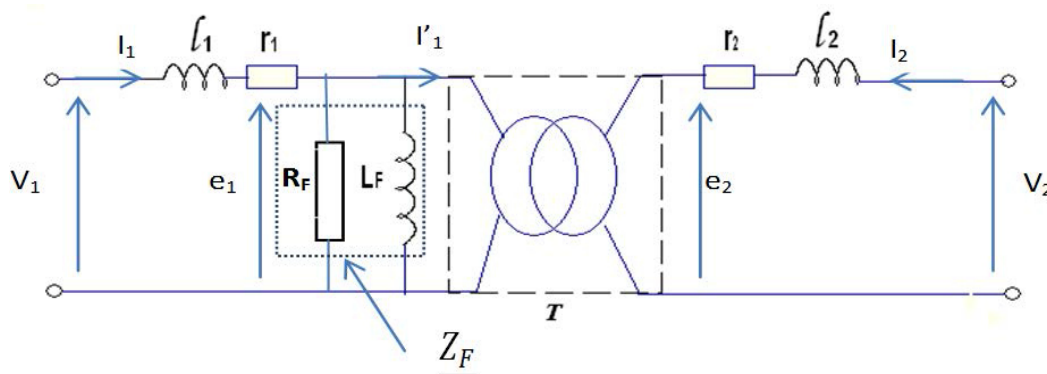


Figure (II.1) : Modèle d'une phase du transformateur en basse fréquence

II.2.2.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.

De nombreux travaux ont été réalisés pour essayer de trouver un modèle unique du transformateur, mais cet objectif est loin d'être atteint cause de plusieurs phénomènes énumérés liés à la diversité de la structure de transformateur. Mais on peut classés les différents modèles en deux catégories :

- ✓ **Modèle détaillé:** Ce type de modèle consiste à représenter le transformateur par un grand réseau de capacités et d'inductances.
- ✓ **Modèle entrée-sortie :** Dans ce type de modèle, le transformateur est considéré comme une boîte noire et la modélisation se base sur les caractéristiques en domaine fréquentiel des impédances du transformateur vues de ses bornes [20]

II.2.3.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.2.3.1 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. Il 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 [16].

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.

De même, pour tenir compte de l'effet de peau, on introduit des éléments complexes qui traduisent les pertes dans les conducteurs. Le programme ne traite que des éléments de réseau à constantes localisées, et ne permet pas une analyse fréquentielle systématique du transformateur [17].

II.2.3.2. 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 :

- 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)

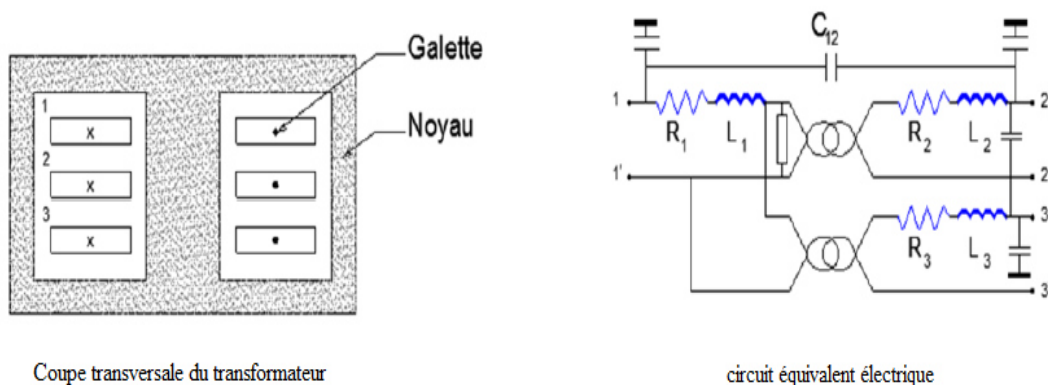


Figure (II.2) : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP

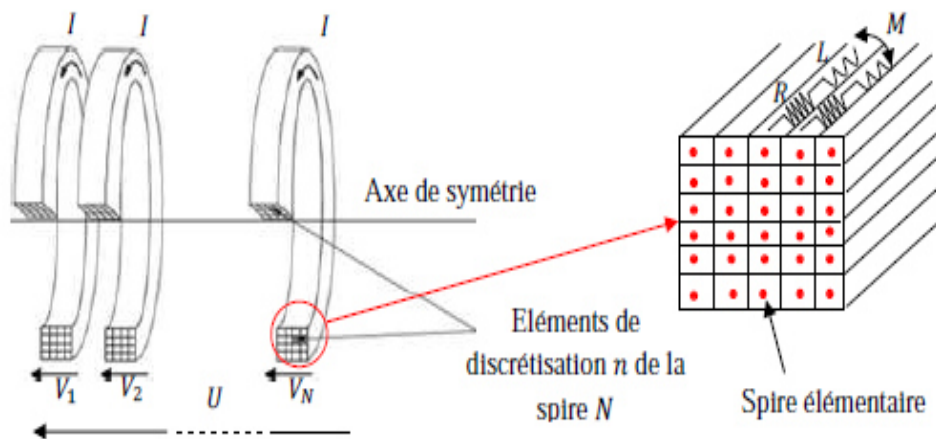
Les paramètres sont déterminés soit par la mesure (essai à vide, essai en court-circuit...), soit par le calcul direct de la géométrie. L'intérêt du modèle est son utilisation dans EMTP permettant d'intégrer des schémas non-linéaires (parafoudres, ...), des lignes à constantes réparties, et d'effectuer 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 [16].

II.2.3.3. Méthode des Circuits Couplés (M2C) :

Cette méthode est très proche des considérations physiques et consiste à exprimer les effets inductifs propres et mutuelles entre de multiples spires et éventuellement le circuit magnétique. Pour des spires de géométrie simple, ces inductances sont calculées par des expressions analytiques.

A) Théorie Générale de la M2C :

Le principe de la M2C consiste à fractionner chaque conducteur d'une bobine de N spires (et/ou une charge) en n éléments distincts, à l'intérieur desquels la densité de courant est supposée constante. La discrétisation peut être régulière ou non, selon le type de conducteur, ses dimensions et l'épaisseur de peau dans celui-ci. De manière générale, pour des spires de section quelconque, composées de conducteurs de section arbitraire, cette méthode se traduit par la figure (II.3) :



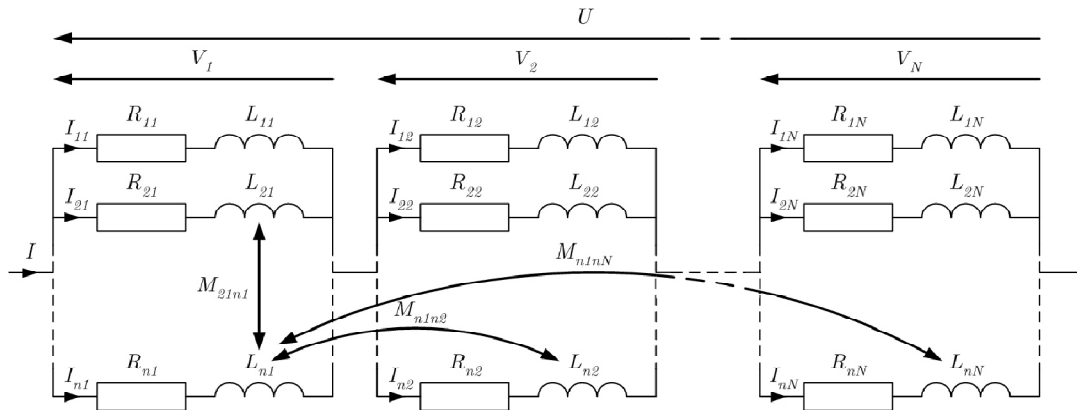
Figure(II.3): Principe de la M2C découpage en éléments inducteurs

La globalité des spires élémentaires ainsi obtenues forme alors un système mutuellement couplé modélisable par un schéma électrique équivalent.

B) Interaction entre les Eléments de Circuits :

Chaque élément du circuit électrique est représenté par sa résistance électrique et son inductance, ces éléments forment entre eux un système de circuits mutuellement couplés.

La discrétisation par la méthode des circuits couplés est représentée dans la (Figure II.4), où tout conducteur d'une bobine est formé de «N» spires principales en série et chacune de ces spires est constituées de « n » spires élémentaires en parallèles [19].



Figure(II.4): Schéma électrique équivalent de la M2C.

II.2.3.4. Modélisation par inductances de fuite :

La présence du noyau magnétique, avec une grande perméabilité, augmente le couplage entre les bobinages. Il arrive donc que les valeurs des inductances propres soient très proches de celles des mutuelles. De même, on a vu aussi que l'évaluation exacte de la matrice inductance ne signifie pas que les effets de fuite (inductances de fuite) soient corrects. Les valeurs des inductances propres étant très proches de celles des mutuelles, le calcul des inductances de fuite, à partir de ces dernières donnera des valeurs imprécises.

Par ailleurs, il arrive que le transformateur se trouve dans une situation de court-circuit, et dans ce cas ce sont les inductances de fuite qui jouent un rôle important. Dans ces cas, il est nécessaire d'utiliser une méthode (modèle) basée sur les inductances de fuite, pour avoir une meilleure précision.

Une nouvelle méthode a été proposée par Ahmed afin d'améliorer le calcul des inductances de fuite et pour avoir une certaine précision [17] En effet, ce type de modélisation est basé sur des hypothèses simplificatrices pour le calcul des inductances de fuite, ce qui peut induire des erreurs, particulièrement dans des situations de défaut qui peuvent survenir sur des transformateurs en exploitation.

II.2.3.5 Modélisation par la théorie de lignes :

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 (II.5).

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 [16].

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 [16].

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.

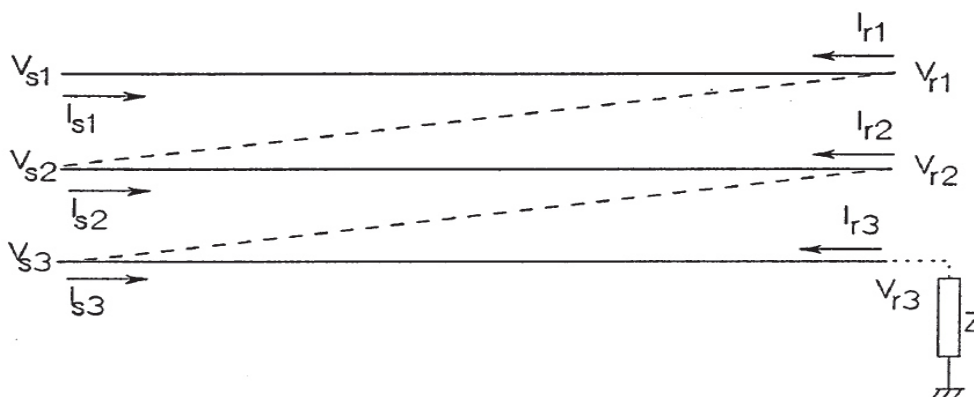
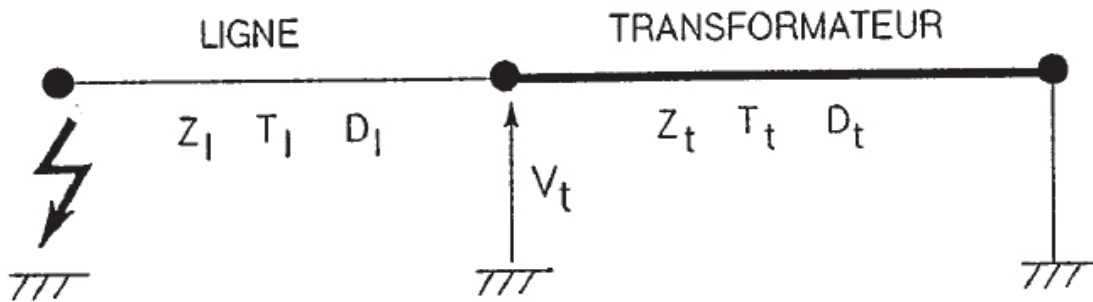


Figure (II.5): Schéma équivalent d'un enroulement.

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.6) la détermination des paramètres n'est pas aisée (impédance caractéristique de la ligne équivalente au transformateur, ...) [16].



Figure(II.6):Modélisation du transformateur par une ligne Z impédance caractéristique,
T temps de propagation, D facteur d'amortissement

II.2.3.6 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 [20].

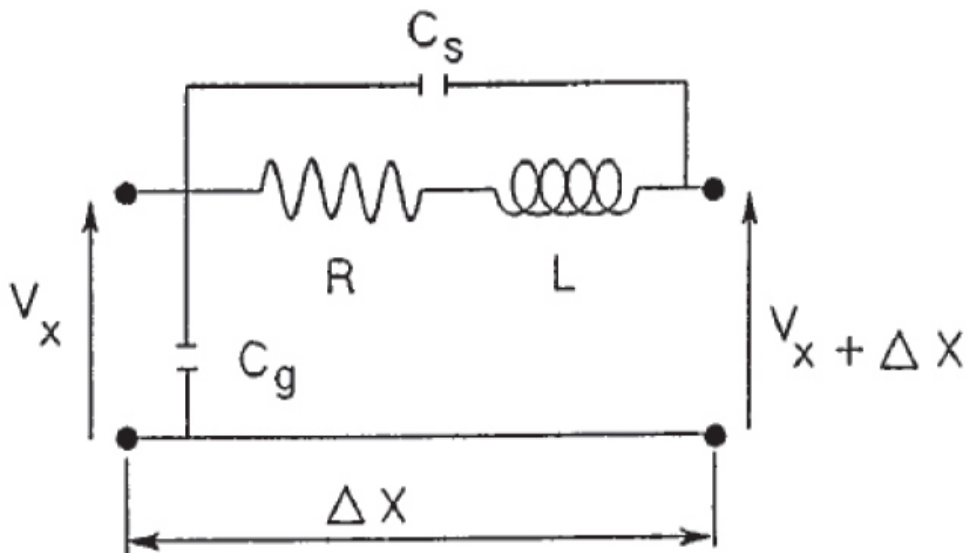


Figure (II.7) : L'application est faite sans comparaison avec la mesure.

Q. SU, R. E JAMES, D. SUTANTO, ont développé un modèle de transformateur basé sur la transformée en Z, qui tient compte de la variation des fréquences. La méthode consiste à mesurer entre deux points, la fonction de transfert du transformateur (en général entre l'entrée et la sortie), le passage du plan de Laplace (s) avant le plan Z est une obligation.[21]

L'inconvénient de cette méthode est la nécessité de faire les deux transformations (S, Z) et cela pour aboutir au modèle final, toutefois, les étapes importantes de calcul pour atteindre des résultats sont considérables et Leur application reste restreinte par les hypothèses prises pour modéliser le transformateur et la ligne. La modélisation de la ligne est faite sans tenir compte de l'effet de peau, de l'effet du sol, et de la variation fréquentielle des paramètres [21].

II.2.4 modèle adopté pour la FRA :

II.2.4.1. Modélisation par inductances propres et mutuelles :

Heller et V everka 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.8).

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 [23].

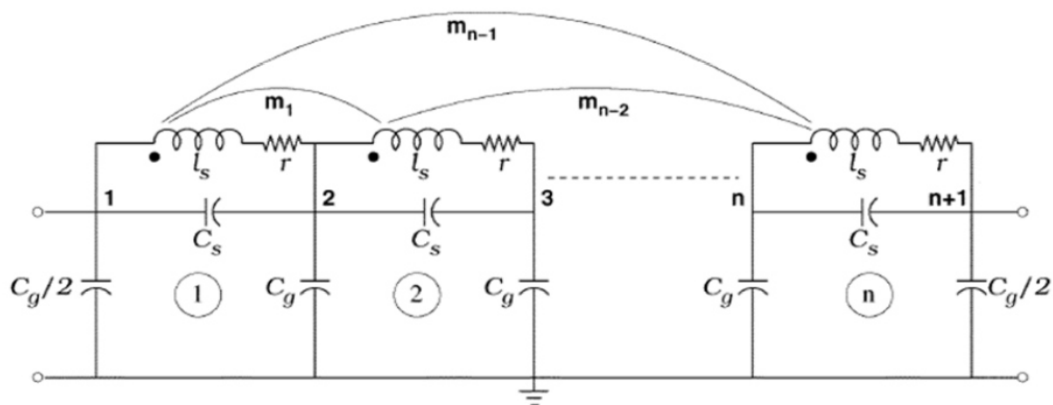


Figure (II.8): modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié.

Avec :

Cs : capacité série.

Cg : capacité shunt.

r: résistance.

L : l'inductance propre.

M_{1N} : représenté les inductances mutuelles.

II.2.4.2. Intérêt de ce modèle :

Ce modèle est le plus répandu et le plus utilisé, pour modéliser un transformateur, dans le passé, et à l'heure actuelle. Pour cela, on détermine les éléments du schéma équivalent, soit par calcul (numérique ou analytique), soit par mesure (essais en court-circuit...).

Le principal intérêt de ce modèle, une fois que l'on a les éléments du schéma équivalent, est qu'il peut être traité par n'importe quel logiciel pouvant résoudre des réseaux électriques de type RLC (EMTP, ...). De plus, il est bien adapté pour le calcul de la réponse temporelle consécutive à une excitation par une onde de choc rapide [16].

II.2.4.3. Inconvénients de ce modèle :

Les principaux inconvénients de ce modèle peuvent être résumés en quatre points:

- Les travaux ont montré que l'évaluation exacte de la matrice inductance ne signifie pas que la caractéristique de la fonction de transfert du transformateur, ou les effets de fuite (inductances de fuite) soient corrects. En effet, à cause de la grande valeur de la perméabilité du noyau magnétique qui augmente le couplage entre les bobinages, le calcul de l'inductance de fuite à partir des inductances propres et mutuelles ne sera pas précis, du fait que ces valeurs sont très proches. Ceci donnera l'avantage à un modèle basé sur l'inductance de fuite.
- Le nombre de paramètres à déterminer est important.
- On ne peut pas calculer d'une manière précise les paramètres du schéma équivalent, à cause de la présence du noyau magnétique, ou encore de la forme particulière des bobines.

En fait, en ce qui concerne le noyau magnétique, on fait souvent l'hypothèse qu'il n'influence pas les régimes transitoires du transformateur (noyau blindé en haute fréquence).

- Enfin, la validité du modèle, en HF, est liée au degré de raffinement adapté, pour la représentation des enroulements, et au nombre de paramètres dont on tient compte dans le calcul [16].

II.3.L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) :

II.3.1 Définition :

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est une méthode de diagnostic efficace pour le transformateur triphasé. Cette méthode consiste à mesurer la réponse en fréquence des enroulements du transformateur sur une large gamme de fréquences.

Autrement 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 (peut aller jusqu'à 1MHZ).

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 mesurée par des techniques fra peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur di transformateur, dont la cause doit être en suite identifiée et analysée [20].

II.3.2Buts de la FRA :

Le but de la mesure FRA est la détection de:

- Déformations de la géométrie des enroulements (Axiales et radiales).
- Connexions internes interrompues.
- Enroulements déformés "Buckling".
- Enroulements ouverts ou en court-circuit.
- Défaut sur le circuit magnétique (tôles en court-circuit).
- Défaut de mise à terre du noyau.
- Défaut de connexions des barrières.[20]

II.3.3.Utilisation des tests FRA :

Les applications typiques de la mesure de l'Analyse de la réponse en fréquence (FRA)sont :

- 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. [20].

II.3.4.Détection de défaut par FRA:

L'approche FRA est capable de détecter un certain nombre d'état de défauts, à la fois mécanique et électrique.

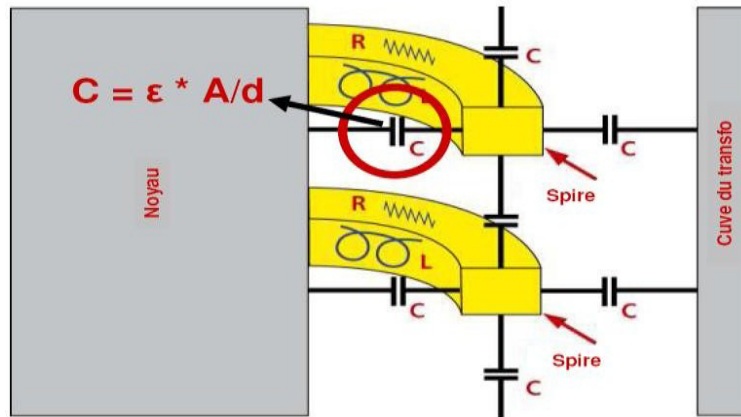
Le principal rôle de FRA est de détecter des défauts mécaniques, qui ne peuvent être détectés par d'autres mesures Les principaux défauts détectés par FRA sont :

- La déformation d'un enroulement (axiale et radiale).
- Le mouvement et déplacement d'enroulement haute et basse tension.
- L'effondrement partiel d'un enroulement.
- Mouvement du circuit magnétique.
- Rupture de spires et desserrage de l'enroulement de la culasse.
- Court-circuit ou circuit ouvert d'enroulement.
- Mauvaise connexion de prise de terre de la cuve du transformateur.
- Problèmes de connexion interne.

Cependant, La mesure par FRA est souvent la seule méthode qui peut détecter les mouvements axiaux d'enroulements. Elle détecte également les mouvements radiaux, qui peuvent être aussi vérifiés par les essais de réactance de fuite. Il est utile de mettre en corrélation les deux méthodes pour augmenter la précision du résultat. Cela est également vrai pour les autres défauts, notamment mécanique [24].

II.3.5. Principe de la méthode :

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductance et de résistances donc un circuit très complexe (comme schématisé dans la figure (II.12) qui génère une empreinte digitale ou une signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des réponses sont représentées sous forme de courbe. [35]



Figure(II.9): Modèle d'un enroulement de transformateur.

Il existe une relation directe entre la configuration géométrique des enroulements et le circuit magnétique à l'intérieur du transformateur de puissance et la distribution des éléments qui le composent tels que : résistances, inductances et capacités. Ce réseau RLC peut être identifié par des fonctions de transfert dépendant de la fréquence.

Or le changement dans la configuration géométrique engendre la variation de l'impédance du réseau et de ce fait déplace la fonction de transfert. Les changements dans la fonction de transfert vont révéler un grand rang de modes de défaillance.

Donc, l'approche FRA permet la détection des changements dans la fonction de transfert d'un enroulement individuel à l'intérieur du transformateur de puissance et par conséquent, indique un mouvement ou une distorsion dans le circuit magnétique et les enroulements de ce dernier. La capacitance est déterminée en fonction de la distance entre les conducteurs.

Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacités et modifieront ainsi la forme de la courbe.

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 Figure (II.13). [25]

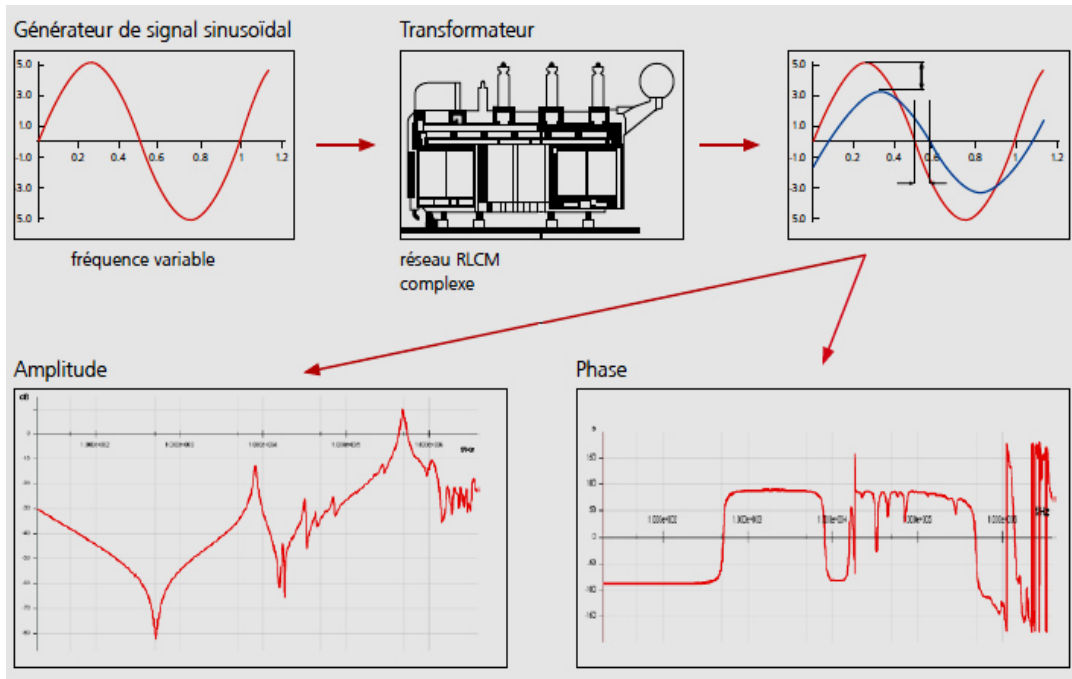


Figure (II.13) : Principe de la FRA

II.3.6. Fonction de transfert d'un transformateur de puissance :

L'objectif principal de la FRA est de déterminer comment l'impédance d'un transformateur d'essai se comporte sur une gamme de fréquences appliquées. Les propriétés réactives d'un transformateur d'essai dépendent des changements de fréquence.

La plupart des transformateurs produisent une résonance très distincte dans une plage de fréquence spécifiée. Dans le cas des transformateurs, les fonctions de transfert sont utilisées pour la modélisation d'enroulement et des études transitoires.

La fonction de transfert d'un réseau RLC est le rapport de sortie et d'entrée de la réponse en fréquence, lorsque les états initiaux d'un tel réseau sont égaux à zéro. La relation entre phase et l'amplitude peut être extraite à partir des sorties de la fonction de transfert.

L'idée de l'application de la FRA pour l'évaluation de l'état d'enroulement du transformateur est basée sur le fait que le déplacement ou la déformation d'enroulement change les propriétés géométriques, qui sont liées à ses paramètres capacitifs et inductives internes. Les changements de ces paramètres modifient par conséquent les réponses de fréquence d'enroulement, qui peuvent être observées par la mesure de la fonction de transfert [16].

II.4 Conclusion :

Nous avons vus 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 et mutuelles est le plus adapté à notre travail, et donc retenu pour étudier le comportement des transformateurs de puissance, en régime transitoire (calcul des fréquences de résonance).

Jusqu'ici, des phénomènes tels que les pertes supplémentaires par courants de Foucault, le comportement du noyau magnétique, et les pertes diélectriques, sont approximés, ou tout simplement négligés, du fait que leurs calculs, en utilisant des méthodes numériques, sont coûteux en temps de calcul.

Pour notre étude, nous adoptons l'approche fréquentielle qui peut nous donner les fréquences de résonance [1]

III.1.Introduction :

Le diagnostic efficace d'un transformateur de puissance repose sur l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) des enroulements du transformateur [1].

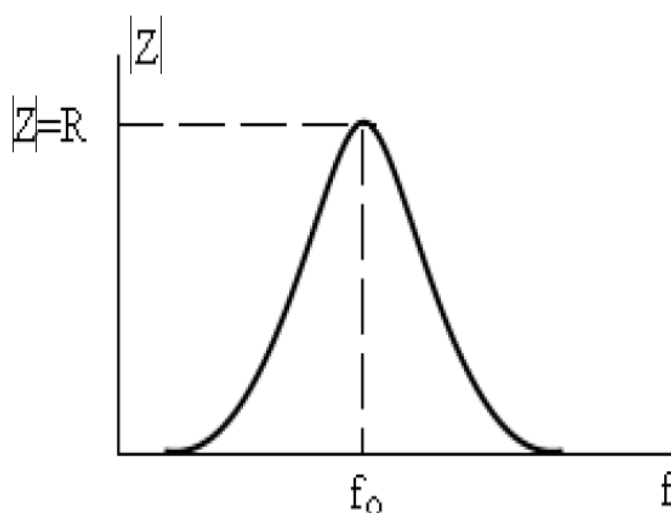
Le circuit équivalent de l'enroulement d'un transformateur inclut la résistance et l'inductance d'une bobine ainsi que des capacités parasites entre les bobines adjacentes et entre l'enroulement et la paroi de la cuve. La réponse en fréquence de l'enroulement est par conséquent une caractéristique propre à chaque enroulement de transformateur. Les différents défauts de transformateur ont des effets sur ses caractéristiques.

Dans ce chapitre on 'a établi un modèle RLC en utilisant des réponses expérimentales obtenues par un test FRA sur un transformateur de laboratoire.

III.2.Méthodologie :

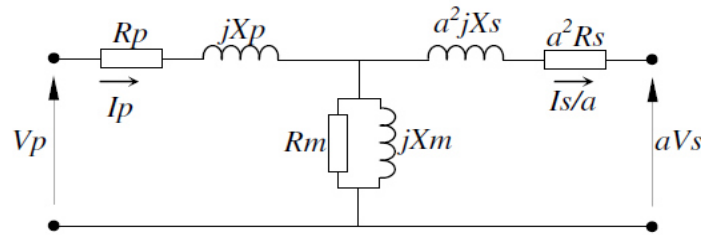
Le modèle proposé est basé sur des mesures obtenues dans les transformateurs électriques en exploitation neuf. Mais on 'a suivi quelque théories générales de l'électricité sur les filtres passe-bande :

Dans le modèle proposé, les cellules composées des éléments RLC parallèle sont arrangées en fonction du nombre de points de résonance de la réponse en fréquence de l'impédance [1].



Figure(III.1): Module de comportement de l'impédance d'un circuit RLC parallèle en fonction de la fréquence [1].

Les paramètres de ce modèle peuvent être déterminés par des essais standards à vide et en court-circuit. Et les implémenter sur le modèle classique de basse fréquence :



Figure(III.2) : modèle classique électrique de transformateur.

Si le test à vide, laisse l'enroulement secondaire ouvert, l'impédance $Z_p(\omega)$, vue à partir des bornes de l'enroulement primaire sera donnée par figure(III.2) en supposant R_p et R_m qui ne dépend pas de la fréquence et L_p et L_m représente l'inductance de fuite de l'enroulement primaire et l'inductance de magnétisation du transformateur, respectivement.

$$Z_p(\omega) = R_p + j\omega L_p + \frac{jR_m\omega L_m}{R_m + j\omega L_m} \quad (\text{III.1})$$

Le comportement de l'impédance Z_p en fonction de la fréquence peut être analysé comme suit. Tout d'abord, il peut être vérifié le comportement d'impédance lorsque fréquence tend vers zéro.

$$Z_p(0) = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(R_p + j\omega L_p + \frac{jR_m\omega L_m}{R_m + j\omega L_m} \right) \quad (\text{III.2})$$

$$Z_p(0) = R_p \quad (\text{III.3})$$

Le comportement de l'impédance lorsque la fréquence tend vers l'infini est présenté en (III.4).

$$Z_p(\infty) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \left(R_p + j\omega L_p + \frac{jR_m\omega L_m}{R_m + j\omega L_m} \right) \quad (\text{III.4}).$$

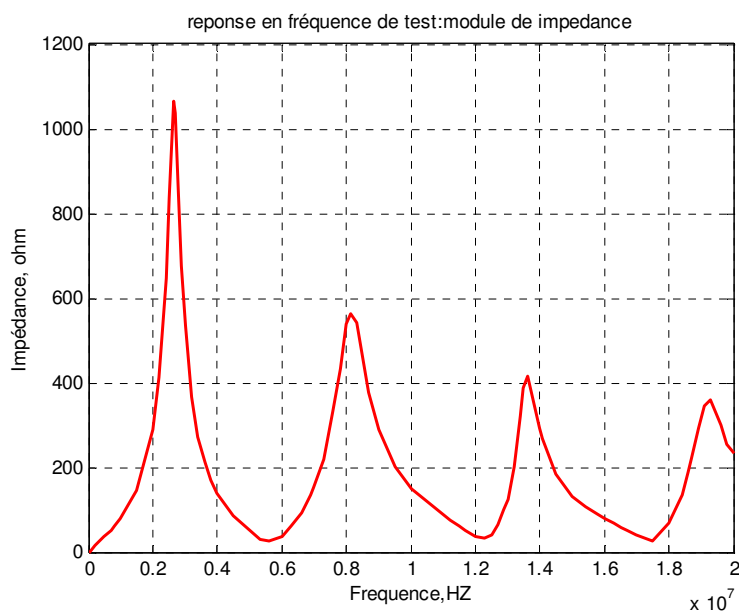
La branche de magnétisation de transformateur présente des valeurs de résistance, réactance et inductance électrique beaucoup plus grande que les valeurs de la résistance électrique de l'enroulement et la réactance de fuite associée.

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{jR_m\omega L_m}{R_m + j\omega L_m} = R_m \quad (\text{III.5}).$$

Cependant, l'impédance primaire $Z_p(\omega)$ tend vers aux très grandes valeurs de ω qui dépend directement de ωL_p . Ainsi, il en résulte que l'impédance de l'enroulement primaire à haute fréquence est régie par le primaire $Z_p(\omega) = j\omega L_p$ [26].

La figure(III.3) montre le comportement de l'impédance d'un transformateur réel, obtenue à partir d'un essai de réponse en fréquence [27].

On peut observer que ce comportement n'est pas compatible avec l'analyse fondée sur le circuit classique pour le transformateur.



Figure(III.3) : Comportement du module d'impédance d'un transformateur réel [27].

On conclut que pour des fréquences élevées, d'autres effets se manifestent ce qui prouve que le modèle classique ne peut pas être appliqué pour une analyse du comportement fréquentiel du transformateur.

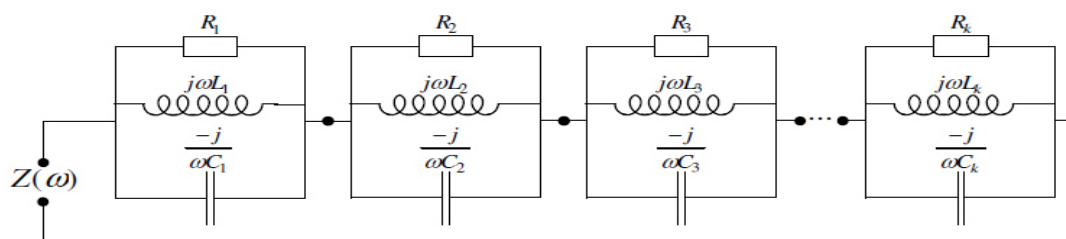
On peut considérer, par exemple, l'existence de capacités entre enroulements et entre spires de chaque enroulement. Mesurer les valeurs de ces capacités et se présenter sous leur répartition dans la partie active du transformateur, ce qui nécessite sans doute travaux qui peuvent être réalisés à l'aide des méthodes numériques poussées telle que la méthode des éléments finis[1].

Une inspection de l'allure de la réponse fréquentielle de bobinage montré dans la figure(III.3) induit une réflexion sur un modèle électrique, le comportement fréquentiel de ce dernier traduisant de sorte que les différents pics d'impédance seront reproduits dans leurs fréquences respectives.

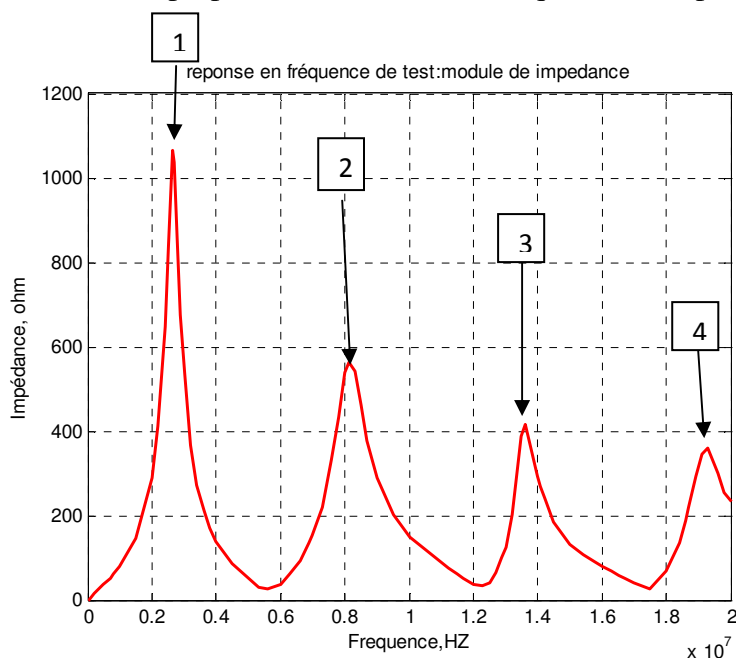
Il est connu dans théorie classique que les circuits électriques des passifs (R, L, C), connectés en eux, présentent un comportement similaire a celui observé sur l'allure illustré par la figure(III.3).

en effet la courbe (III.3) présentant des pics qui pouvant être interprété par des résonance de bobinage par conséquent ces dernier peut être représenté par des cascades des cellule RLC dont les éléments sont connecté en shunt.

Chacune des cellules est accordée l'une des fréquences de résonance relevée sur le signal de l'impédance. L'ensemble des cellules mise en série représenté l'impédance fréquentiel de l'enroulement testé



Figure(III.4) : Modèle proposé dans le domaine fréquentiel composé par cellules RLC.



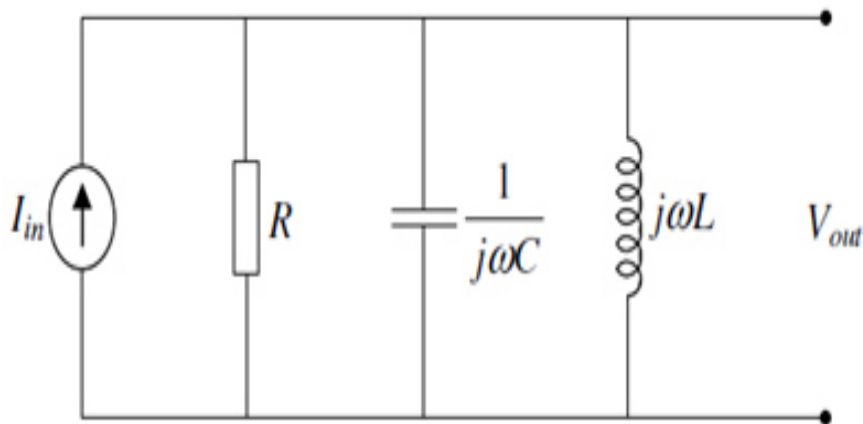
Figure(III.5) : la courbe de module d'impédance mesurée en fonction de la fréquence [27].

III.3. Théorie fondamentale :

Cette partie présente l'étude de la configuration proposée RLC, et déterminer les valeurs des éléments passifs dans chaque cellule.

III.3.1.Circuit RLC parallèle :

L'analyse théorique repose sur le circuit RLC parallèle, comme le montre la figure (III.4).



Figure(III.6) : Circuit parallèle RLC.

La tension de sortie V_{out} en V (Volt), est défini en (III.6), où I_{int} est le courant délivré par la source dans le circuit, en A (ampère) et l'admittance du circuit Y en S (siemens).

$$V_{out} = \frac{I_{int}}{Y} \quad (III.6)$$

A partir de la caractéristique de la fonction de transfert, le module d'impédance de circuit peut être écrite comme en (III.7), où R est la résistance électrique en Ω , C est la capacité en F, L est l'inductance en H, ω est la pulsation en rd /s.

$$\left| \frac{V_{out}}{I_{int}} \right| = \frac{1}{\sqrt{(1/R^2) + (\omega C - 1/\omega L)^2}} \quad (III.7)$$

La pulsation de résonance ω_0 , se produit lorsque $(\omega C - 1/\omega L) = 0$ et est fixé à (III.8).

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{III.8})$$

Où la résistance R de cette pulsation est exprimée par :

$$R = \left| \frac{V_{out}}{I_{int}} \right|_{max} \quad (\text{III.9})$$

Conceptuellement, la pulsation de demi-puissance correspond à la pulsation à laquelle la puissance de sortie d'un circuit électrique est réduite moitié de la puissance de la bande passante. Par conséquent, les pulsations à mi-puissance de l'amplitude de l'impédance du module correspond à une $1/\sqrt{2}$ de sa valeur maximale, est exprimée par :

$$\frac{R}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{(1/R^2) + (\omega C - 1/\omega L)^2}} \quad (\text{III.10})$$

Considérant que les valeurs positives de pulsation, nous obtenons des valeurs inférieures et supérieures ω_{LO} , ω_{HI} respectivement, sont exprimées par :

$$\omega_{LO} = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{(2RC)^2 + LC}} \quad (\text{III.11})$$

Et

$$\omega_{HI} = \frac{1}{2RC} + \sqrt{\frac{1}{(2RC)^2 + LC}} \quad (\text{III.12})$$

La bande passante B est exprimée par :

$$B = \omega_{HI} - \omega_{LO} = \frac{1}{RC} \quad (\text{III.13})$$

A partir de la largeur de bande, il est possible de déterminer le facteur de qualité qui exprimé par :

$$Q = \frac{\omega_0}{B} = \frac{RC}{\sqrt{LC}} = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (\text{III.14})$$

Les équations (III.11) et (III.12) peuvent être écrites à l'aide des expressions (III.8), (III.13) et (III.14), sous la forme :

$$\omega_{LO} = \omega_0 \left[\frac{-1}{2Q} + \sqrt{\frac{1}{(2Q)^2} + 1} \right] \quad (\text{III.15})$$

Et

$$\omega_{HI} = \omega_0 \left[\frac{1}{2Q} + \sqrt{\frac{1}{(2Q)^2} + 1} \right] \quad (\text{III.16})$$

Les paramètres ω_{HI} , ω_{LO} , B et Q sont essentiels pour reproduire la réponse en fréquence de l'impédance est ainsi déterminer le modèle de transformateur [27].

Dont on calcule L et C par utiliser les équations suivantes :

$$C = \frac{Q}{\omega_0 R} \quad (\text{III.17})$$

$$L = \frac{R}{\omega_0 Q} \quad (\text{III.18})$$

III.3.2.Outil de calcul :

Initialement, les données sont collectées à partir de la réponse en fréquence réelle de l'impédance, réalisée sur les transformateurs de puissance. Elles ont servi de référence pour la élaboration des programmes et des simulations informatiques nécessaires afin d'évaluer le modèle proposé.

Comme outil de calcul a été utilisée **MatLab®7.8.0.347(2009a)** on a développé un programme informatique qui calcule les valeurs des éléments passifs de chaque cellule et donc permet d'obtenir le modèle d'impédance électrique de l'équipement, à partir de leurs terminaux. Fondamentalement, le modèle proposé est conforme à l'organigramme de la Figure

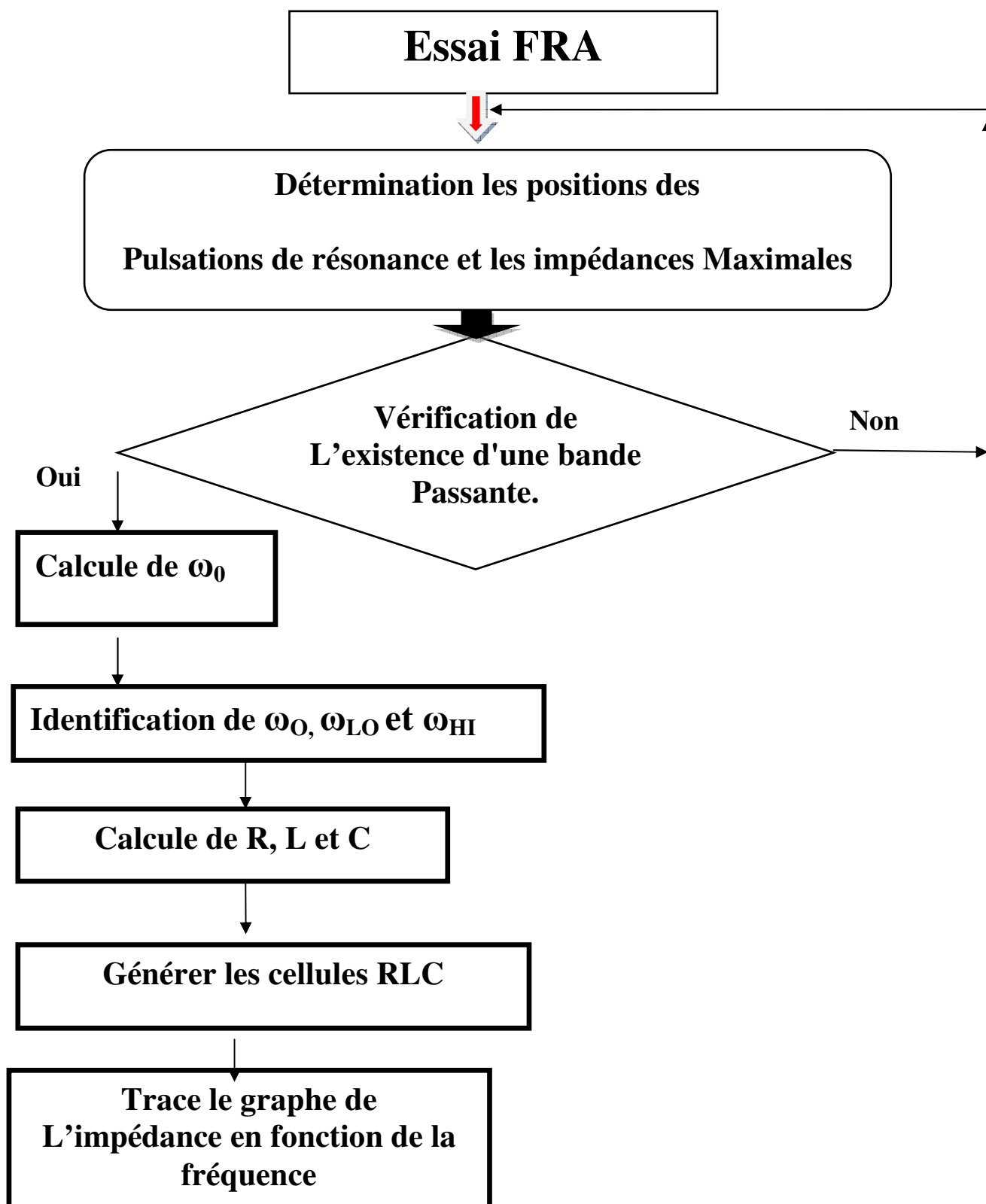
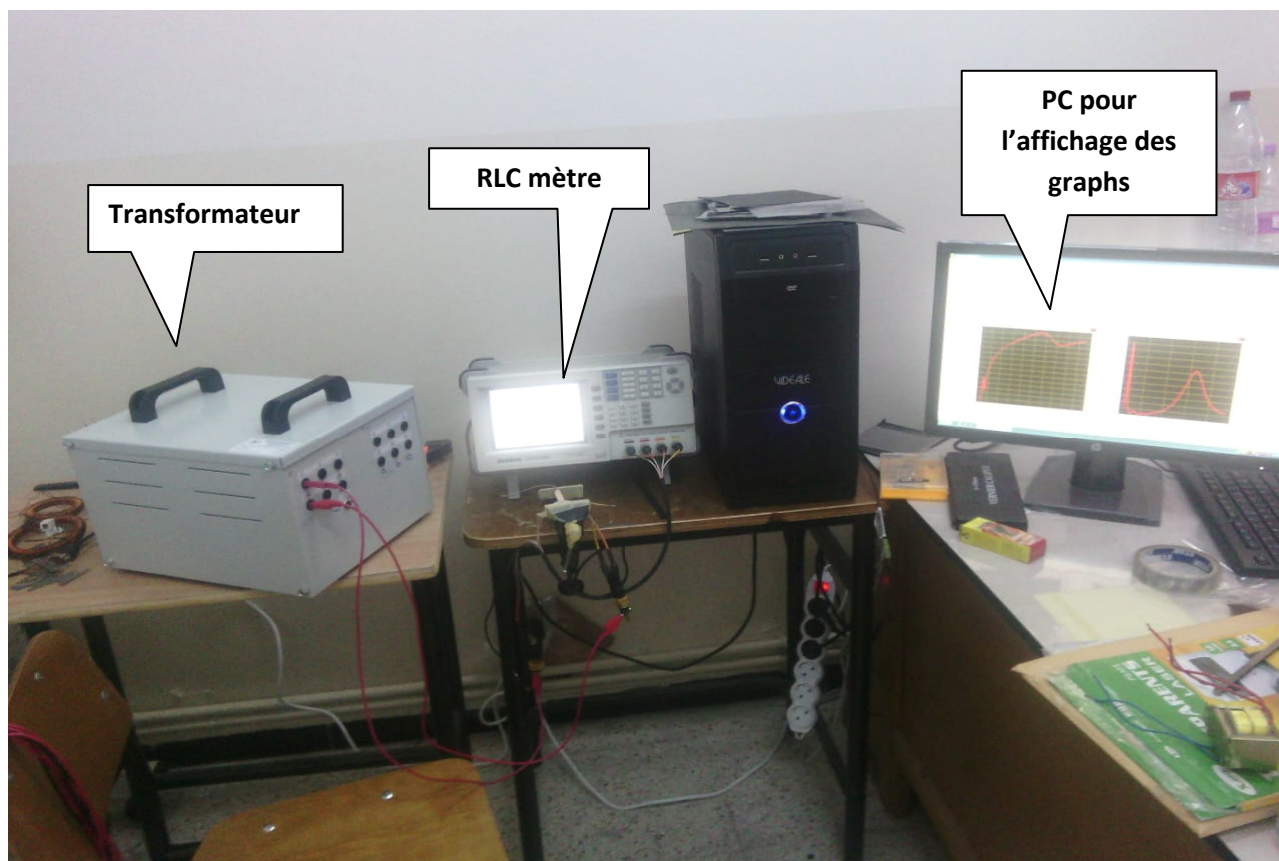


Figure (III.7) : organigramme visé à calculer les paramètres de modèle proposés.

III.4. Essais expérimentaux et calculs des paramètres du modèle adopté :

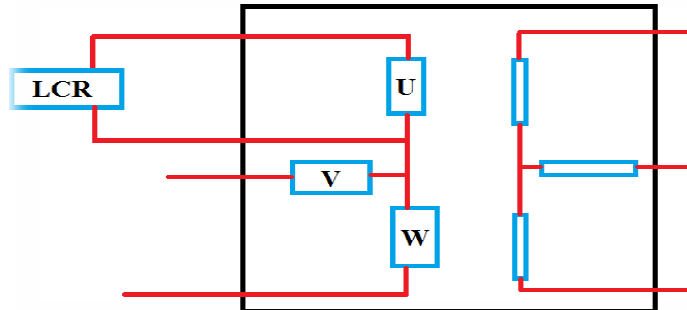
Les mesures sont effectuées sur un transformateur triphasé **100VA 230/115 V** dans une gamme de fréquence variant de **50Hz** à **5MHz** En utilisant un analyseur de fréquence (**LCR mètre**).



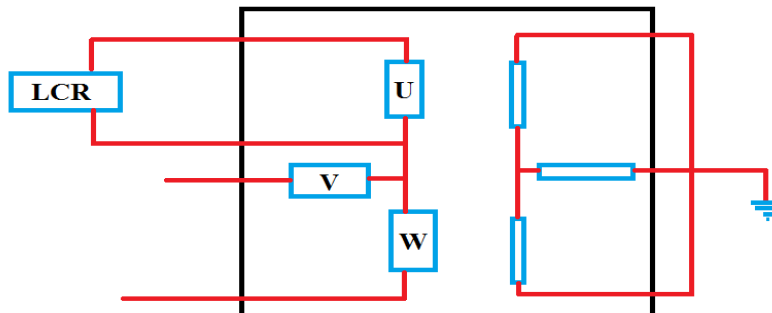
Figure(III.8): Banc d'essai Expérimental.

On a réalisé trois protocoles d'essais a savoir :

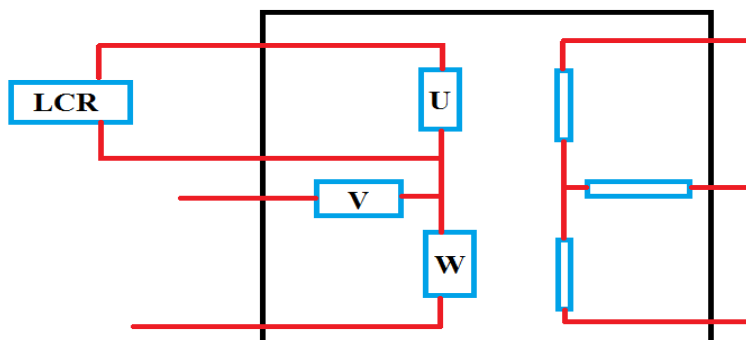
- Essai sur chaque phase de primaire, le secondaire en court-circuit :



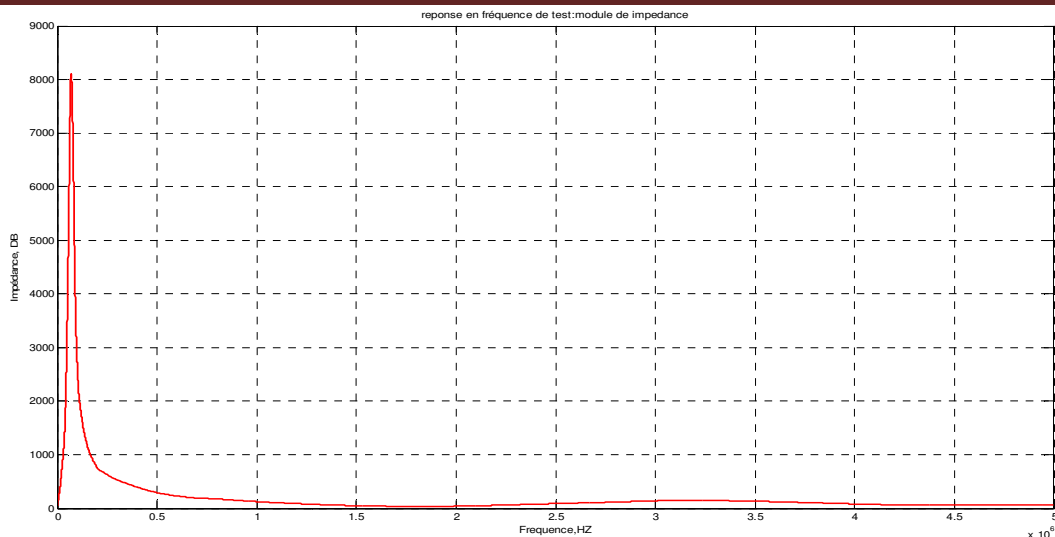
- Essai sur chaque phase de primaire, le secondaire en court-circuit mis a la terre :



- Essai sur chaque phase de primaire, le secondaire circuit ouvert :



Après l'application des tests précédents les réponses fréquentiel de chacune de phases testé .pour 3 protocoles effectués sont collectées .les reposes extraites sont utilisées pour la calcul de modèle adopté pour chacune des phases testés



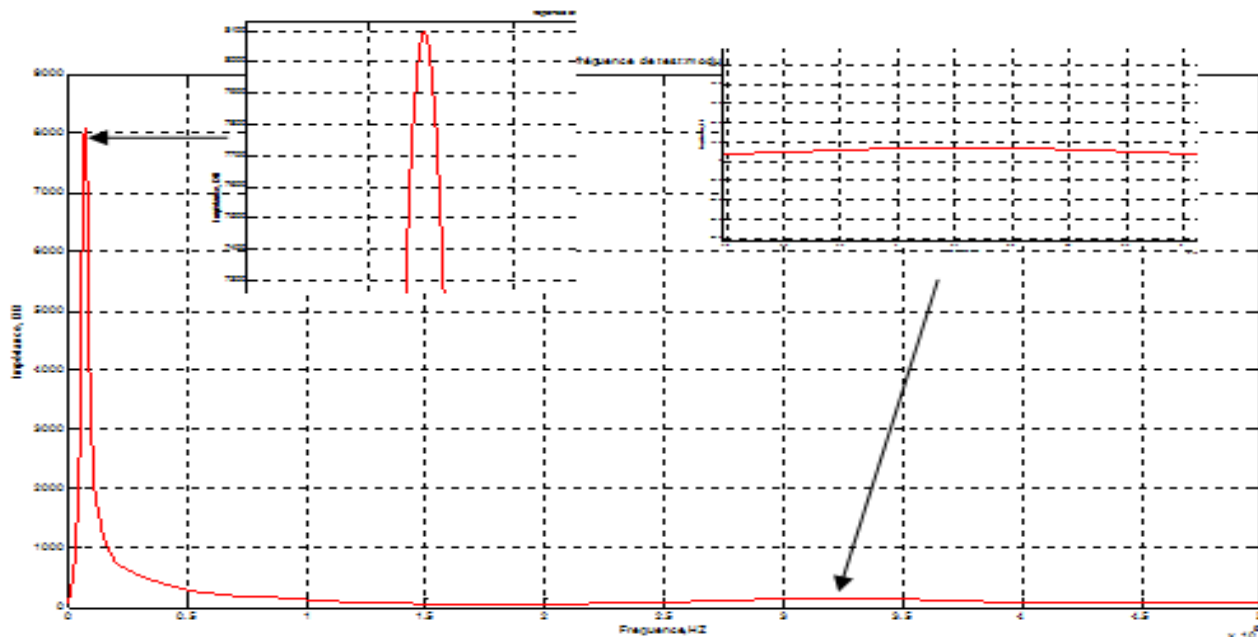
Figure(III.9) : graphe de l'impédance en fonction de fréquence

III.4.1 Calcul des éléments des cellules RLC :

après avoir effectué les test sur les phase primaire de transformateur une identification des paramètres de schéma équivalent est effectué selon l'organigramme précédent (**fig. III.6**)

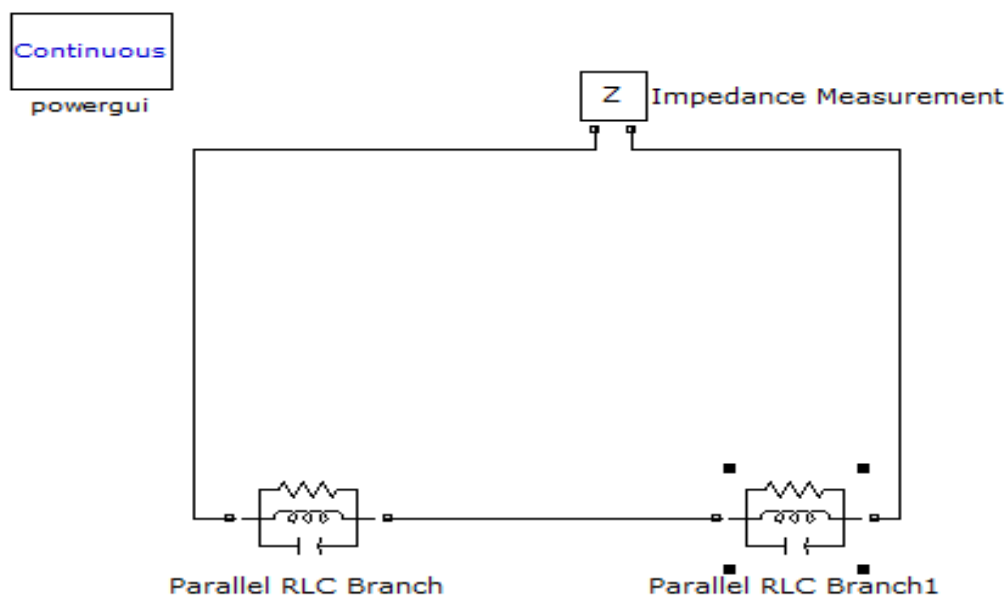
dans ce qui suit ou présenter, le travail effectuer sur une phase de transformateur et les résultats des autre phase seront regroupée du table

on prend par exemple la phase U, secondaire en court-circuit



Figure(III.10) : graphe de point de résonance de l'impédance en fonction de fréquence

L'avantage de la réponse expérimentale obtenue a donné les résultats suivantes en utilisant les équations précédant ainsi le circuit équivalent est :



Figure(III.11) : le modèle dans Matlab simulink.

La combinaison entre le repense expérimentale et celle de circuit équivalent es donnée Comme on peut bien le constaté les réponses sont en succédanés, ce qui valide le modèle adopté.

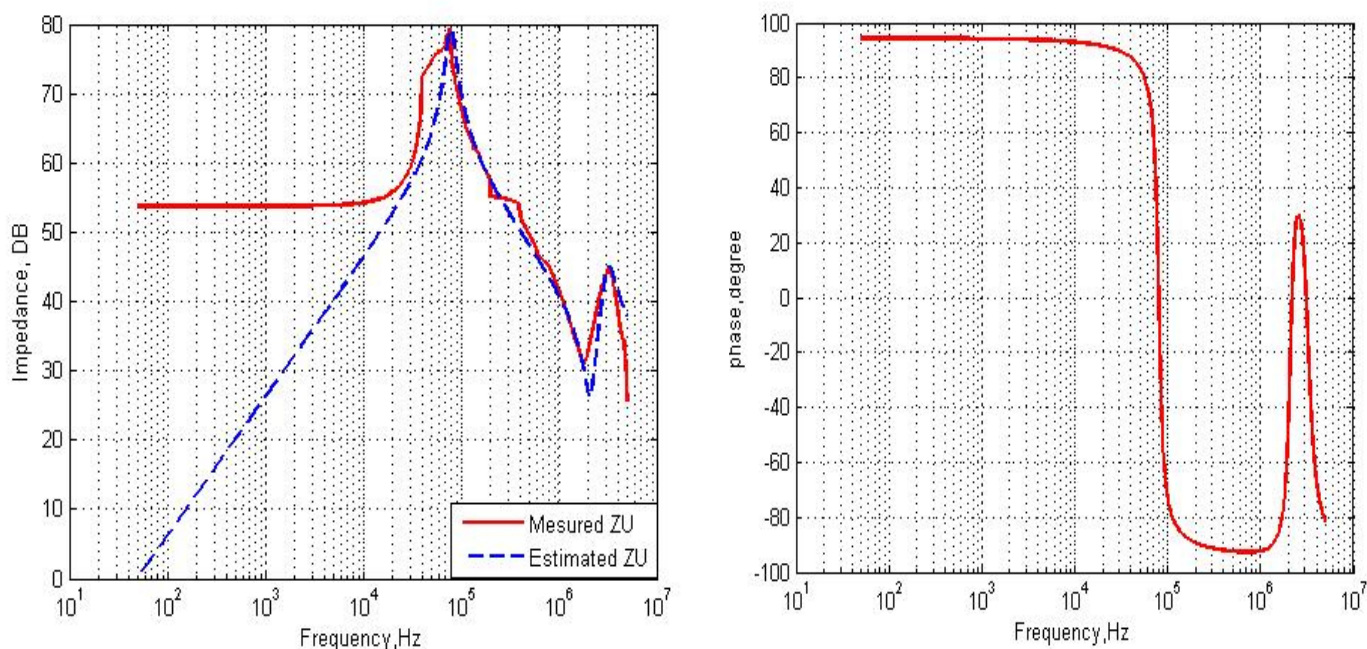


Figure (III.12) : l'impédance et phase en fonction de fréquence de phase U secondaire en court-circuit

Les résultats obtenus par le cas de la figure (III.10) considéré sont récapitulé dans les tableaux suivant :

III.4.2 La pulsation de résonance et les pulsations de demi-puissance (supérieur et inférieur) :

La première étape de l'analyse de la courbe $Z=f(f)$ est d'éliminer les pics ne présentant des valeurs inférieures et supérieures significatives ; Les bandes passantes sont calculées pour les pulsations de résonance ayant une valeur de la demi-puissance avant et après le pic de résonance.

Pour des raisons de calcul il est nécessaire de convertir les fréquences de résonance aux pulsations telle que : $\omega_0 = 2\pi f_0$

Phase U Essai secondaire en court-circuit		
ω_0 (Rad/s)	ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)
499199.072655418	501712.346778290	416261.026600648
20093626.6123603	23272918.3777932	17171945.4445218

Tableau (III .1) : pulsation de résonance et les pulsations de demi-puissance

III.4.3. Calcule la bande passante et le facteur de qualité :

Le tableau (III.2) représente les valeurs de la bande passante B et du facteur de qualité Q calculés en utilisant les équations(III.15) et (III.16) pour chaque pulsation de résonance :

Phase U Essai secondaire en court-circuit		
ω_0 (Rad/s)	B	Q
499199.072655418	85451.3201776423	5.84191176470589
20093626.6123603	6100972.93327138	3.29351184346035

Tableau (III .2) : les valeurs de la bande passante B et du facteur de qualité Q

III.4.4. Calcule des cellules R, L, C :

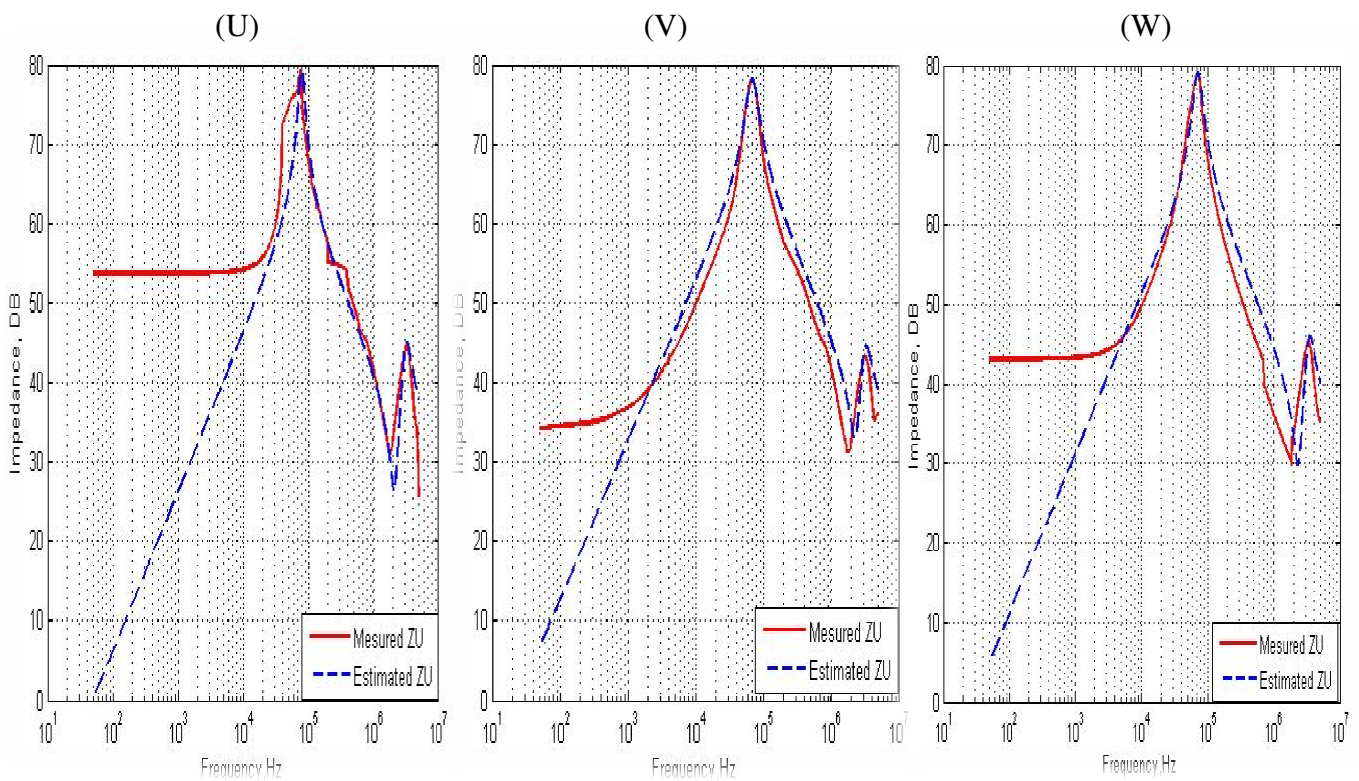
Pour l'exemple étudié, le modèle proposé présente deux cellules RLC calculés en utilisant les équations (III.9) (III.17) (III.18) , comme présentés dans le tableau(III.3) :

Phase U Essai secondaire en court-circuit		
Resistance(Ω)	L'inductance(Henry)	Capacité (Farad)
9372.70775641515	0.00321392925424809	$1.248579348586 \times 10^{-9}$
170.716134530172	$2.579627578799 \times 10^{-6}$	$9.60121805469 \times 10^{-10}$

Tableau (III.3) : R, L C des cellules

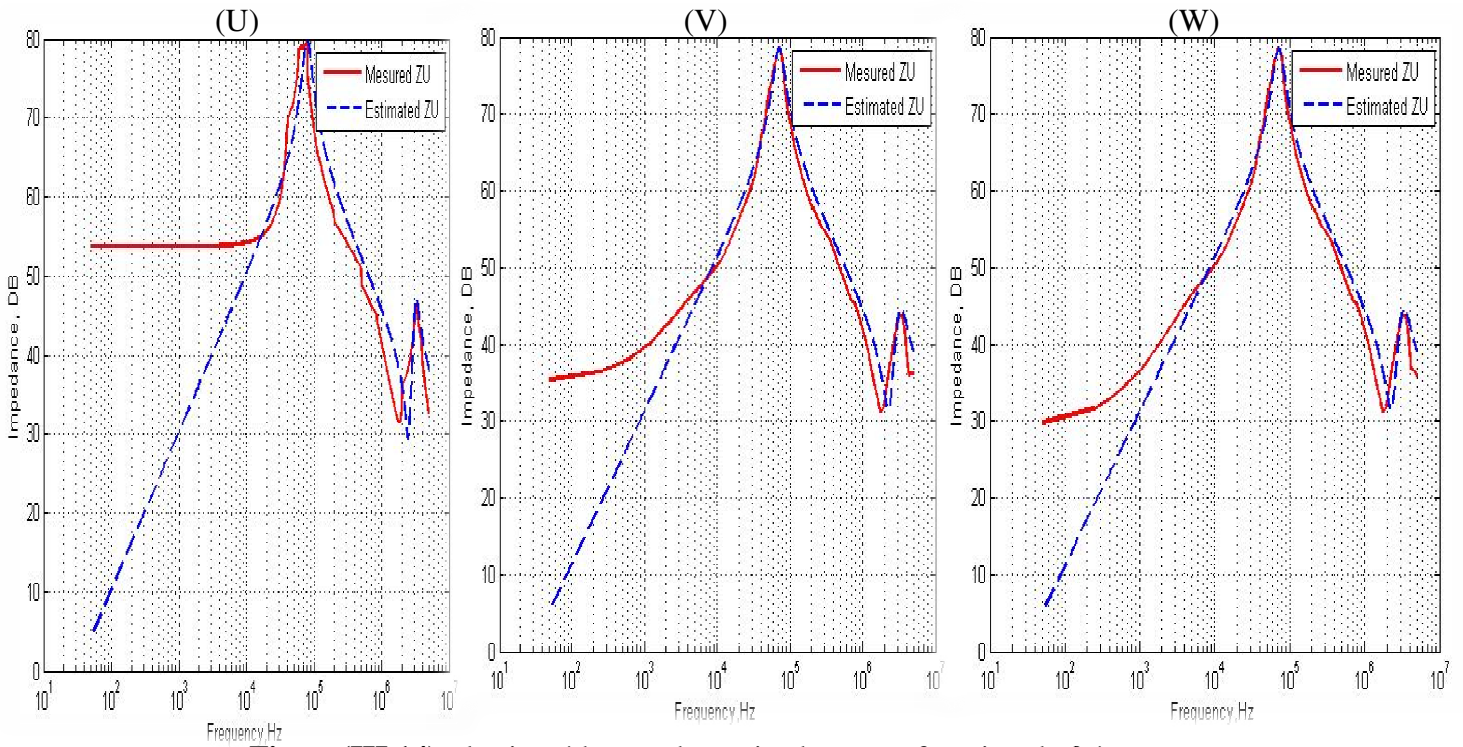
Après avoir traité le premier exemple on peut globaliser le test sur toutes les phases en tous les essais :

Essai secondaire en court-circuit :



Figure(III.13) : les impédances des les trois phases en fonction de la fréquence

Essai secondaire court-circuit mis a la terre :



Figure(III.14) : les impédances des trois phases en fonction de fréquence

Essai secondaire circuit ouvert :

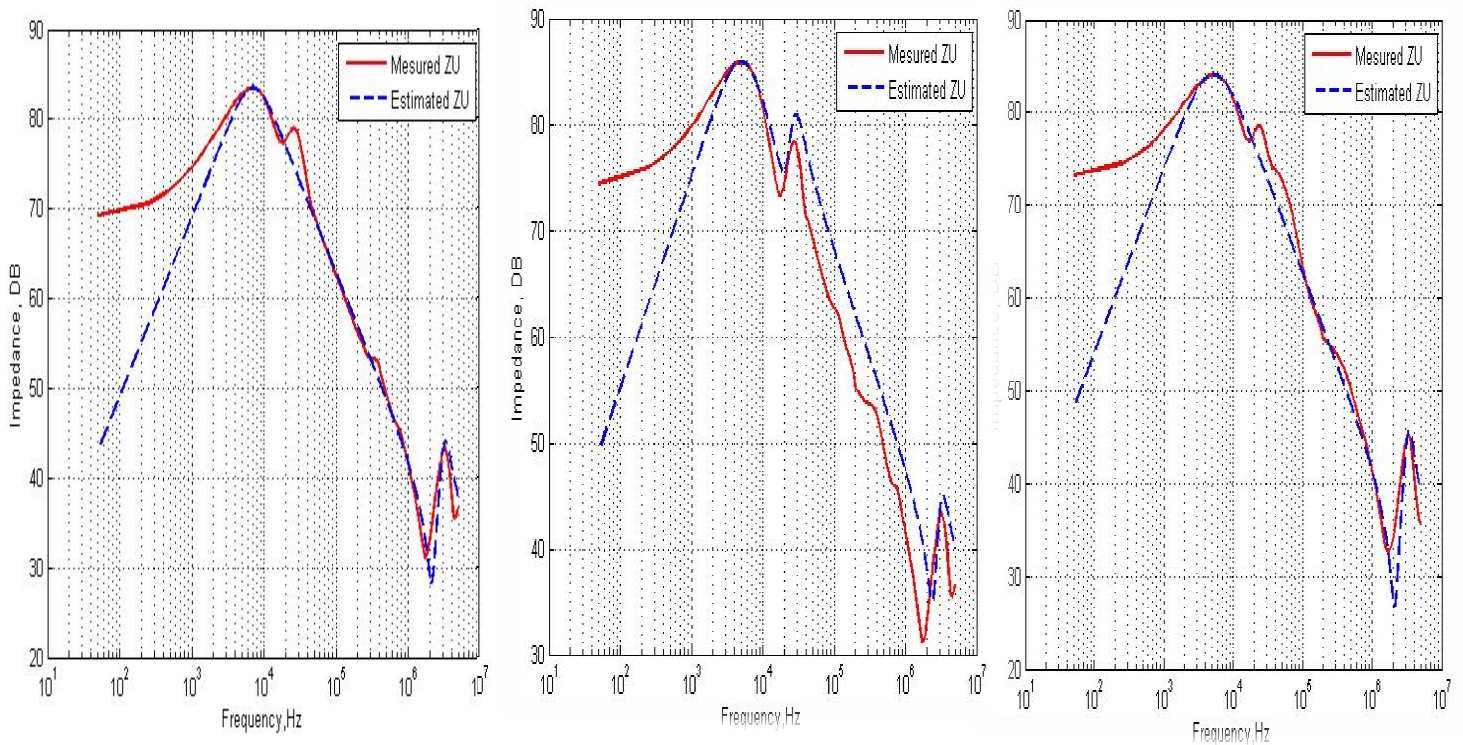


Figure (III.15) : les impédances des trois phases en fonction de fréquence

III.5. Résultats de calcul de tout les phases dans tout les essais:

Les tableaux(III.4) et Les pulsations de résonances W_0 . des trois phase dans les trois essais déterminées en utilisant les graphs dans les figures (III.13) (III.14) (III.15) .

Les résultats sont regroupées suivant l'essai après suivant la phase on voit que les point résonances sont semblable avec les graphs

Essai secondaire en court-circuit		
Phase 1	Phase2	Phase 3
W_0 (Rad/s)	W_0 (Rad/s)	W_0 (Rad/s)
499199.072655418	433853.9454	452703.5013
20093626.6123603	19873715.12	21356546.8591
Essai secondaire en court-circuit met a la terre		
Phase 1	Phase2	Phase 3
W_0 (Rad/s)	W_0 (Rad/s)	W_0 (Rad/s)
500455.7097	450190.2272	452703.5013
20112476.168	20200440.762	20213007.1331
Essai secondaire circuit ouvert		
Phase 1	Phase2	Phase 3
W_0 (Rad/s)	W_0 (Rad/s)	W_0 (Rad/s)
44296.456	31730.08580125	32986.7228
19999378.83	172473.4366820	20916723.887
-----	19942830.16498	-----

Tableau(III.4) : les pulsations de résonance.

Chapitre III : Diagnostic des défauts dans le transformateur : Modélisation, Test et Validation

Les tableaux(III.5) et Les pulsations demi puissance. des trois phase dans les trois essais calculées en utilisant les équations (III.11) (III.12) .

Les résultats aussi sont regroupées suivant l'essai après suivant la phase on voit que les point résonances sont semblable avec les graphs

Essai secondaire court-circuit					
Phase 1		Phase2		Phase 3	
ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)	ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)	ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)
5.01712×10^5	4.16261×10^5	515535.3544	358455.7217	497942.43559	368508.8182
2.32729×10^7	1.71719×10^7	23806989.128	16794954.326	24209112.988	17548936.562
Essai secondaire court-circuit met a la terre					
Phase 1		Phase2		Phase 3	
ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)	ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)	ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)
501712.3467	371022.0923	513022.0803	374792.0035	514278.7173	376048.6406
22770263.55	18950086.88	24297077.58	17228494.112	24297077.58	17234777.29
Essai secondaire circuit ouvert					
Phase 1		Phase2		Phase 3	
ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)	ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)	ω_{HI} (Rad/s)	ω_{Lo} (Rad/s)
78225.6570	19163.7151	56862.827029	11623.8928182	65659.28646	11623.89281
23719024.53	16769821.58	215199.09677	132261.050716	24171413.87	17473538.33
-----	-----	23737874.090	16719556.1024	-----	-----

Tableau(III.5) : pulsation demi puissance

Chapitre III : Diagnostic des défauts dans le transformateur : Modélisation, Test et Validation

le tableau suivant - tableau(III.6)- représente les valeur de bande passante et les de facteurs de qualité des trois phases dans les essais . ces valeur sont calculés en utilisant les équations (III.13) et (III.14)

Les résultats sont regroupées suivant l'essai après suivant la phase on voit que les point résonances sont semblable avec les graphs

Essai secondaire court-circuit					
Phase 1		Phase2		Phase 3	
B	Q	B	Q	B	Q
85451.320	5.84191	157079.632	2.762	129433.61732	3.49
6100972.93	3.29351	7012034.802	2.8342	6660176.4256	3.20
Essai secondaire court-circuit met a la terre					
Phase 1		Phase2		Phase 3	
B	Q	B	Q	B	Q
130690.254	3.82	138230.076	3.25	138230.0767579 5	3.275
3820176.66	5.26	7068583.470	2.85	7062300.28526	2.86
Essai secondaire circuit ouvert					
Phase 1		Phase2		Phase 3	
B	Q	B	Q	B	Q
59061.9418	0.75	45238.93421	0.70	54035.3936	0.6104
6949202.94	2.87	82938.04605	2.07	6697875.537	3.12
-----	-----	7018317.988	2.84	-----	-----

Tableau(III.6) : les valeurs de bande passante et facteur de qualité

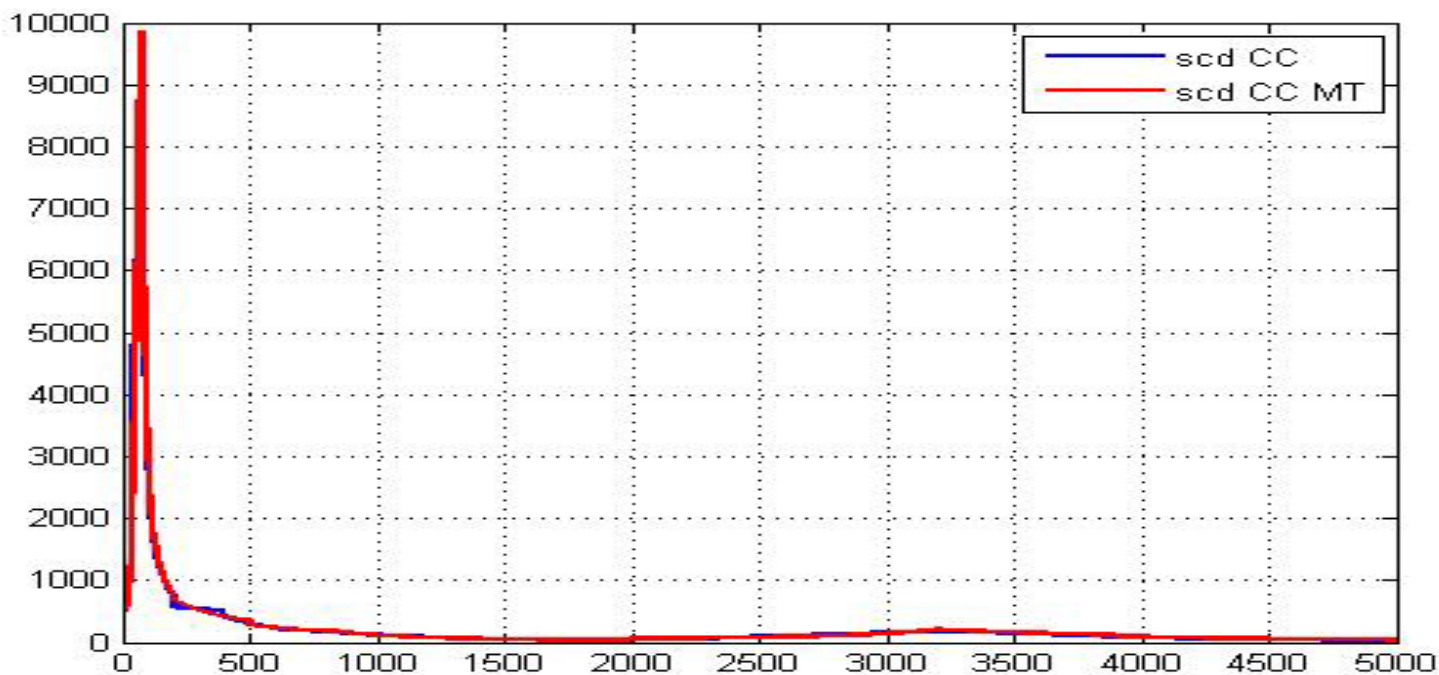
Le dernier tableau (tableau (III.7)) représente les valeurs des résistances, et les inductances et les capacités calculées en utilisant les équations (III.17) (III.18)

Les résultats sont regroupées suivant l'essai après suivant la phase . on voit que les point résonances sont semblable avec les graphs

		Resistance(Ω)	L'inductance(Henry)	Capacité (Farad)
Essai secondaire court-circuit	Phase1	9372.70775641515	0.00321392925424809	$1.248579348586 \times 10^{-9}$
		170.716134530172	$2.579627578799 \times 10^{-6}$	$9.60121805469 \times 10^{-10}$
	Phase2	8094.28151875590	0.00675477798931173	$7.865055976771 \times 10^{-10}$
		146.766861203878	$2.605637217358 \times 10^{-6}$	$9.716904416006 \times 10^{-10}$
	Phase3	8955.84452983840	0.00565621523830319	$8.626733174650 \times 10^{-10}$
		183.860331665121	$2.68479856451909 \times 10^{-6}$	$8.166316865003 \times 10^{-10}$
Essai secondaire courtcircuit met a la terre	Phase1	9860.24050076650	0.00514516627446197	$7.7601352175398 \times 10^{-10}$
		208.805456933709	$1.97194231752803 \times 10^{-6}$	$1.2536453900700 \times 10^{-9}$
	Phase2	8448.41513774868	0.00576216471970040	$8.5629262733104 \times 10^{-10}$
		152.562769815516	$2.64276936854816 \times 10^{-6}$	$9.2729740484654 \times 10^{-10}$
	Phase3	8440.93261763355	0.00569331581822204	$8.570516935502 \times 10^{-10}$
		152.574447411763	$2.63734003103930 \times 10^{-6}$	$9.2805136679829 \times 10^{-10}$
Essai secondaire circuit ouvert	Phase1	14900.8936018583	0.448520259711044	$1.1362658761994 \times 10^{-9}$
		148.378271108852	$2.57793692867948 \times 10^{-6}$	$9.698279547620 \times 10^{-10}$
		-----	-----	-----
	Phase1	19651.3363921881	0.883002558230934	$1.1248524154314 \times 10^{-9}$
		8256.84256443995	0.0230209567608611	$1.4602667501986 \times 10^{-9}$
		147.538127257198	$2.60353683485167 \times 10^{-6}$	$9.6574549736051 \times 10^{-10}$
	Phase3	15971.0381652693	0.793109448151748	$1.1587467602362 \times 10^{-9}$
		184.617526942483	$2.82632874216695 \times 10^{-6}$	$8.087047572973 \times 10^{-10}$
		-----	-----	-----

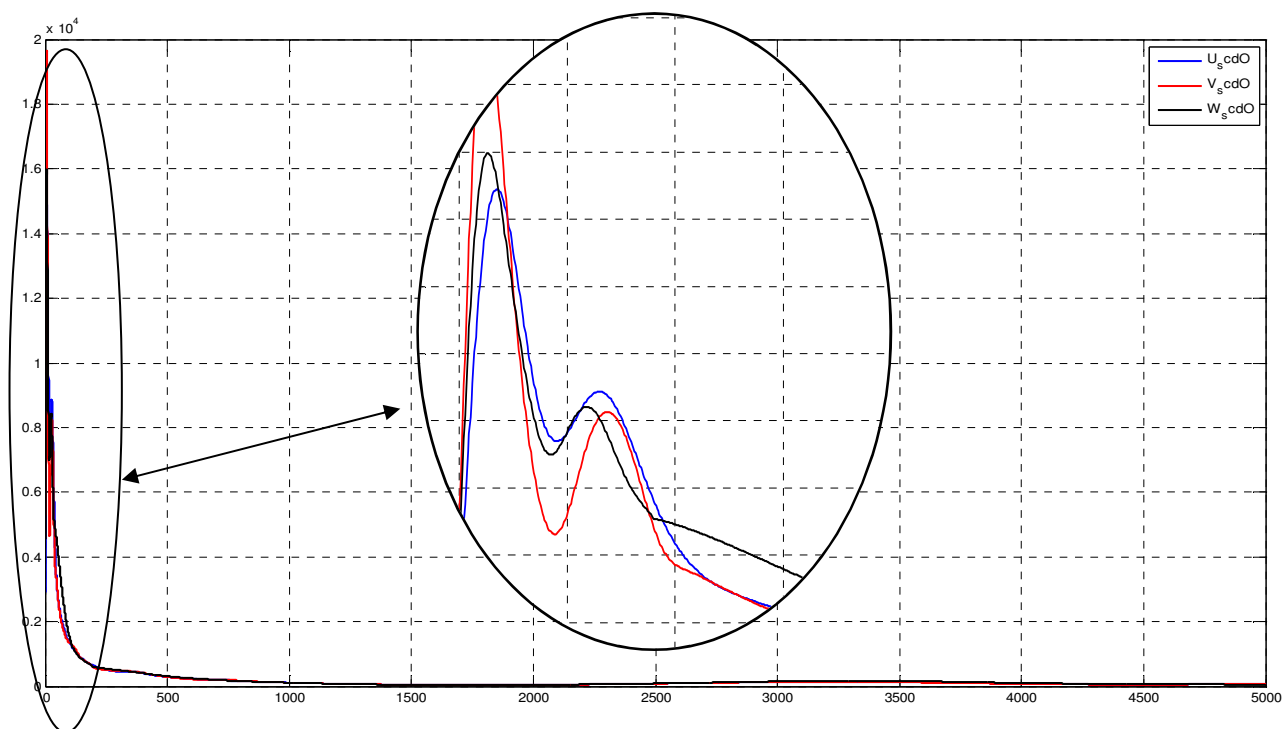
Tableau (III.7) : R, L, C des les trois phases dans tout les essais

Vérification du changement de la réponse l'impédance de premier phase :



Figure(III.16) : l'impédance de phase U en fonction de fréquence

- Identification des réponses des impédances des trois phases dans le troisième essai :



Figure(III.17) : les impédances dans les trois phases secondaire court circuit

III.5.1. Interprétation :

D'après résultats obtenue on peut tirer les points suivants :

- ✓ chaque bobinage de transformateur se comporte comme circuit résonance.
- ✓ les réponses fréquentiel des phases latérale sont identique dans les trois protocoles d'essais ceci est due a la constitution des transformatrices colonnes
- ✓ observation d'un troisième point de résonance dans la phase centrale ceci est due également a la constitution de transformateur don les colonnes latérale influe sur la colonne médiane.

III.6. Conclusion :

La constitution du schéma équivalent en se basant sur une seule et unique mesure qui est la réponse en fréquence du bobinage peut être un utile de diagnostique de défaillance.

Tout défaut est traduit par une modification de la réponse fréquentielle et par conséquent la modification des paramètres des schémas équivalents, ceci nous permettra de détecter le défaut et localiser la phase défaillant.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail rentre dans l'axe du contrôle non destructif des dispositifs Électrotechniques, on s'est intéressé au transformateur qui est un élément clé dans les réseaux Électriques.

Afin de choisir le modèle le plus approprié à notre étude, une recherche bibliographique sur le transformateur en générale ses défaut et ses méthodes de diagnostic puis sur les différents modèles du transformateur en régime HF a constitué les premières étapes de ce Travail.

Notre étude est axé sur la recherche du schéma équivalent a une phase du transformateur permutât de reproduire un repense fréquentiel mesuré. Ce schéma a été validé expérimentalement sur un transformateur de laboratoire de puissance 100VA **230/115 V**, exploité pour l'étude au niveau des laboratoire de **FSSA , université de Bouira**.

D'après l'étude amenée on 'a tiré les point suivant :

- Le bobinage des phases de transformateur se comporte comme un circuit résonnant.
- à cause de la constitution du transformateur colonne, les réponses fréquentiels des impédances des phases latérales sont semblables dans les trois protocoles d'essais.
- l'observation de l'influence des phases latérales sur la phase centrale dans le troisième essai. ceci traduit par une troisième point de résonance dans la phase centrale. cette influence du également a la constitution de transformateurs colonnes.

Comme une perspective pour ce travail :

- Utiliser le schéma équivalent adopté pour localisation des défauts en utilisant la variation du ses paramètres en fonction de défaut injecté
- Validation de modèle adopté du transformateur utilisé dans les réseaux électrique puissant, Par ailleurs, elle peut être un outil de maintenance préventive et curative pour les exploitants des transformateurs.

bibliographie :

- [1] : Brika Abdessamed ; Sahnoune chaouch Moustafa : «Diagnostic des Transformateurs de puissance par l'Analyse de la Réponse Fréquentielle (FRA)». Thèse de master .Université SAAD DEHLEB Blida (Année Universitaire 2012-2013).
- [2] : Jean Sanchez : «Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance». Autre. Université de Grenoble, 2011. Français. <NNT : 2011GRENT031>. <tel-01017179>
- [3] : FRANÇOIS MILSANT, « Électrotechnique machines électriques transformateurs Électriques ».
- [4] : document société Omicron électroniques . « FR Analyzer Manuel d'utilisation». Référence – VESD0662 Version ,Du manuel : FRA.FR, 2006.
- [5] : Formation transformateur « Formation transformateur de puissance»
- [6] : FORMATION TRANSFORMATEURS GRTE avril 2005.
- [7] : A.CAPLIEZ P.HEINY. « Technologie et schéma » tome 2.
- [8] : Essais sur les transformateurs. (www.sitelec.com/essai_transformateur.htm).
- [9] : SONELGAZ DIRECTION DE L'ÉNERGIE [GEC ALSTHOM].
- [10] : SONELGAZ-ALGÉRIE, « Documentation des accessoires »
- [11] : AMARI. Mansour, Cours Electrotechnique :« TRANSFORMATEUR TRIPHASE »
- [12] : document de société Omicron « Tests et diagnostic des transformateurs de puissance ».
- [13] : N.BERGER. : « Liquides isolantes en électrotechnique caractéristiques des propriétés » [D 471].
- [14]: T.O.ROUSE.: « Mineral isolating oil in transformers »IEEE Electrical insulation. Magazine, vol. 14, n3, may/June.
- [15] : Christophe Ferrier. :« Étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour Transformateurs de puissances-recherche d'un mélange optimal ». Thèse de doctorat. L'école centrale de Lyon (Année 2005).
- [16] : 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.
- [17] : 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.
- [18] : Anthony Lefèvre. «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs: Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires. Energie électrique. »Université de Nantes, 2006. Français. <tel-00116335>

- [19] : A. LEFEVRE –« Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs : Application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires ».
- [20] : M. KRATBI Seyf Eddine ;M. HAMADI Zakaria « Analyse des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé, basée sur l'analyse de l'impédance du transformateur » UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA
- [21] : ABDALLAH CHANANE « Thèse de Doctorat LMD En Génie Électrique Présentée par » Université YAHIA FARES de MEDEA Faculté de la Technologie Laboratoire de Recherche en Électrotechnique et en Automatique
- [22] : Gueller.B, Veverka.A, «Processus impulsionnelles dans les machines électriques», Energy, Moscou, 1973.
- [23]: Bergman, C. « SFRA- an application that creates Customer value » Thesis Département Electrical Engineering Sweden, 2006
- [24] : 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.
- [25] : Megger « 'FRAX 101 Analyzer de réponse de la fréquence de balayage» FRAX101_DS_fr_V01
- [26]: DICK,E.P.EVEN,C.C. «transformer diagnostic testing by frequency response analysis». IEEE Transactions On Power Apparatus and systems, Toronto, v.97, n.6.1978.
- [27]: BIRLASEKARAN, S.FETHERSON, F. « off/on-Line FRA condition monitoring technique for power transformers». IEEE Power Engineering review, [S.1], v.19, n.8 Aug

الملخص

هذا العمل هو دراسة ونمذجة لللفات محولات الكهرباء لتشخيصها . حيث تم اعتماد طريقة تحليل التردد العالي ، حيث تم تحويلها إلى نموذج مكون من خلايا على التسلسل ، كل خلية تتكون مقاومة وشيعة ومكتفة على التفرع ،

بعد التحقق من صحة النموذج المعتمد من خلال ثلاثة تجارب مختلفة ، عملنا دراسة تشخيصية لللفات المحول لدراسة الأعطال المختلفة في لفائفه من خلال أسلوب تحليل التردد العالي.

مفتاح الكلمات: المحولات، التشخيص، تحليل التردد.

Résumé

Ce travail est une étude et modélisation des enroulements du transformateur en vue de son diagnostic. En utilisant la méthodes de l'analyse en haute fréquence. Dont on a établi un modèle construit par des cellule RLC shunt en cascade.

Après avoir validé le modèle adopté par 3protocole d'essais différentes, nous avons l'exploités pour une étude de diagnostic de l'enroulement du transformateur. Pour étudier les différentes défaillances de l'enroulement avec la technique d'analyse fréquentielle.

Mot clés : Transformateur, Diagnostic, Analyse fréquentiel.

Summary

This work is a study and modeling of transformers windings for its diagnosis; using high frequency analysis. we establish a model making by a series of cellule of parallel RLC

After having validated the model adopted by three different protocols of tests , we operated for a diagnostic study of the transformer winding. For study the various failures of the coil with the frequency analysis technique.

Keyword: transformer, Diagnosis, frequency analysis.