REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

**Département du Génie Électrique
et de l'Informatique**



PFE

**Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master enélectrotechnique**

Option : Réseaux électriques

THEME

Extraction des paramètres du modèle mutuellement couple physiquement réalisable équivalent a un enroulement de transformateur a partir de leur impédance mesurée en régime fréquentiel.

- Proposé et dirigé par :Dr.MOUSTAFA SAHNOUNE CHAOUCHE
- Prepare et présenté par:
- Moussi Salima
- Ahlem Messelmi

AnnéeUniversitaire 2023-2024


بسم الله الرحمن الرحيم

REMERCIMENT

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.

Nos remerciements les plus profonds au *Dr. Moustafa SahnouneChaouche* pour sa suggestion et sa gestion, ainsi que pour ses efforts énormes et son soutien constant pour nous, appréciation et gratitude pour le grand confinement et la confiance accordés tout au long de notre projet de fin d'étude

Nous aimerions témoigner notre gratitude aux professeurs et enseignants de la Faculté des Sciences et de technologie qui ont assuré notre formation universitaire

Nous adressons de même nos sincères remerciements au Président et aux membres du jury pour avoir consacré leur temps à l'étude de ce travail.

Nos remerciements spéciaux vont du fond du cœur à nos chers parents pour tout ce qui a été fait pour nous. Bien sûr, sans oublier de remercier en profondeur tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci



Dédicace

A ma Mère,

« Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir. Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte. En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée.»

A mon Père,

« L'épaule solide, loeil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que Dieu te préserve et te procure santé et longue vie »

A Mes chère frères Abdel momen et Mohamed qui ont su m'encourager tout au long de ma vie.

A Mes chère sœurs Férial ; Ramilla et Fella Yousra et toute ma famille

Amon petit neveu Oussaid

A mes chers amis surtout ma chère binôme mouissisalima « yazzana » Qu'ils trouvent ici L'expression de toute ma reconnaissance. Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, sans oublier tous mes collègues de la promotion d'Electrotechnique 2023/2024. Je vous dis merci.

Messelmiahlem



Dédicace

A ma très chère mère

Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de ma mère disparu trop tôt, que Dieu te fasse miséricorde, tu as toujours m'encouragé été à mes côté Si Dieu le veut, je serai heureux de votre ce succès.

A mon très cher père

Qu'il trouve à moi la source du ça fierté, pour son soutien, son affectionne la confiance qu'il m'accordé

À ma sœur Hayat, à mon soutien qui ne tend pas , a mes sœurs Amina Fouton Fadila et mes frères , ma lumière éternelle Mohamed Abdel basate et Ishake , mes enfants sont ma vie Arafat, kesai , ilaf.

À mes amies , mes compagnes Manel Terchi , HiziaBeddad , Souad Moukhtari , RihabDjellabi , IhssaneMoukhtari , Roumaissa Taleb .

À ma chère binôme Ahlem Messelmi , Qu'ils trouvent ici L'expression de toute ma reconnaissance.

Merci d'être dans ma vie .

MOUISSI Yezzana.



ملخص:

يقدم هذا العمل بناء دالة النقل للنموذج المزدوج المكافئ لملف محول الطاقة، يعتمد على استخراج المعلمات الضرورية لدالة النقل انطلاقا من البيانات من استجابة المعاوقة في نظام التردد. يمكن أن تشكل دالة النقل أداة لتفسير الخواص الفيزيائية لملفات المحولات الكهربائية. بالإضافة إلى ذلك، تم اقتراح معلمات دالة النقل كأداة لتحديد وتقييم اعطال لف المحولات.

الكلمات المفتاحية: تحليل الاستجابة الترددية، ملفات المحولات، دالة النقل وتشخيص أخطاء الملفات

Résumé

Ce travail présente la construction de la fonction de transfert du modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur de puissance. Il s'appuie sur l'extraction des paramètres nécessaire de la fonction de transfert de données de la réponse d'impédance en régime fréquentielle. La fonction de transfert peut constituer un outil d'interprétation des propriétés physiques des enroulements du transformateur électrique. De plus, les paramètres de la fonction de transfert ont été proposé comme outil de localisation et évaluation des défaillances des enroulements du transformateur.

Mots clés : Analyse de la réponse en fréquence, enroulement du transformateur, fonction de transfert et diagnostic des défaillances de l'enroulement.

Abstract

This work presents the construction of the transfer function of the mutually coupled equivalent model to a transformer winding. It is based on the extraction of the necessary parameters of the transfer function via the impedance response measured data in frequency regime. The transfer function can be a tool for interpreting the physical properties of the electrical transformer windings. In addition, the transfer function parameters have been proposed as a tool for locating and assessing the transformer winding failures.

Keywords: Frequency response analysis, transformer winding, transfer function and winding faults diagnosis.

Table des matières

Résumé.....I

Table des Matières.....II

Liste du Figure V

Liste du Tableau VI

Liste des abréviation.....VII

Introduction général 1

Chapitre I :Généralités sur les transformateurs électriques

I.1 Introduction 4

I.2 Présentation générale des transformateurs 4

I.2.1 Historique 4

I.2.2. Définition 5

I.2.3 rôle de transformateur 5

I.3. Constitution générale d'un transformateur 6

I.3.1. Circuit magnétique 6

I.3.1.a. Type cuirassé 7

I.3.1.b. Type à colonnes 7

I.3.2. Circuit électrique 8

I.3.2.a. Bobinage concentrique simple 8

I.3.2.b. Bobinage concentrique double 8

I.3.2.c. Bobinage à galette 9

I.3.3. Cuve 9

I.4. L'isolation dance les transformateurs 9

I.4.1. Isolation cellulosique 10

I.4.2. Isolation liquide 10

I.5. Principe d'un transformateur 11

I.5.1 Principe de base 11

I.5.2 Principe de fonctionnement.....11

I.5.3 Schéma électrique équivalent.....13

I.5.4. Diagrammes de Kapp 14

I.6 les Types de transformateur 15

I.6.1.Transformateurs de transmission 15

I.6.2.Transformateurs de distribution 16

I.6.3-Transformateurs de type sec 16

I.6.4. Transformateurs immergés dans l'huile 17

I.6.5. Autotransformateurs 17
I.7-Le système de refroidissement 18
I.8. Défauts fréquents dans les transformateurs 19
I.8.1. Défaut d'isolement de la partie active 19
I.8.2. Amorçage diélectrique entre spires 19
I.8.3. Court-circuit entre spires 20
I.8.4. Décharges Partielles 20
I.8.5. Coupure du circuit électrique 21
I.8.6. Déformation géométrique des enroulements 21
I.9. Protection et surveillance de transformateur de puissance 22
I. 9.1. Différents types de protections 22
I.9.1.1. Protections internes 22
I.9.1.2. Protections externes 25
I.9.1.3. Protection différentielle 26
I.10. Conclusion 26

Chapitre II:modélisation fréquentielle des enroulements du transformateur en vue de l'analyse de la réponse FRA

II.1. Introduction 26
II.2 L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) 26
II.2.1 Définition 26
II.2.2 Principe de la méthode 26
II. 3. Objectifs des mesures par FRA 27
II.4. Quand faut-il faire un test FRA 28
II.5 Théorie fondamentale de la FRA 28
II.6 Méthode de mesure FRA 28
II.6.1 Essai entre extrémités 28
II.6.2 Essai en court-circuit 29
II.6.3 Essai capacitif entre enroulements 30
II.6.4. Essai inductif entre enroulement 30
II.7 L'équipement de mesure 31
II.7.1 Le FR Analyzer 31
II.7.2 Connecteurs et commandes 31
II.7.3 Câbles pour les essais 32
II.7.4 Le logiciel d'analyse et d'interprétation 33
II.8. Quand mesurer un FRA 33
II.9. Méthodes d'interprétation 34

II.9.1 Interprétation méthodologique 34

II.9.2 Domaine de fréquences pour les interprétations 34

II.10. Modélisation des transformateurs électriques en régime des hautes fréquences 34

II.10.1. Modèle en cascade des circuits RLC parallèle 35

II.10.2. Le modèle mutuellement couplé 35

II.11 Conclusion 37

Chapitre III:Construction de la fonction de transfert du modèle de l'enroulement à partir de leur réponse d'impédance mesurée

III.1. Introduction 38

III.2 Circuit équivalent à haute fréquence mutuellement couplé de l'enroulement du transformateur 38

III.3. Procédure d'extraction des paramètres du bobinage à partir de ses valeurs mesurées DPI 39

III.3.1 Extraction de l'inductance équivalente et de la résistance en courant continu de DPI 41

III.3.2. Extraction de la capacité équivalente dans la gamme HFR 42

III.3.3 Extraction des fréquences naturelles ouvertes et courtes dans la gamme MFR 42

III.3.4. Procédure de détermination de la fonction de transfert du modèle mutuellement couplé de l'enroulement 43

III.3.5. Procédure d'estimation des paramètres du modèle mutuellement couplé par la méthode d'interprétation de la morphologie de la réponse d'impédance de l'enroulement du transformateur 45

III.4 Procédure de détermination des paramètres de la fonction de transfert 45

III.5. Investigation des défauts de court-circuit en utilisant le modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur 48

III.5.1. Procédure de détermination du pourcentage du nombre de spires court-circuités dans chaque disque d'enroulement 48

III.6. Simulation des défauts de court-circuit pour les différents disques de l'enroulement 49

III.6.1. Evaluation de la gravité des défauts de court-circuit dans les disques de l'enroulement 52

III.7 Conclusion 56

Conclusion générale 54

Référeces ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Liste des Figures

Figure. I.1 : Schéma des transformateurs dans un réseau de transport électrique 5
Figure I.2. Transformateur de puissance. 6
Figure I.3: Transformateur cuirassé 7
Figure I.4: Transformateur à colonnes. 8
Figure I.5 : La cuve d'un transformateur de puissance 9
Figure I.6. Exemple d'un système d'isolation typique avec des barrières en papier séparées par de l'huile 10
Figure I.7 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance..... 11
Figure I.8 : Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel 13
Figure I.9 : Diagrammes de Kapp 14
Figure I.10 : Transformateurs de transmission 15
Figure I.11 : Transformateur de distribution. 15
Figure I.12 : Transformateur de type sec 16
Figure (I.12) : Transformateur immerge dans l'huile 16
Figure I.13 : Schéma équivalent d'un autotransformateur. 17
Figure I.14 : Amorçage entre enroulements. 18
Figure I.15 : Amorçage entre spires, sans court-circuit. 19
Figure I.16 : Court-circuit entre spires 19
Figure I.17 : Décharges partielles sur des cales. 20
Figure I.18 : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur 20
Figure I.19 : Déformation mécanique d'un Enroulement 21
Figure. I.20 : Schéma de fonctionnement de Relais BUCHHOLZ 22
Figure. I.21 : Placement de TC tore **Figure I.22** : Protection masse cuve 23
Figure. I.23 : Dispositif DGBT 23
Figure I.24 : Eclateur **Figure I.25 :** Parafoudre 24
Figure I.26: Schéma de fonctionnement de la protection différentielle 25
Figure II.1 Modèle d'un enroulement de transformateur 27
Figure.II.2. Théorie Et Fondamental De FRA 28
Figure II.3 Essai entre extrémités 29
Figure. II.4 Essai en court-circuit 30
Figure.II.5 Essai capacitif entre enroulements 30
Fig. II.6 Essai inductif entre enroulements 31
Figure II. 7 : Vue de la face avant du FR Analyzer 32
Figure II. 8 : Vue de la face arrière du FR Analyzer 32

Figure II. 9: Bon raccordement à la terre. **Figure II. 10 :** Mauvais raccordement à la terre 33

Figure II. 11. Fenêtre principale du logiciel Le logiciel FR Analyzer analyse les résultats du test en calculant la différence de deux traces de test comparables .....**Erreur ! Signet non défini.**33

Figure II.12: Modèle en cascade des circuits RLC parallèle du transformateur triphasé 35

Figure II.13: Modèle mutuellement couplé équivalent à deux enroulements du transformateur 36

Figure III.1 : Modèle de circuit équivalent mutuellement couplé de l'enroulement de transformateur.....39

Figure III.2: Décomposition de la réponse fréquentielle FRA.....40

Figure III.3. Procédure d'extraction de l'inductance équivalente de l'enroulement dans la gamme basse fréquence.....41

Figure III.4 : Modèle HFR équivalent à un enroulement du transformateur**Erreur ! Signet non défini.**42

Figure III.5. Procédure de calcule de FT du modèle mutuellement couplé équivalent à l'enroulement du transformateur.....43

Figure III.6. La courbe de réponse en fréquence mesurée.....45

Figure III.7 : Diagramme de Bode de la fonction de transfert calculée 46**Erreur ! Signet non défini.**

Figure III.8. La comparaison entre la réponse fréquentielle mesurée et simulée de la fonction de transfert développée.....46

Figure III.9. Les réponses d'impédances de l'enroulement du transformateur pour les défauts de court-circuit, (a) : défauts 5% dans les disque1, 2, 3 et 4, (b) : défauts 10% dans les disque1, 2, 3 et 4, (c) : défauts 15% dans les disque1, 2, 3 et 4 et (d) : défauts 20% dans les disque1, 2, 3 et 4.....49

Figure (III.10) : L'allure de facteur K de la FT de l'enroulement du transformateur pour les défauts de court-circuit, (a) : défauts 5% dans les disque1, 2, 3 et 4, (b) : défauts 10% dans les disque1, 2, 3 et 4, (c) : défauts 15% dans les disque1, 2, 3 et 4 et (d) : défauts 20% dans les disque1, 2, 3 et 4.....51

Figure III.11: L'allure de l'angle de la pente θ (°) en fonction de Leq de l'enroulement du transformateur pour les défauts de court-circuit, (a) : défauts 5% dans les disque1, 2, 3 et 4, (b) : défauts 10% dans les disque1, 2, 3 et 4, (c) : défauts 15% dans les disque1, 2, 3 et 4 et (d) : défauts 20% dans les disque1, 2, 3 et 4 52

Liste de tableau :

Tableau (III-1) : Complexes de paires conjugués pôles et zéros dans (M. rad/s)

Tableau (III.2) : Résultats de simulation lors des différents défauts de cc

R : La résistance

L : L’inductance

C : La capacité

f : Fréquence

f0 : La fréquence des résonance

rg : Résistance interne de générateur

cg : Capacité shunt

cs : Capacité série

Rs : Résistance en parallèle avec la capacité série

icg : Courant dans la capacité shunt

ics : Courant dans la capacité série

Rdc : Résistance mesurée en courant continu

Leq : Inductance à noyau d'air équivalente

kHz : killo Hertz

Ceq : La capacité équivalente de l’enroulement

Scnfs : Fréquences de résonance correspond un court-circuit

O$cnfs$: Fréquences de résonance correspond un circuit ouvert

FRA : technique d’analyse de la réponse fréquentielle

FRA-SMI : Frequency Response Analysis Signal Morphology Interpretation

LFR : Low Frequency Response

MFR : Medium Frequency Response

HFR : High Frequency Response

Te : La période d’échantillonnage

T : La période

Introduction général

Introduction général :

Sur une certaine distance et/ou une certaine puissance, la transmission de l'énergie électrique doit s'effectuer à une tension suffisamment élevée. En fait, la puissance est le produit de la tension et du courant. Pour une puissance donnée, plus la tension est élevée, plus le courant est faible. Il en résulte des pertes Joule et la section du conducteur devient plus petite.

Les transformateurs de puissance sont sans aucun doute les dispositifs qui ont conduit à l'essor du et à la domination ultérieure des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique.

La fonction principale du transformateur est d'augmenter la tension de transmission (abaisseur) de sorte que Le courant est réduit, réduisant ainsi les pertes Joule générées dans la ligne. Cette altitude est bonne On dit que cela va de pair avec la réduction de la tension au point d'utilisation d'un point de vue Plus généralement, les transformateurs sont un élément essentiel dans l'interconnexion des différents réseaux d'énergie.

Les pannes de transformateur, bien que rares compte tenu du nombre d'appareils en service, font souvent des ravages en termes de coûts de réparation, mais sont souvent encore plus graves en termes d'indisponibilité du réseau associé. Cela semble donc évident lorsqu'on démarre une maintenance préventive. [1]

En mettant en œuvre des méthodes de test et de diagnostic, vous pouvez surveiller et identifier les premiers symptômes de panne pouvant survenir lors de la phase de maintenance du réseau.

C'est pourquoi les recherches se concentrent actuellement sur l'augmentation du potentiel du diagnostic de l'état des transformateurs, qui est l'un des outils de développement de l'assistance électrotechnique.

L'analyse de la réponse en fréquence (communément appelée technique FRA ou SFRA) est une méthode efficace et sensible pour tester l'intégrité mécanique des circuits magnétiques, des enroulements et des porteurs à l'intérieur des transformateurs de puissance.

Les travaux présentés dans cette thèse incluent la construction d'un modèle physiquement réalisable équivalent à un enroulement de transformateur qui est largement utilisé dans l'analyse et l'interprétation des propriétés électromagnétiques des transformateurs.

Cependant, la construction de ce modèle repose sur l'extraction de paramètres clés de la bobine tels que : fréquences de résonance et d'antirésonance, inductance équivalente et capacité équivalente directement à partir de la courbe d'impédance mesurée sur une plage de fréquences. Par conséquent, les paramètres sont estimés en utilisant uniquement l'algorithme d'optimisation (BA) via la morphologie du signal FRA. De plus, le modèle construit a été validé expérimentalement sur des bobines réelles, où les résultats de simulation ont été comparés aux résultats de mesure et étaient très cohérents. Après avoir confirmé le transformateur réel. Le mémoire a été subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude théorique sur les transformateurs de puissance, portant sur le rôle, le fonctionnement, la constitution, les moyens de protection contre les défaillances, les défauts fréquents dans les transformateurs.

Une étude préliminaire au modèle mutuellement couplé équivalent aux enroulements du transformateur et leur rôle dans l'analyse et l'interprétation de réponse de l'enroulement dans le domaine fréquentiel est réalisée et discutée au chapitre 2.

Le dernier chapitre présente Une fonction de transfert est un outil mathématique utilisé pour représenter le comportement d'un système linéairement invariant (TI) en réponse à un signal d'entrée. La relation mathématique entre l'entrée d'un système (représentée par la variable u) et sa sortie (représentée par la variable y) peut être décrite dans le domaine fréquentiel. La fonction de transfert est souvent exprimée comme une fraction rationnelle d'une variable complexe.

En résumé, la fonction de transfert est un outil mathématique puissant et flexible pour analyser et concevoir des systèmes linéaires invariants. La capacité de décrire la relation entre l'entrée et la sortie d'un système dans le domaine fréquentiel la rend essentielle dans divers domaines de l'ingénierie et de la science. En résumé, l'estimation des paramètres des enroulements du transformateur à l'aide de leur fonction de transfert est une méthode robuste et précise. Analyser et optimiser les performances du transformateur. En exploitant la relation entre la fonction de transfert et les paramètres du bobinage, cette méthode permet de déterminer des propriétés électriques importantes telles que l'inductance, la résistance et la capacité parasite. Cela facilite la conception de la fonction de transfert de l'enroulement du transformateur.

Chapitre I

Généralités sur les transformateurs électriques

I.1 Introduction :

Le transformateur de puissance est un composant électrique haute tension indispensable au fonctionnement des réseaux électriques, il fonctionne depuis de nombreuses années dans diverses conditions environnementales, électriques et mécaniques. L'apparition d'un défaut dans le système provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, ce qui provoque dans celui-ci des champs parasites. Ces champs de déflexion créent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur. Par conséquent, la structure mécanique et les enroulements du transformateur sont soumis à de fortes contraintes mécaniques. Les transformateurs peuvent également être soumis à des contraintes pendant le transport et l'installation ainsi qu'aux changements cycliques de la température ambiante. Les contraintes appliquées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et noyaux magnétiques [1]. Ce qui suit présentera une étude théorique détaillée des transformateurs ainsi que de ces défauts et moyens de protection.

I.2 Présentation générale des transformateurs :

I.2.1 Historique :

Michael Faraday a construit l'élément de base du premier transformateur en 1831. Cependant, il ne l'a utilisé que pour démontrer le principe de l'induction électromagnétique et n'a pas imaginé ses applications ultimes [2]. Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs furent les premiers à introduisit un dispositif appelé « générateur secondaire » à Londres en 1881 et vendit plus tard l'idée à la société américaine Westinghouse. >Il s'agit peut-être du premier transformateur électrique à être mis en pratique. Ils présentèrent également cette invention à Turin en 1884, où elle fut utilisée comme système d'éclairage électrique. Les premiers appareils utilisaient un noyau de fer ouvert, qui fut rapidement abandonné au profit d'un noyau circulaire plus efficace avec un circuit magnétique fermé. L'ingénieur de Westinghouse, William Stanley, a construit le premier appareil pratique en 1885 après que George Westinghouse ait acheté le Brevet Gaulard et Gibbs. Le noyau est constitué de plaques de fer imbriquées en forme de E. Cette version a été commercialisée pour la première fois en 1886 [3]. Les ingénieurs hongrois KárolyZipernowsky, OttóBláthy et MiksaDéri, de la société Ganz à Budapest en 1885, ont créé un modèle très efficace basé sur Gaulard et Gibbs [4].

L'ingénieur russe Mikhaïl Dolivo-Dobrovolsky a développé le premier transformateur triphasé en 1889 [3].

I.2.2. Définition :

Un transformateur est une machine électrique statique utilisée pour convertir une tension alternative (courant) en une autre tension alternative (courant) avec la même fréquence et généralement une amplitude différente pour s'adapter aux différents besoins d'utilisation [5].

On peut l'appeler un transducteur inductif statique doté de deux bobines fixes ou plus, couplées par induction et utilisé pour convertir, par induction électrique magnétique, les paramètres (tension, intensité du courant, fréquence, nombre de phases) de l'énergie électrique CA.

Seuls les transformateurs de puissance peuvent minimiser les pertes en ligne de manière très économique en assurant la transmission de l'énergie sur de longues distances sous de hautes tensions (200kV et 400kV ou plus entre phases), puis réduire cette tension progressivement jusqu'au niveau fourni au réseau électrique. Distribution régionale et locale, adaptée à la tension d'alimentation domestique.

I.2.3 rôle de transformateur :

Un transformateur est un appareil qui transfère l'énergie électrique d'un réseau à un autre en modifiant ses caractéristiques : intensité et tension (Figure I.1).

Les transformateurs peuvent augmenter la tension à la sortie des centrales électriques pour le transport longue distance afin de réduire les pertes en ligne et réduire les pertes à l'arrivée pour s'adapter à la demande des consommateurs [6].

Un autre rôle important des transformateurs installés dans le réseau énergétique contribue à ajuster le niveau de tension en fonction des conditions de charge du réseau. Ceci est réalisé en modifiant leur taux de conversion à l'aide d'un changeur de prises.

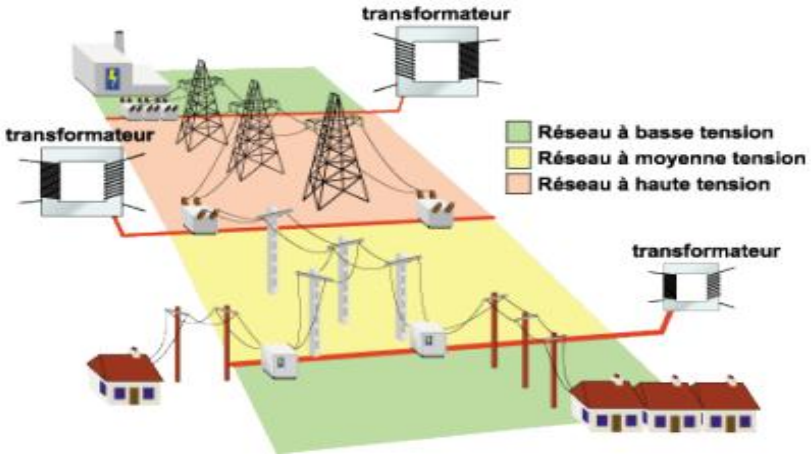


Figure. I.1 : Schéma des transformateurs dans un réseau de transport électrique

I.3. Constitution générale d'un transformateur :

Le transformateur de puissance figure I.2, se compose essentiellement d'un circuit magnétique et circuit électrique :



Figure I.2. Transformateur de puissance.

I.3.1. Circuit magnétique :

Le noyau est constitué d'un empilement de plaques ferromagnétiques hautement perméables avec des cristaux orientés, isolés électriquement les uns des autres. Il doit être conçu pour réduire les pertes par courants de Foucault et l'hystérésis qui se produisent lors des variations périodiques du flux magnétique.

- ✓ Utiliser de l'acier doux magnétique avec une petite surface de cycle d'hystérésis et une faible perte d'hystérésis ;
- ✓ Utiliser des aciers spéciaux. Grâce aux additifs. Haute résistivité ;
- ✓ Utiliser des plaques dont l'épaisseur est choisie de manière à ce que les courants de Foucault ne soient pratiquement pas affectés.

En fonction de la forme du circuit magnétique. Il existe deux réglementations principales :

I.3.1.a. Type cuirassé :

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

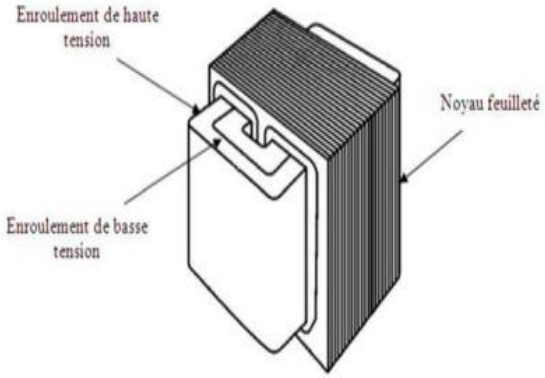


Figure I.3: Transformateur cuirassé

I.3.1.b. Type à colonnes :

Les transformateurs de colonne sont constitués de deux enroulements concentriques par phase. Ces bobines sont montées sur un noyau ferromagnétique, fermé à ses extrémités par des broches pour assurer une bonne transmission du flux magnétique. Dans cette technologie, les bobines elles-mêmes entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume du fil. Cette disposition, plus simple que la

précédente, est utilisée pour les transformateurs haute tension et de grande capacité. Les bobines peuvent être disposées sur un circuit magnétique constitué de trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est appelé flux forcé. Si le déséquilibre est important, utiliser un transformateur à quatre ou cinq colonnes, dont trois enroulées, les colonnes restantes servent à renvoyer le courant

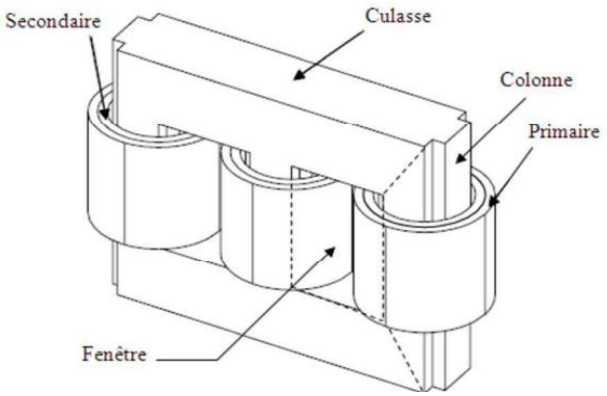


Figure I.4: Transformateur à colonnes.

I.3.2. Circuit électrique

Pour les transformateurs de base tension et faible puissance, les enroulements primaire et secondaire sont constitués par des bobines en file de cuivre émaillée, chaque couche étant isolée de la suivante par du papier. Pour les appareils à haute tension et grande puissance, les bobines, quelques fois fractionnées en galettes, sont constitués par du fil rond ou méplat isolé au carton imprégné et séparées par des isolants tels que fibre, mica…etc. [8].

On distingue trois dispositions principales des bobines sur les noyaux.

I.3.2.a. Bobinage concentrique simple :

Le bobinage basse tension est enroulé sur le noyau et après isolement et recouvert par le bobinage haut tension.

I.3.2.b. Bobinage concentrique double :

La moitié de bobinage haute tension et enroulée sur le noyau et isolée, puis en enroule le bobinage haut tension et en isole et en fin, en termine par la deuxième moitié du bobinage basse tension. Autrement dit, le bobinage haut tension est en sandwich entre les deux moitiés basse tensions.

I.3.2.c. Bobinage à galette :

Les bobinages hauts et bas sont fractionnés et constitués par des couronnes ou galettes qui sont enfilées alternativement sur les noyaux. Parfois pour les transformateurs à fort intensité, les bobinages sont calés a l'aide de ressort permettant de légers déplacement dans le cas de fortes actions électrodynamique

I.3.3. Cuve :

Le réservoir du transformateur est en tôle d'acier. Ils doivent pouvoir résister aux efforts appliqués lors du transport du transformateur. Leur boîtier peut être démonté et scellé par boulons ou soudure.

Le réservoir est testé sous vide pour vérifier ce point. De plus, pour résister aux conditions extérieures, les réservoirs sont peints avec un revêtement anticorrosion [9]. De plus, pour les transformateurs de forte puissance et de débit, les fuites deviennent très importantes, pour éviter une surchauffe des transformateurs.

Le transformateur, les enroulements ou les réservoirs, qui sont liés aux courants de Foucault induits à l'intérieur d'eux, des écrans sont placés à l'intérieur de la paroi du fût. Ils conduisent le flux et empêchent ainsi le flux de pénétrer dans d'autres pièces et empêchent ainsi leur échauffement par courants de Foucault. Comme les circuits magnétiques, pour éviter la circulation du courant, il est important qu'ils soient mis à la terre en un seul point.



Figure I.5 : La cuve d'un transformateur de puissance

I.4. L'isolation dance les transformateurs :

L'isolant, qu'il soit solide ou liquide, doit permettre au transformateur de résister aussi bien aux tensions alternatives en régime permanent qu'aux surtensions transitoires sans

formation d'arc. Pour ce faire, le champ électrique dans le transformateur doit être homogénéisé. L'isolation solide est principalement constituée de cellulose, l'isolation liquide est généralement constituée d'huile [10].

I.4.1. Isolation cellulosique :

Le papier isolant est fabriqué en empilant des couches de papier les unes sur les autres, en les trempant dans l'huile puis en les séchant. À ce moment-là, les pores du papier atteindront une dureté diélectrique élevée, une faible perte diélectrique et une constante diélectrique proche de la constante diélectrique de l'huile. Il convient de noter que le papier

Combiné à l'huile possède des propriétés diélectriques bien meilleures que le papier ou l'huile seuls. La présence d'humidité dans l'isolant est très nocive pour ses propriétés. Cette isolation est ensuite placée dans le transformateur entre l'enroulement et le réservoir en utilisant une technique de barrière, c'est-à-dire que de fines couches d'isolation sont intercalées avec de l'huile. Le papier isolant a la propriété d'absorber de grandes quantités d'humidité. Cela réduit ses propriétés diélectriques et augmente considérablement sa masse. L'isolant doit donc être séché avant d'être placé dans le réservoir.

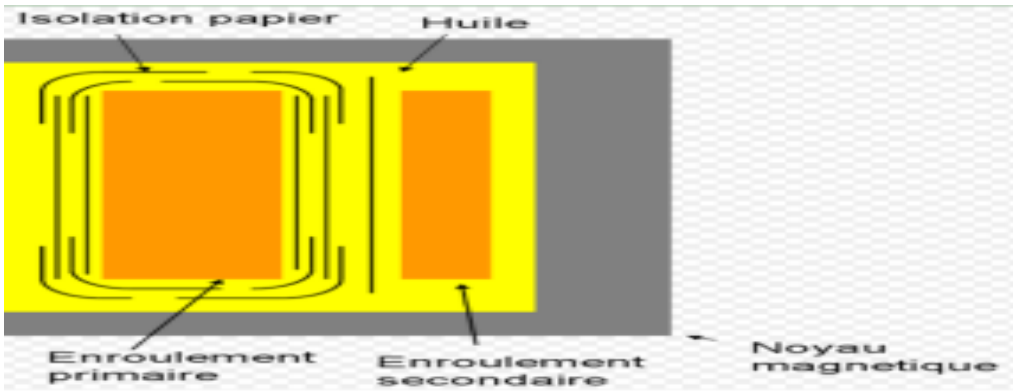


Figure I.6. Exemple d'un système d'isolation typique avec des barrières en papier séparées par de l'huile

I.4.2. Isolation liquide :

Les transformateurs de puissance sont généralement remplis d'huile minérale spécifique. Il permet l'isolation des bobinages les uns des autres, ainsi que le refroidissement du transformateur. Il a en fait une rigidité diélectrique nettement supérieure à celle de l'air. L'huile est un bon conducteur de chaleur et sa circulation à travers le radiateur permet d'évacuer la chaleur générée par les bobinages et le circuit magnétique du transformateur. Il

doit avoir un haut degré d'isolation et un point d'inflammation élevé pour permettre un fonctionnement sûr [11].

Pour éviter de graves conséquences écologiques en cas de fuite d'huile, un conteneur-citerne est installé sous le transformateur

I.5. Principe d'un transformateur :

I.5.1 Principe de base :

Loi de Faraday :

Un changement de courant dans un virage créera une force électromotrice. A l'inverse, une variable

f.e.m dans un tour provoquera une modification du débit qui la traverse.

e = - dφ/dt et si N tourne : e = - N *dφ/dt

Loi de Lenz :

La force électromotrice est causée par un changement du flux magnétique dans une direction telle qu'elle crée un courant qui le traverse et crée un flux magnétique dans la direction opposée au flux qui l'a créé ou simplement plutôt que dans la direction de la f.e.m. induite c'est qu'il s'oppose à la cause qui l'a donné naissance [12]

I.5.2 Principe de fonctionnement

Le transformateur est constitué de deux enroulement (ou plus) couplés sur un noyau magnétique, comme le montre la Figure I.7

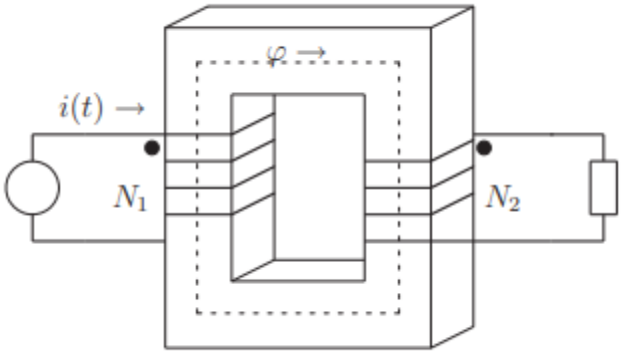


Figure I.7 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.

Le coté de la source est appelé le primaire. Le coté de la charge est appelé le secondaire. Le flux Φ est le flux mutuel. Le « • » indique la polarité des tensions. Par convention, un courant qui entre dans un « • » indique un flux positif. Il faut remarquer qu'il n'existe aucune connexion électrique entre le primaire et le secondaire. Tout le couplage entre les deux enroulements est magnétique. Lorsqu'on applique une tension alternative à la source [13], ou crée un flux alternatif dans le noyau magnétique. Selon la loi de faraday, ce flux crée des forces électromotrices dans les bobines. La force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours dans la bobine et au taux de variation du flux. Selon le rapport du nombre de tours entre le primaire et le secondaire, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle de la source [13]. Un transformateur idéal ou parfait est un transformateur virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels. Ces derniers sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances. Dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux sont négligées, le rapport du nombre des spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine le rapport de transformation du transformateur. Supposons qu'il existe un flux dans le noyau, qui relie les deux enroulements et qui est une fonction sinusoïdale du temps $\boldsymbol{\phi max}\mathbf{sin}$w . Ensuite, la tension induite dans l'enroulement primaire à un instant quelconque par le flux est la suivante d'après la loi de faraday-Lenz

$$\boldsymbol{E1} = -\boldsymbol{N1}\boldsymbol{d\phi}/\boldsymbol{dt} \qquad \text{(I.1)}$$

$$\boldsymbol{E1} = -\boldsymbol{N1}\text{w}\ \boldsymbol{\phi max}\mathbf{cos}\text{w}\boldsymbol{t} \qquad \text{(I.2)}$$

Où : $\omega = 2\pi f$

Par conséquent :

$$\boldsymbol{E1 = -2\pi f N1 \phi max \cos wt} \quad \text{(I.3)}$$

Et la valeur efficace de cette tension est :

$$\boldsymbol{E1eff = 2\pi f/\sqrt{2} N1 \phi max} \quad \text{(I.4)}$$

$$\boldsymbol{E1eff = 4,44 . f . N1 . A . Bmax} \quad \text{(I.5)}$$

f : fréquence.

A : Aire de la section de circuit magnétique.

Bmax : densité de flux maximal dans le noyau

$$\boldsymbol{E2eff = 4 . 44 f N2 A Bmax} \quad \text{(I.6)}$$

Par fonction $Epri/ Esec$:

$$\boldsymbol{V1/ V2 = N1 /N2 = m} \quad \text{(I.7)}$$

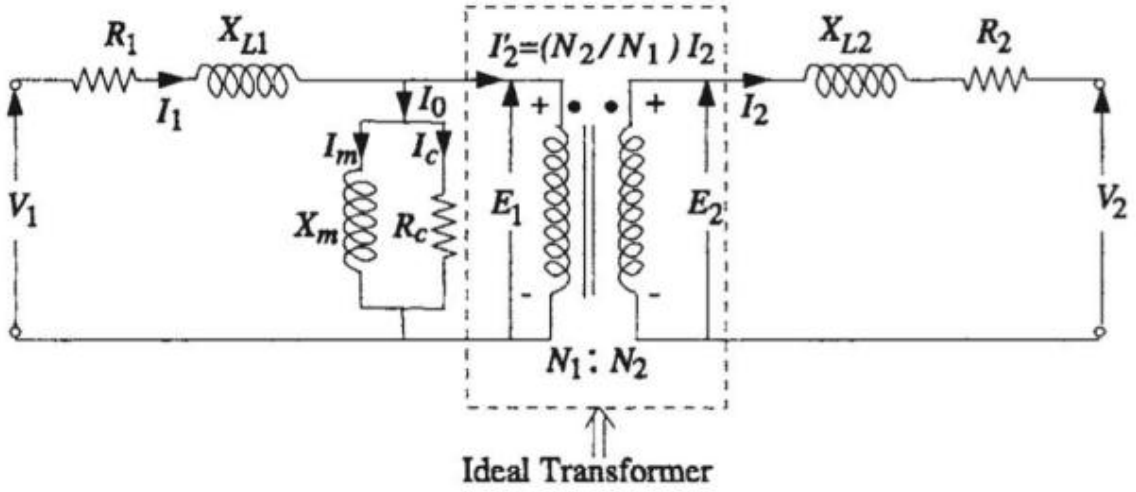
Aussi : $\boldsymbol{I2 /I1 = N1/ N2 = m}$ (I.8)

m : est appelé rapport de transformation

I.5.3 Schéma électrique équivalent :

Le schéma équivalent d'un transformateur est structuré autour d'éléments qui modélisent les phénomènes magnétiques pour le circuit magnétique et les phénomènes électromagnétiques et électrostatiques pour les bobinages, les couplages intégraux, l'inductance, la résistance et la capacité de puissance.

Ce schéma équivalent complet décrit clairement le fonctionnement d'un transformateur



monophasé pratique peut être électriquement modélisé selon la Figure I-9

Figure I.8 : Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel

Les valeurs typiques de ces paramètres diffèrent selon la réalisation particulière d'un transformateur donné. Les grandes lignes de la construction d'un transformateur seront présentées en 1.3.3.

Les éléments V1, V2, N1 et N2 fixent les tensions nominales et le rapport de transformation à vide.

Les éléments R1 et R2 sont les résistances électriques des enroulements, et les pertes Joule seront principalement dues au passage des courants I1 et I2 de charge dans ces résistances.

Les réactances XL1 et XL2 correspondent aux flux de fuites de chacun des enroulements. L'impédance équivalente (XL1 + (N2/N1) 2 * XL2 ramené au primaire par exemple) représente le flux de fuites de l'ensemble des deux enroulements. Elle induit une chute de tension, fonction de la charge, représentative de l'impédance de court-circuit du transformateur. Elle est fortement influencée par la configuration géométrique des enroulements entre eux. [14]

I.5.4. Diagrammes de Kapp :

Les tensions, courants et flux magnétiques du transformateur de la Fig. I.4 peuvent être représentés selon des diagrammes vectoriels de la Figure I.10, issus de (KULKARNI &

KHAPARDE, 2004), appelés diagrammes de Kapp. Il y a le diagramme du côté primaire (a) et du côté secondaire(b).

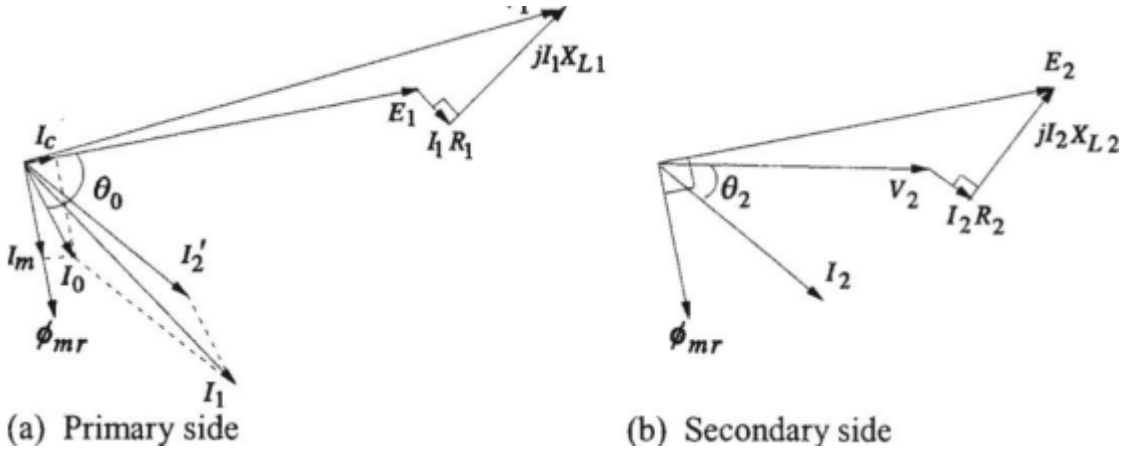


Figure I.9 : Diagrammes de Kapp

Par conséquent, la chute de tension totale sous charge varie en fonction du courant de charge. La tension de court-circuit correspond à la chute de tension équivalente des chutes de tension primaire et secondaire au courant nominal [14].

I.6 les Types de transformateur :

Il existe différents types de transformateurs, mais nous nous intéresserons à l'étude des transformateurs de puissance dans les réseaux électriques car ils sont les plus intéressants pour développer les connexions réseau.

I.6.1.Transformateurs de transmission :

Les transformateurs de transmission sont utilisés dans les réseaux de transport d'énergie pour les connexions entre différents niveaux de haute tension [15].



Figure I.10 : Transformateurs de transmission

I.6.2.Transformateurs de distribution :

Les transformateurs de distribution sont les transformateurs de plus faible capacité, inférieure à 2 500 KVA en trois phases. Ils servent, comme leur nom l'indique, à alimenter les réseaux de distribution, c'est-à-dire à transformer la moyenne tension en basse tension (230 volts). La plupart utilisent de l'huile minérale pour l'isolation et le refroidissement. Leurs noyaux magnétiques utilisent une technologie similaire à celle des transformateurs de puissance plus élevée avec de l'acier orienté et superposé et sont totalement sans boulons [16]



Figure I.11 : Transformateur de distribution.

Selon le type de refroidissement on distingue : les transformateurs à l'huile et les transformateurs secs.

I.6.3-Transformateurs de type sec :

Un transformateur de type sec est un « transformateur pour lequel le circuit magnétique et les enroulements ne sont pas immergés dans un liquide isolant ». Concrètement, ses enroulements sont isolés à l'aide de gaz ou d'isolation solide, comme du vernis, du papier ou de la résine. L'enroulement haut tension est enrobé de résine qui l'isole alors électriquement. Une des difficultés de la technique est de maintenir l'adhérence résine/enroulement, pour avoir des coefficients de dilatation proche, les enroulements en aluminium sont préférés. Les transformateurs de type sec isolés avec du papier ont le défaut d'être sensibles à l'humidité. Ils ont par contre un meilleur comportement lors des surcharges et des courts-circuits, ainsi que des pertes plus réduites [17].



Figure I.12 : Transformateur de type sec

I.6.4. Transformateurs immergés dans l'huile :

Le transformateur immergé dans l'huile est constitué d'un circuit magnétique constitué de plaques de cristaux orientées, d'enroulements en cuivre ou en aluminium, d'un réservoir métallique, d'un boîtier et de connecteurs HTA et BTA [18].



Figure (I.13) : Transformateur immerge dans l'huile

I.6.5. Autotransformateurs :

Dans ce type particulier de transformateur de puissance, il n'y a pas d'isolation entre les enroulements primaire et secondaire car l'enroulement secondaire fait partie de l'enroulement primaire. Cela permet d'économiser une bobine. Le courant fourni au transformateur traverse tout le fil primaire et une dérivation en un point qui détermine la sortie du fil secondaire. Le résultat est qu'une partie de la bobine est parcourue uniquement par le courant primaire tandis que la partie restante est parcourue par le courant primaire moins le

courant secondaire. La partie bobinage peut donc être réduite dans cette partie secondaire [19].

Les autotransformateurs sont principalement utilisés pour connecter des réseaux très haute tension. Les autotransformateurs sont presque toujours couplés en étoile et reçoivent une isolation non uniforme.

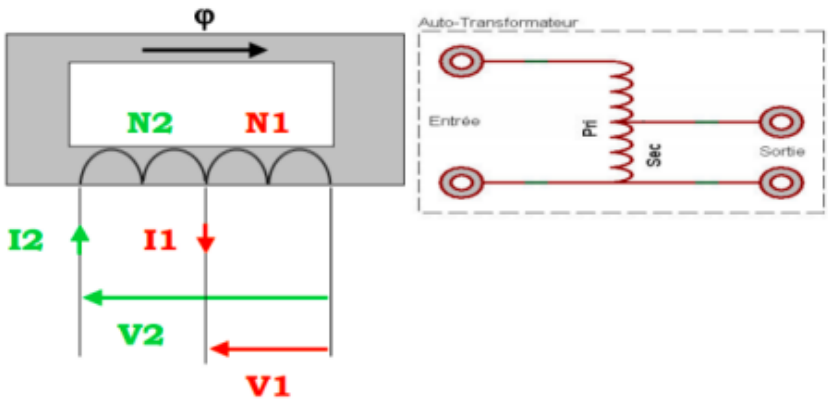


Figure I.14: Schéma équivalent d'un autotransformateur.

I.7-Le système de refroidissement :

Les pertes des enroulements, dues principalement à l'effet Joule, mais également aux courants de Foucault, nécessitent leur refroidissement. La chaleur s'échappe par conduction, convection et rayonnement. Idéalement, l'huile devrait se déplacer par rapport à tous les conducteurs afin que la chaleur soit transférée par convection d'un conducteur au conducteur précédent. [20]

Le but du système de refroidissement du transformateur est de maintenir la température des enroulements et de l'isolation (par exemple l'huile) à des niveaux acceptables. La sélection du mode de refroidissement se fait spécifiquement en fonction des paramètres suivants :

* Pertes à évacuer

*Température ambiante extérieure

* Contraintes de bruit

*Contraintes dimensionnelles limitant la taille du transformateur

*Et bien sûr le coût.

I.8. Défauts fréquents dans les transformateurs :

I.8.1. Défaut d'isolement de la partie active :

Les défauts d'isolement des parties actives se caractérisent par la perte ou la très forte réduction de la capacité d'isolation électrique du circuit par rapport à son environnement, dont il doit normalement être isolé.

Typiquement ce cas est rencontré dans les situations suivantes :

Amorçage entre enroulements normalement isolés entre eux **figure (I.14).**

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



Figure I.15: Amorçage entre enroulements.

I.8.2. Amorçage diélectrique entre spires :

C'est un amorçage entre spires d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux **figure I.15.** L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit, localement.



Figure I.16 : Amorçage entre spires, sans court-circuit.

I.8.3. Court-circuit entre spires :

Le court-circuit inter-spires est caractérisé par un contact électrique anormal entre les spires d'une même bobine qui sont normalement isolées les unes des autres **Figure I.16.**

Cela se produit généralement après l'allumage. Le diélectrique entre les spires du fil est maintenu ou l'isolant le papier est déchiré après que la bobine a été soumise à une forte déformation mécanique. Ce défaut peut être suffisamment grave pour faire fondre le cuivre du conducteur et ouvrir le circuit dans certains cas.



Figure I.17 : Court-circuit entre spires

I.8.4. Décharges Partielles :

Une décharge partielle est une décharge électrique microscopique localisée provoquée par Une faible isolation. Un exemple entre blocs d'enroulement peut être vu sur la **figure I.17.**

Les décharges elles-mêmes sont rarement destructrices, mais leur évolution peut l'être. Car à la longue, le carbone conducteur qu'ils produisent peut se propager et réduire la rigidité diélectrique entre certaines particules vivantes et ainsi provoquer un incendie.



Figure I.18 : Décharges partielles sur des cales.

Les mesures de décharges partielles sont possibles mais nécessitent des installations de mesure lourdes à haute tension. C'est pourquoi elles sont souvent réalisées au cas par cas en dehors des usines de transformation.

I.8.5. Coupure du circuit électrique :

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

Un amorçage de puissance entre spires, qui les fusionne et coupe le conducteur.

Un point chaud qui dégénère, au niveau des brasures des connexions internes, pouvant aller du débrasage jusqu'à la fusion du contact **figure I.18.**

Un mauvais alignement d'un régleur.



Figure I.19 : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur

I.8.6. Déformation géométrique des enroulements :

Mécaniquement, il est possible de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement à cause d'un court-circuit externe qui provoque des courants extrêmement élevés, générant ainsi une force de Laplace très importante **Figure I.19,** à noter il n'y a pas allumage entre les spires du fil ou à l'intérieur du court-circuit).

Il est possible de déformer la bobine, ce qui affaiblira certainement son isolation papier au contact du fil sans nécessairement avoir d'étincelle entre les spires du fil ou avec la terre. Dans certains cas, les transformateurs présentant une telle déformation mécanique peuvent fonctionner à la vitesse nominale. Cependant, il est encore affaibli et il n'est absolument pas certain qu'il puisse résister sans brûler à des perturbations ultérieures de court-circuit ou de surtension.



Figure I.20 : Déformation mécanique d'un Enroulement

I.9. Protection et surveillance de transformateur de puissance :[11]

La protection est un problème qui doit être résolu d'un point de vue économique, en tenant compte de la probabilité d'un type de défaut, des conséquences de ses manifestations possibles (perte de production, coûts de réparation, dommages aux équipements) et du coût de l'efficacité de la protection. Visant à la prévenir ou à la limiter.

I.9.1. Différents types de protections :

Le transformateur est un élément particulièrement important du réseau électrique. Il est nécessaire de le protéger efficacement de tous défauts qui pourraient l'endommager, qu'ils soient internes ou externes.

I.9.1.1. Protections internes :

a) Relais BUCHHOLZ :

Les arcs qui prennent naissance à l'intérieur de la cuve d'un transformateur décomposent certaine quantité d'huile et provoquent un dégagement gazeux. Les gaz produits montent vers la partie supérieure de la cuve de transformateur et de là vers le conservateur à travers un relais mécanique appelé relais BUCHHOLZ. Ce relais est sensible à tout mouvement de gaz ou d'huile. Si ce mouvement est faible, il ferme un contact de signalisation (alarme BUCHHOLZ). Par ailleurs, un ordre de déclenchement est émis au moyen d'un autre contact qui se ferme en cas de mouvement important. Les gaz restant enfermés à la partie supérieure du relais, d'où ils peuvent être prélevés, et leur examen permettent dans une certaine mesure de faire des hypothèses sur la nature de défauts :

Si les gaz ne sont pas inflammables on peut dire que c'est l'air qui provient soit d'une poche d'air ou de fuite d'huile.

Si les gaz s'enflamment, il y a eu destruction des matières isolantes donc le transformateur doit être mis hors service.

Analyse visuelle, si le gaz est :

Incolore : c'est de l'air. On purge le relais et on remet le transformateur sous tension. Blanc : c'est qu'il y a échauffement de l'isolant.

Jaune : c'est qu'il s'est produit un arc contournant une cale en bois Noir : c'est qu'il y a désagrégation de l'huile

Cette protection sera à deux niveaux pour le transformateur : le premier donnera un signal d'alarme, le second un signal de déclenchement

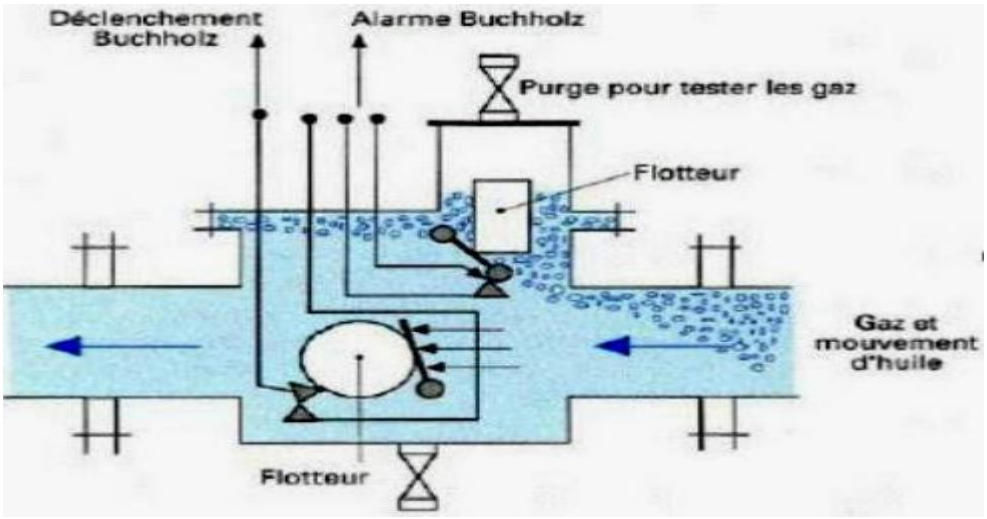


Figure. I.21 : Schéma de fonctionnement de Relais BUCHHOLZ

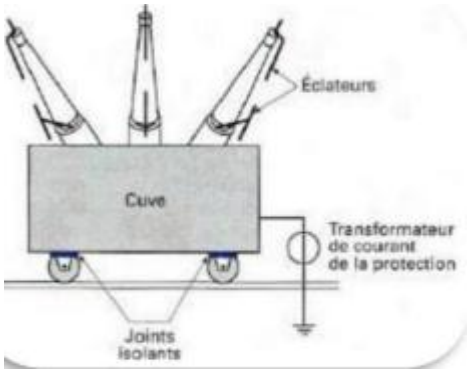
b) Protection masse cuve :

Une protection rapide, détectant les défauts internes du transformateur, est assurée par le relais de détection des défauts à la terre du réservoir. Pour ce faire, la cuve du transformateur, ses accessoires ainsi que ses circuits auxiliaires doivent être isolés de la terre par des liaisons isolantes.

Mise à la terre de la cuve du transformateur La tension principale est réalisée par une seule connexion passage court à l'intérieur du transformateur de courant toroïdal permettant la mesure du courant circulant vers la masse.

Ainsi, tout défaut entre la partie active et les transformateurs de cuve est détecté par le relais de courant alimenté par ce TC. Ce relais enverra une commande de déclenchement instantanée au disjoncteur primaire et secondaire du transformateur. La protection du





réservoir doit être assurée contre les défauts à la terre se produisant dans le transformateur. La cuve du transformateur doit être isolée du sol

Figure. I.22 : Placement de TC tore **Figure I.23** : Protection masse cuve

c) Protection par DGPT :

Le DGPT (Détecteur de Gaz, de Pression et de Température) est un dispositif de protection utilisé pour les transformateurs d'isolement liquide. Ce dispositif détecte les anomalies au sein du diélectrique liquide telles que les émissions de gaz, les augmentations de pression ou de température et provoque la mise hors tension du transformateur. Il est principalement destiné à protéger les transformateurs submersibles entièrement étanches. En cas de défaut grave, l'échappement est capté au point haut au niveau du relais ; Une accumulation excessive provoquera une alarme.



Figure. I.24 : Dispositif DGBT

d) Protection thermique :

Plusieurs thermomètres et caméras thermiques montés sur des transformateurs donnent une image de la température du cuivre. Depuis plusieurs années, des fibres optiques sont

également installées dans la bobine, permettant une mesure meilleure et plus rapide de cette température.

I.9.1.2. Protections externes :

a) Protection des surtensions :

Deux moyens de protection contre les surtensions sont utilisés de manière large, les éclateurs et les parafoudres :

Eclateur : est un dispositif simple constitué de deux électrodes dans l'air. La limitation de tension aux bornes est effectuée par l'amorçage d'intervalle d'air.

Parafoudre : permettent de se débarrasser de ce comportement néfaste car ils présentent un comportement réversible. Ce sont des résistances fortement non- linéaires qui présentent une diminution importante de leur résistance interne au- dessus d'une certaine valeur de tension aux bornes.



Figure I.25 : Eclateur



Figure I.26 : Parafoudre

b) Protection à maximum d'intensité :

Un relais connecté à un transformateur de courant (équivalent à un ampèremètre haute tension) active le transformateur en fonction d'une surintensité temporaire, fixée par un seuil.

Ces dispositifs de protection fonctionneront contre les défauts externes (défauts phase-phase et défauts phase-terre)

Trois relais à maximum de courant de phase à deux seuils (seuils bas et seuils haut) temporisés pour la protection contre les défauts entent les phases.

Un relais à maximum de courant homopolaire à deux seuils (seuils bas et seuils haut) temporise, désensibilisé à l'harmonique trois pour la protection contre les défauts de la terre.

I.9.1.3. Protection différentielle :

La protection différentielle est obtenue en comparant le courant primaire total avec le courant secondaire total. La différence entre ces courants ne doit pas dépasser la valeur i0 pendant une durée supérieure à t0, en dehors de laquelle il y aura un phénomène d'activation. Cette protection a une sélectivité absolue, doit être très stable face aux incidents extérieurs.

Le principe de fonctionnement de la protection est basé sur la comparaison entre le courant entrant et le transformateur de courant sortant.

Cette protection est utilisée :

Pour détecter des courants de défaut inférieurs au courant nominal,

Pour déclencher instantanément puisque la sélectivité est basée sur la détection et non sur la Temporisation.

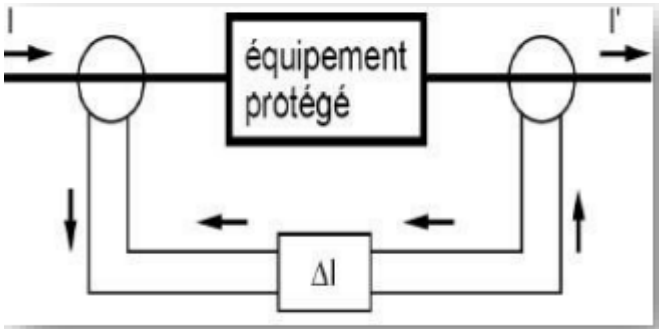


Figure I.27: Schéma de fonctionnement de la protection différentielle

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques concepts généraux sur les transformateurs électriques. Nous avons également donné un aperçu des principaux composants, leurs rôles et leur importance dans cette machine statique. A la fin de ce chapitre, divers défauts et méthodes de protection des transformateurs ont été présentés pour mieux comprendre son fonctionnement.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de la technique de diagnostique FRA et de la modélisation fréquentielle des enroulements du transformateur.

Chapitre II

modélisation fréquentielle des enroulements du transformateur en vue de l'analyse de la réponse FRA

II.1. Introduction :

Ce chapitre sera consacré à l'introduction de la technique d'analyse fréquentielle (FRA) comme outil modern approprié dans le domaine du diagnostic des défauts des systèmes électriques tels que ; les transformateurs de puissance, les moteurs électriques et les panneaux photovoltaïque, …etc., en particulier les défaillances des enroulements du transformateur de puissance. Par la suite, on va présenter les différents modèles utilisés pour analyser et interpréter les propriétés électromagnétiques des bobinages du transformateur dans les gammes de basses, moyennes et hautes fréquence.

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

II.2.1 Définition :

L'Analyse de la réponse en fréquence (FRA) est un outil qui peut donner une indication de mouvement de 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. Toutcela est lié à son impédance, dont les éléments capacitifs et inductifs sont intimement distribués dans la construction physique du transformateur. [23] Les changements de la réponse en fréquence mesurée par des techniques fra peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur du transformateur, dont la cause doit être ensuite identifiée et analysée. [24]

II.2.2 Principe de la méthode :

Un transformateur comprend un grand nombre de capacités, d'inductances et de résistances, leur bobinage peut être représenté par un circuit complexe reflète les caractéristiques magnétiques et électriques de la bobine comme le représente la figure. II.1. Ce circuit représente une empreinte digitale ou signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des réponses sont représentées sous forme de courbe [1].Les capacités et les inductances de l'enroulement peuvent être déterminées en fonction des distances entre les spires et entre les spires et la masse. Les mouvements dans l'enroulement peuvent donc déterminés en fonction des variations des capacités et des inductances [25]. Le principe de FRA 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.

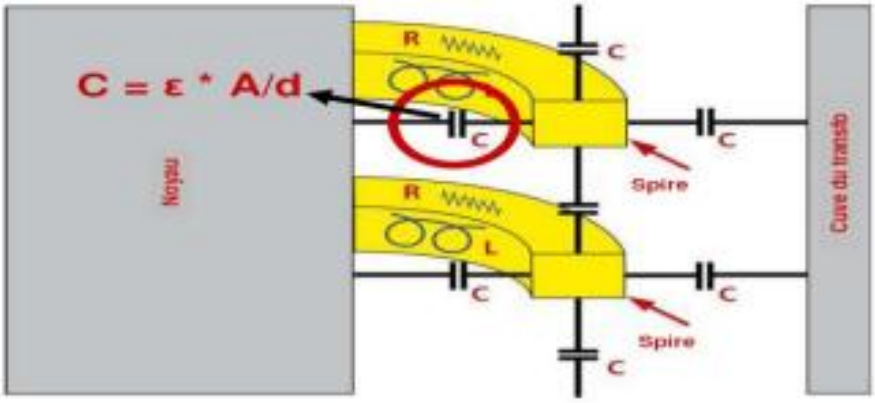


Figure II.1 Modèle d'un enroulement de transformateur

II. 3. Objectifs des mesures par FRA

Le principal intérêt des mesures par FRA sur les transformateurs est de détecter des déformations des enroulements qui peuvent résulter des forces électromagnétiques très importantes qui s'exercent du fait des surintensités apparaissant au moment de défauts directs, de défauts dans le régleur, de mauvaises synchronisations [26]. La déformation d'un enroulement peut finalement provoquer un défaut dans le transformateur par suite d'une détérioration de l'isolement entre spires, chose qui provoque la diminution de la tenue diélectrique et aboutir à des spires court-circuitées. En outre, tout desserrage de la fixation d'un enroulement, suite à un amincissement de l'isolation du au vieillissement, augmente le risque de défaut par diminution de la tenue mécanique des assemblages de l'enroulement [26]. En plus du diagnostic des défauts à la suite de court-circuit, on remarque un intérêt croissant qui porte à la détection avant l'apparition de la panne, au moment des inspections programmées, de défauts liés à des déformations des enroulements, c'est à dire l'évolution de l'état mécanique permettant d'apprécier la fiabilité escomptée des transformateurs, en termes de susceptibilité accrue à des courts circuits futurs. Un intérêt se manifeste également dans les mesures par FRA pour la détection de tout autre problème conduisant à une modification de la répartition des inductances et des capacités dans les transformateurs, par exemple des défauts sur le noyau ou des défauts de mise à la terre du noyau ou des écrans. Une autre application des mesures par FRA est le contrôle de l'intégrité mécanique d'un transformateur après transport, fournissant un moyen fiable de confirmer que les assemblages du noyau et des enroulements n'ont subi aucune détérioration malgré les secousses répétées en cours de transport [26]. Les mesures par FRA peuvent donner des informations sur la tenue des structures géométriques des enroulements.

II.4. Quand faut-il faire un test FRA :

Généralement les mesures sur les transformateurs sont recommandées [25] [27]

- Avant et après chaque transport
- Après chaque défaut à forte énergie, soit à l'intérieur du transfo ou traversant (défaut réseau proche)
- Si l'analyse des gaz dissous indique un défaut de haute température (défaut en relation avec le noyau magnétique) Après un séisme
- Suite à des court-circuit élevés survenant sur le réseau électrique
- Après l'installation et de réinstallation
- Après avoir connu des pannes électriques
- Essai d'usine

II.5 Théorie fondamentale de la FRA :

La technique FRA est basé sur l'analyse d'une fonction de transfert d'enroulements, dans lequel, le générateur de signaux est connecté avec une référence de tension à une prise de phase sur le transformateur et la réponse est mesurée sur la sortie neutre du même enroulement comme le montre par la figure. II.16.[28]

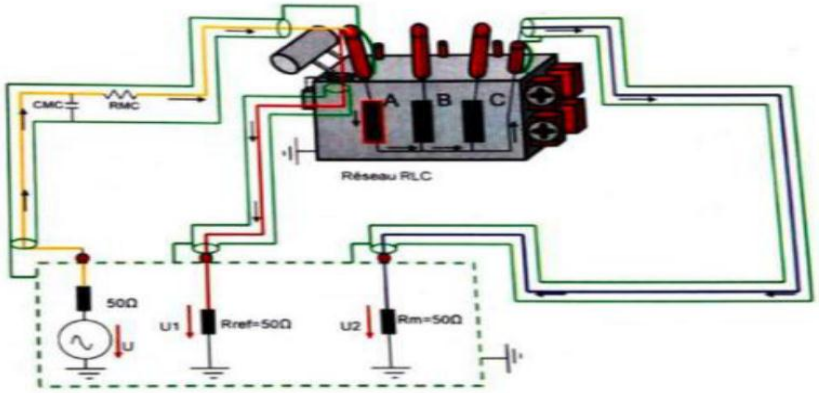


Figure.II.2. Théorie Et Fondamental De FRA [29] [30]

II.6 Méthode de mesure FRA

II.6.1 Essai entre extrémités

On injecte le signal tour à tour à une extrémité de chaque enroulement et l'on mesure le signal à l'autre extrémité (Figure. II.2) [27].

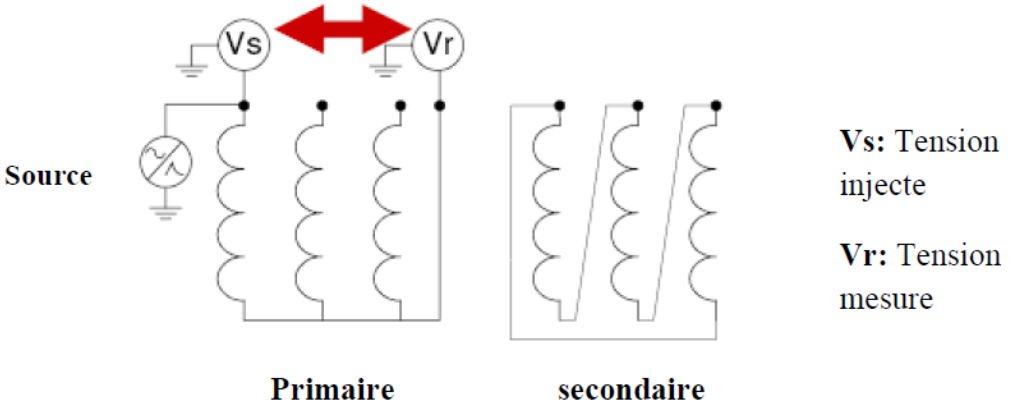


Figure II.3 Essai entre extrémités

L'impédance de magnétisation du transformateur est le principal paramètre caractérisant laréponse en fréquence basse (en-dessus du premier point de résonance) quand on utilise cette configuration. Cet essai est celui que l'on utilise le plus communément pour sa simplicité et la possibilité qu'il offre d'examiner séparément chaque enroulement.

II.6.2 Essai en court-circuit :

Cet essai ressemble à la mesure entre extrémités mais avec un enroulement court-circuité sur la même phase voir (Figure. II.3) [25], de telles mesures permettent d'éliminer l'influence du noyau en dessus de 10-20 KHz environ du fait que la réponse en fréquence basse est caractérisée par l'inductance de fuite au lieu de l'inductance de magnétisation. La réponse pour des fréquences plus élèves est similaires à celle que l'on obtient en utilisant la mesure entre extrémité.

L'enroulement en court-circuit peut être laissé au potentiel flottant ou bien être mis à la terre.

Pour les transformateurs triphasés, il y a deux niveaux de variations, soit avec un court-circuit par phase soit avec un court-circuit triphasé. En outre, les essais de court-circuit entre extrémités peuvent être réalisés en raccordant la source soit à l'extrémité coté phase, soit à l'extrémité coté neutre [26].

On peut effectuer cet essai si l'on veut obtenir des informations concernant l'impédance de fuite à basse fréquence, ou à éliminer certaines incertitudes liées à l'analyse de l'influence dunoyau lorsqu'il existe un magnétisme résiduel [26].

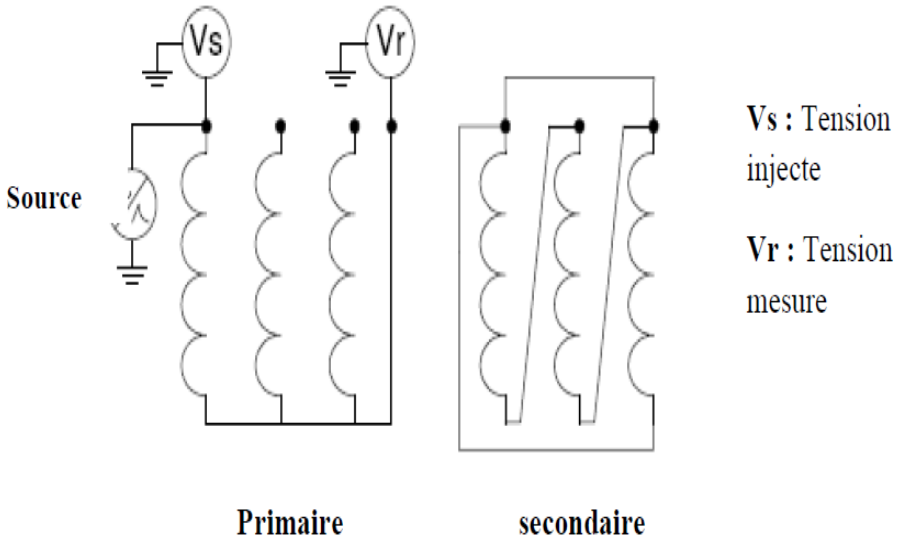


Figure. II.4 Essai en court-circuit

II.6.3 Essai capacitif entre enroulements

On applique le signal à une extrémité d'un enroulement et l'on mesure la réponse à uneextrémité d'un autre enroulement de la même phase (non relie au premier) (Figure. II.4) [25].

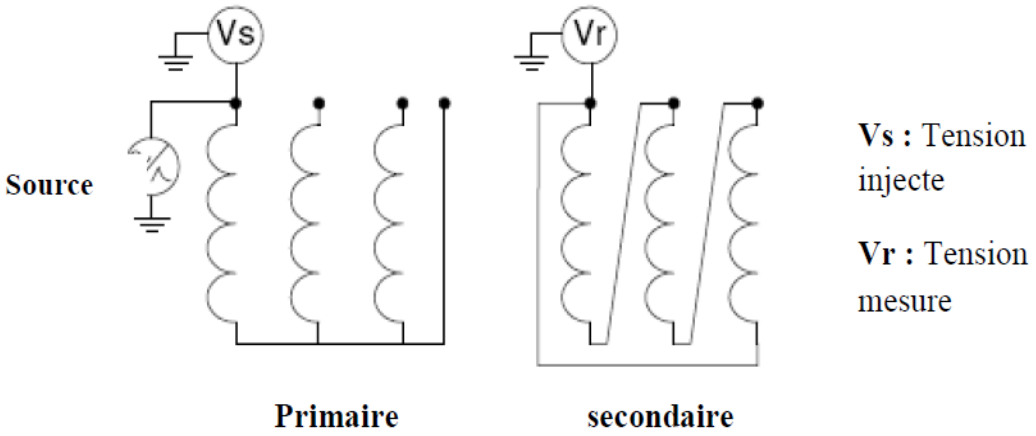


Figure.II.5 Essai capacitif entre enroulements

II.6.4. Essai inductif entre enroulement

On injecte le signal sur une borne coté HT, et l'on mesure la réponse sur la borne correspondantecoté BT, les autres extrémités des deux enroulements étant reliées à la terre (Figure. II.5) [25].Pour cette mesure, la plage en basse fréquence est déterminée par le rapport des nombres de spires des enroulements.

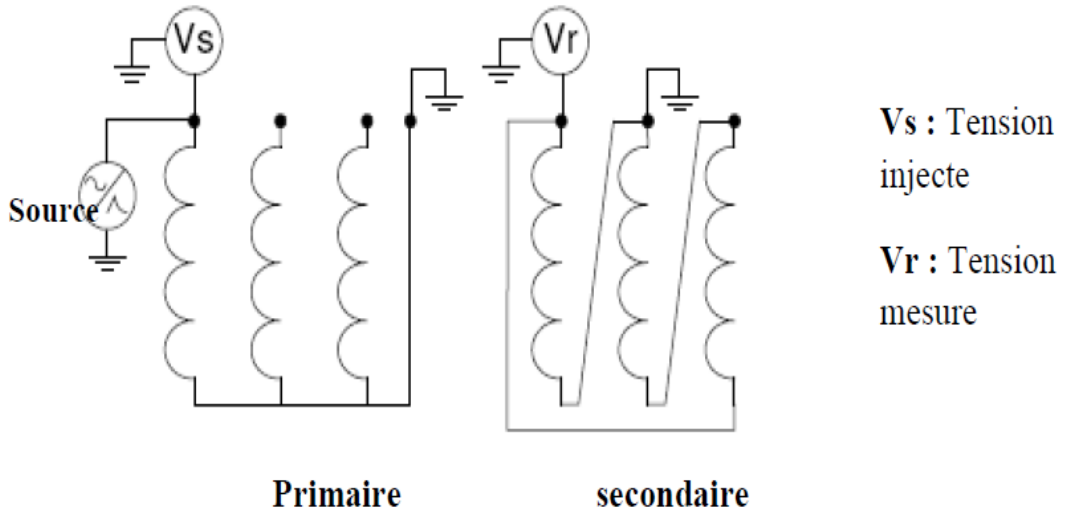


Fig. II.6 Essai inductif entre enroulements

II.7 L'équipement de mesure :

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

II.7.1 Le FR Analyzer :

Le FR Analyzer est un analyseur de réponse au balayage en fréquence pour le diagnostic des enroulements de transformateur de puissance. Son concept matériel universel commandé par un logiciel opérant sur un PC fait du FR Analyzer un outil efficace et d'une grande souplesse d'emploi pour le diagnostic des enroulements et des noyaux magnétiques des transformateurs de puissance [31].

Le FR Analyzer mesure la réponse en fréquence des enroulements d'un transformateur sur une large plage de fréquences et compare cette réponse à celle qu'on obtiendrait pour un enroulement en bon état. Les écarts de la réponse en fréquence permettent de révéler de nombreux types de défauts différents sur les enroulements et les noyaux magnétiques des transformateurs [31].

II.7.2 Connecteurs et commandes :

Le FR Analyzer présente les connecteurs et les commandes suivants [31]:

En face avant (figure II.6):

• Connecteur OUTPUT (sortie du signal source)

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

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



Figure II. 7 : Vue de la face avant du FR Analyzer [28].

En face arrière (figure II.7):

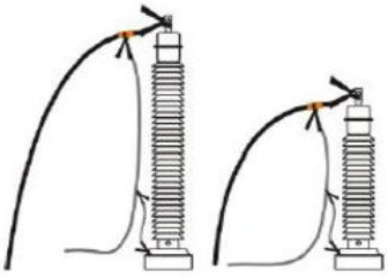
- ✓ Interrupteur d'alimentation
- ✓ Entrée d'alimentation en courant continu
- ✓ Borne de terre équipotentielle
- ✓ Sortie de courant continu 5 V
- ✓ Connecteur USB



Figure II. 8 : Vue de la face arrière du FR Analyzer [32].

II.7.3 Câbles pour les essais :

L'approche recommandée consiste à utiliser trois câbles blindes haute fréquence (ayant une impédance caractéristique connue et constante) pour les mesures de FRA : un pour l'injection de tension, un pour la mesure de la tension de référence sur la borne d'entrée et un pour la mesure de la tension de réponse. La longueur des câbles haute fréquence doit être suffisante pour atteindre les bornes alors que l'équipement d'essai est installé au pied du transformateur. Il est nécessaire d'adapter l'impédance des câbles à haute fréquence afin d'éviter les réflexions [33].



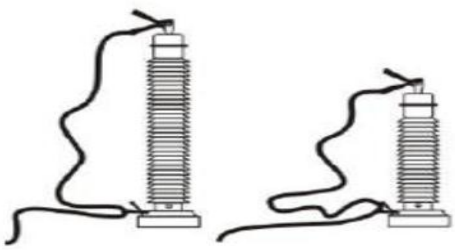


Figure II. 9: Bon raccordement à la terre[28]. **Figure II. 10 :** Mauvais raccordement à la terre[32].

II.7.4 Le logiciel d'analyse et d'interprétation :

Le logiciel de commande opère sur un PC est connecté au FR Analyzer via une interface USB, après avoir lancé le logiciel la fenêtre principale se présente comme suit Figure II.10 [33].

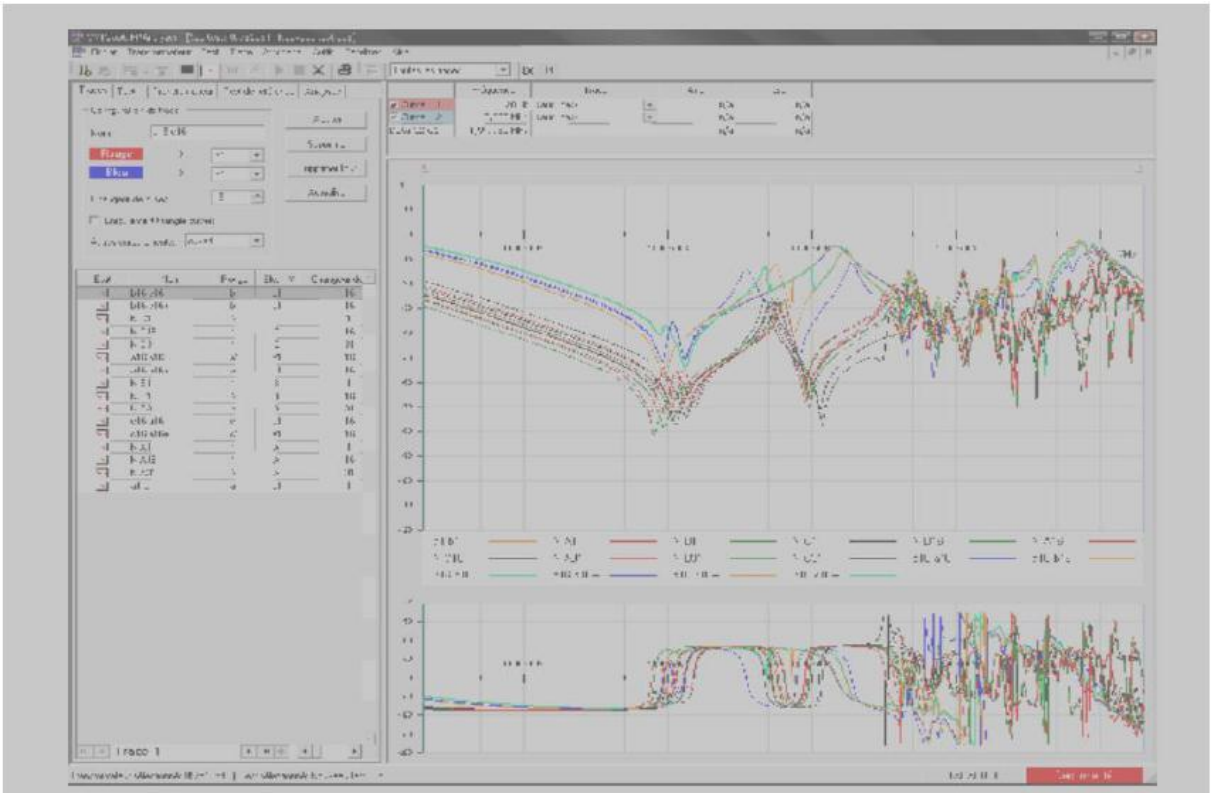


Figure II. 11. Fenêtre principale du logiciel Le logiciel FR Analyzer analyse les résultats du test en calculant la différence de deux traces de test comparables [33].

II.8. Quand mesurer un FRA ?

- Au constructeur :
  - ✓ Pour assurance qualité
  - ✓ Avant et après les tests en court-circuit.
  - ✓ Avant et après les tests en HT.
  - ✓ Avant le transport.
- Sur site :

- ✓ Après le transport
- ✓ Test de routine.
- ✓ Après un défaut.
- ✓ Après un message d'alarme et déclenchement par des relais de protection.
- ✓ Après détection d'anomalies avec des tests traditionnels

II.9. Méthodes d'interprétation

III.9.1 Interprétation méthodologique

La FRA est une méthode comparative pour évaluer l'état des transformateurs de puissancePour évaluer les résultats de FRA, on compare, généralement par une simple observationvisuelle des couches, les informations actuelles avec les informations de référenceIl ya trois approches pour obtenir des informations de référence :

- Mesure préalable sur le même transformateur (empreinte digitale)
- Mesure sur des transformateurs identiques (jumeaux)
- Mesure sur des phases d'un même transformateur teste séparément

III.9.2 Domaine de fréquences pour les interprétations

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

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

f < 2000 Hz	Déformation du noyau, magnétisme résiduel
2000 Hz < f <20 kHz	Court-circuit entre spire, circuits ouverts
20 kHz < f <200kHz	Déplacements relatifs entre les enroulements
200kHz < f < 2 MHz	Déformation propre de l'enroulement
2 MHz < f < 10 MHz	Disposition de couplage et câbles de mesure

Tableau II.1 Domaines typiques d'interprétation de FRA

II.10. Modélisation des transformateurs électriques en régime des hautes fréquences

La représentation du transformateur par son modèle équivalent dans les gammes des basses, moyennes et hautes fréquences est une nécessité indispensable afin d'analyser, interpréter et comprendre les propriétés magnétiques et électriques des bobinages.

II.10.1. Modèle en cascade des circuits RLC parallèle

Le modèle en cascade des circuits RLC parallèle est basée sur la topologie des circuits RLC parallèles, dans lequel, la largeur de la bande passante des points de résonance de la réponse de l'enroulement du transformateur est liée aux valeurs de la capacité et de l'inductance, tandis que, l'amplitude de la réponse de circuit dépend de la valeur de la résistance de cette topologie.Les circuits RLC parallèle sont déterminés à partir des pics de résonance correspondant aux différentes fréquences de coupure de la réponse de l'enroulement à une sollicitation sinusoïdale dans une large gamme de fréquence. Les cellules RLC parallèle obtenues sont arrangées en fonction du nombre de points de résonance de la réponse en fréquence de l'impédance afin d'obtenir un schéma équivalent au transformateur montré par la figure II.11 [34]

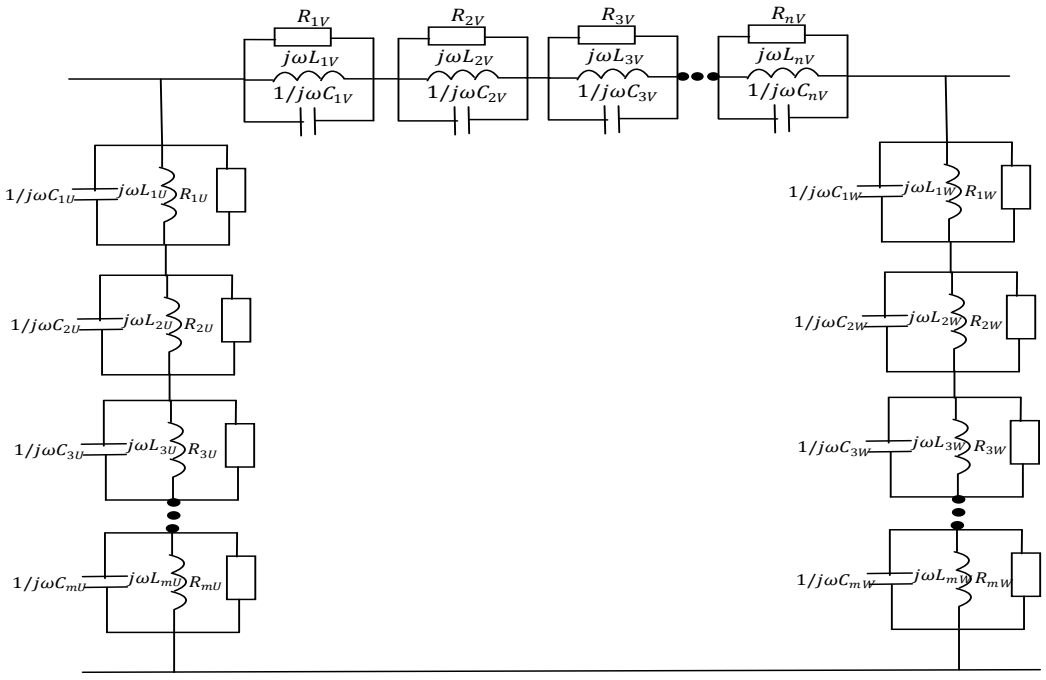
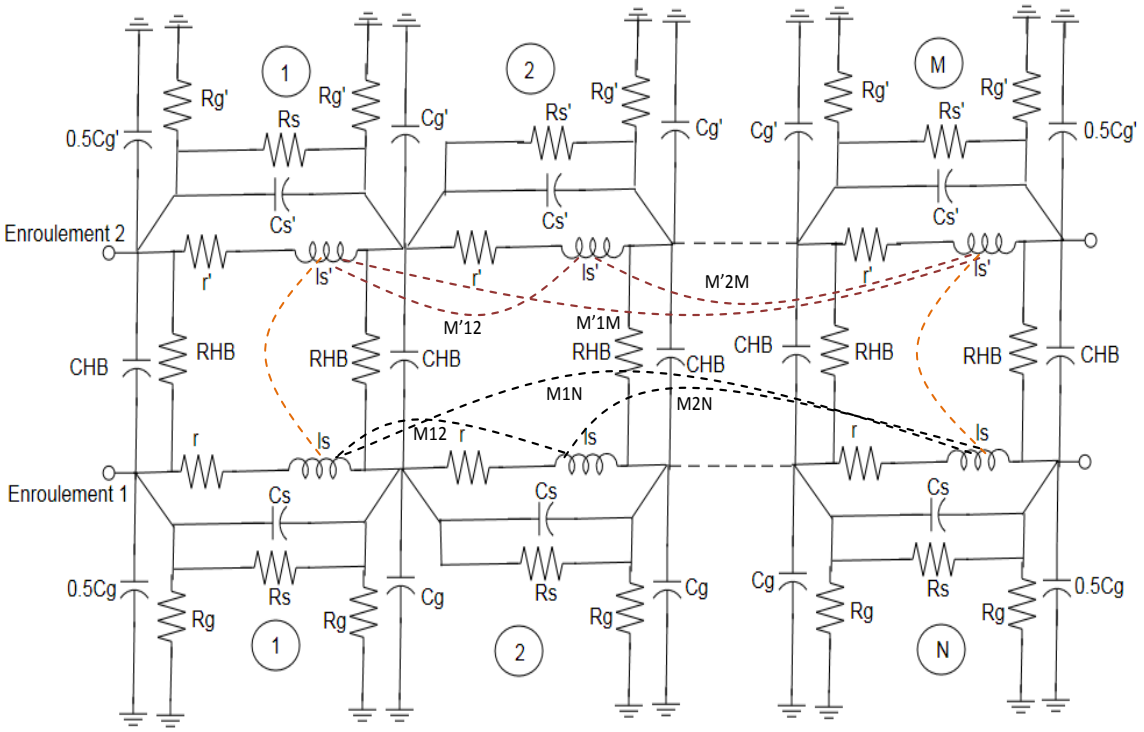


Figure II.12: Modèle en cascade des circuits RLC parallèle du transformateur triphasé [34]

II.10.2. Le modèle mutuellement couplé

Pour décrire le comportement en haute fréquence du transformateur, une représentation précise de ses enroulements, du noyau et du diélectrique doit être obtenue. Parmi les nombreux modèles de transformateurs proposés, le modèle mutuellement couplé 'the mutuallycoupled model' qui est ainsi connu sous le nom 'circuit model', 'RLC larder network' ou 'RLC lumped model'. Ce modèle largement adopté dans le domaine FRA prend en compte tous les couplages électrostatiques et magnétiques. Pour ce modèle, les paramètres de base (résistances, inductances et capacités) pour modéliser les bobinages avec précision sur une large gamme de fréquence (de quelques Hz à l'ordre de quelques MHz) sont combinés afin d'obtenir la structure équivalente au transformateur montrée par la figure I.12[33] [29].Ce modèle équivalent à deux enroulements du transformateur est constitué de deux modèles mutuellement couplés comme le montre sur la figure I.12, tels que chaque modèle correspond à un enroulement. En outre, le couplage électrique et magnétique entre ces deux enroulements peut être représenté par des capacités entre enroulements et des inductances mutuelles, respectivement [35] [36][30]



FigureII.13: Modèle mutuellement couplé équivalent à deux enroulements du transformateur [34] [35] [36]

Les enroulements HT et BT sont constitués de *N* et *M* sections, tels que ; les capacités et les inductances par section sont représentées comme des capacités série (Cs, Cs'), capacités

shunt (C_g, $C_g{}'$), résistances (r, r'), inductances propres (l_s,$l_s{}'$) et capacités entre enroulement (C_{HB}). Les inductances mutuelles entre deux sections quelconques $'i'\ et\ 'j'$peuvent être désignées par M_{ij}; $M_{ij}{}'$. Les pertes diélectriques pourraient être représentées par de grandes valeurs de résistances (R_g, $R_g{}'$, R_s, $R_s{}'$, R_{HB}) en parallèle avec les condensateurs [35] [36]

II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la techniqued'analyse fréquentielle de diagnosticdes enroulements du transformateur d'une part, et d'autre part nous avons présenté deux modèlesfréquentiels adoptés actuellement pour le diagnostic des défaillances du transformateur électrique. Le modèle le plus approprié et le plus utilisé dans ce domaine est celui représentant l'enroulement par des inductances propres et mutuelles traduisant le comportement électromagnétique du l'enroulement.Dans ce qui suit, on va extraire les principaux paramètres physiques de ce modèle équivalent à un enroulement de leur réponse de l'impédance afin de construire l'expression mathématique de leur fonction de transfert.

Chapitre III

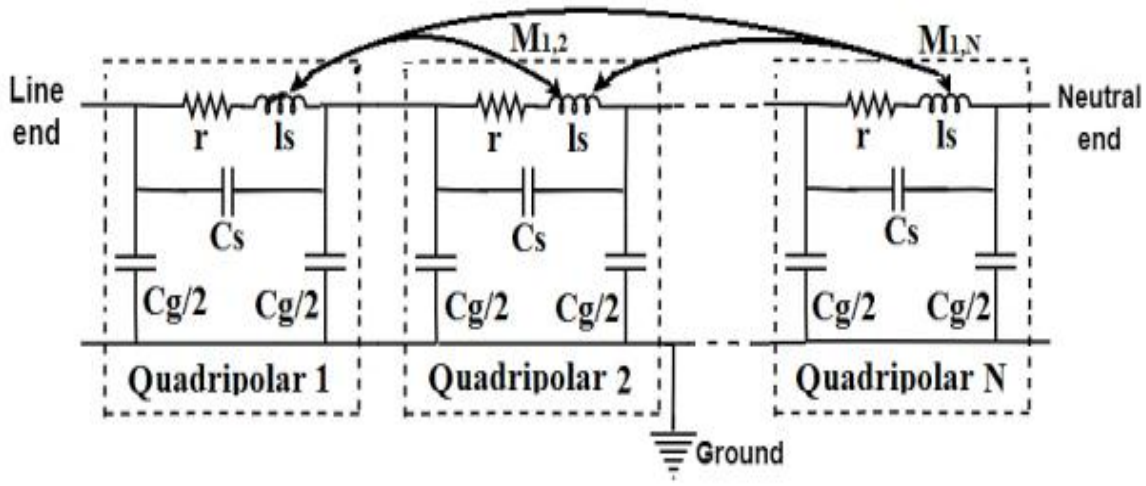
Construction de la fonction de transfert du modèle de l'enroulement à partir de leur réponse d'impédance mesurée

III.1. Introduction

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) du transformateur est la donnée obtenue dans une large gamme de fréquences qui représente la fonction de transfert (TF) reflète le comportement physique de leur enroulement. Cependant, il peut être considéré comme le meilleur outil pour comprendre les caractéristiques électromagnétiques du bobinage. Ce chapitre propose la FT du modèle mutuellement couplé comme outil de localisation et d'évaluation des défaillances des enroulements du transformateur. Toutefois, un algorithme autonome a été développé pour construire l'expression mathématique de la FT proposée dans des recherches antérieures. L'expression de la FT a été développée en se basant sur l'extraction des paramètres de la réponse de l'impédance (DPI) de l'enroulement (la résistance Rdc, l'inductance équivalente L_{eq}, la capacité équivalente C_{eq} et les fréquences naturelles du circuit ouvert et en court-circuit O_{cnfs} et S_{cnfs} respectivement) pour des données FRA mesurées expérimentalement d'un enroulement à noyau d'air isolé. En outre, la FT a été calculé pour les défauts de court-circuit réalisés sur les disques d'enroulement. L'approche diagnostique est basée sur les facteurs K et τ de la FT qui peuvent être obtenus à partir de la capacité équivalente mesurée, de l'inductance équivalente et de la résistance en courant continu de l'enroulement dans les plages de fréquences hautes et basses. Cependant, les facteurs K, τ et la pente des caractéristiques de l'inductance équivalente en fonction du degré de défauts d'enroulement ont été utilisés pour localiser et évaluer la gravité des défauts de court-circuit de l'enroulement du transformateur.

III.2 Circuit équivalent à haute fréquence mutuellement couplé de l'enroulement du transformateur :

Pour surveiller et diagnostiquer un enroulement de transformateur, on doit le représenter par son modèle équivalent mutuellement physiquement réalisable. Le circuit doit être synthétisé de manière à caractériser les caractéristiques de fréquence des enroulements du



transformateur. L'enroulement symétrique et homogène d'un transformateur peut être modélisé par un nombre fini de sections (N) formant un unique réseau couplé magnétiquement et électriquement. Chaque section identique (quadripolaire) se compose d'une résistance de disque de l'enroulement(r) en série avec un. Inductance propre (ls), une capacité shunt C_g et une capacité série C_s. Les disques de l'enroulement sont couplés magnétiquement par des inductances mutuelles M_{ij} comme indiqué la figure III.1:

Figure III.1 : Modèle de circuit équivalent mutuellement couplé de l'enroulement de transformateur

III.3. Procédure d'extraction des paramètres du bobinage à partir de ses valeurs mesurées DPI

Les principaux paramètres de l'enroulement du transformateur tels que : la résistance en courant continu, l'inductance équivalente, la capacité équivalente et les fréquences propres ouvertes et en court-circuit peuvent être directement extraits de la courbe FR d'impédance en domaine fréquentiel. Cependant, la figure III.2 montre le processus d'extraction de chacun de ces paramètres dans sa région de fréquence LFR, MFR ou HFR. Ces paramètres sont essentiels pour construire le modèle mutuellement couplé de l'enroulement. L'expression mathématique de la fonction de transfert est en fonction de ces principaux paramètres du bobinage. L'expression de cette FT est en fonction des coefficients K et τ, et des paires conjuguées de pôles complexes Pi, Pi^* et de zéros Zi, Zi^* comme dans l'équation (III.1)[37][38]

$$\mathbf{Z(s)} = \frac{\boldsymbol{K(s-\tau)\prod_{i=1}^{N-1}(s-Zi)(s-Zi^*)}}{\boldsymbol{\prod_{i=1}^{N-1}(s-Pi)(s-Pi^*)}} \textbf{(III.1)}$$

$$\mathbf{z_i} = -\boldsymbol{\delta_i} \mp \boldsymbol{j\varphi_i} \forall \boldsymbol{i} = 1 \ldots, N-1.$$

$$\mathbf{p_i} = \boldsymbol{\sigma_i} \mp \boldsymbol{j\omega_i} \forall \boldsymbol{i} = 1 \ldots, N.$$

$$\textbf{Où } \boldsymbol{\sigma_i} = \frac{\boldsymbol{\omega_{0,i}}}{\boldsymbol{2Q}} \textbf{ and } \boldsymbol{\omega_i} = \sqrt{\boldsymbol{\omega_{0,i}}^2 - \boldsymbol{\sigma_i}^2} \qquad \textbf{(III.2)}$$

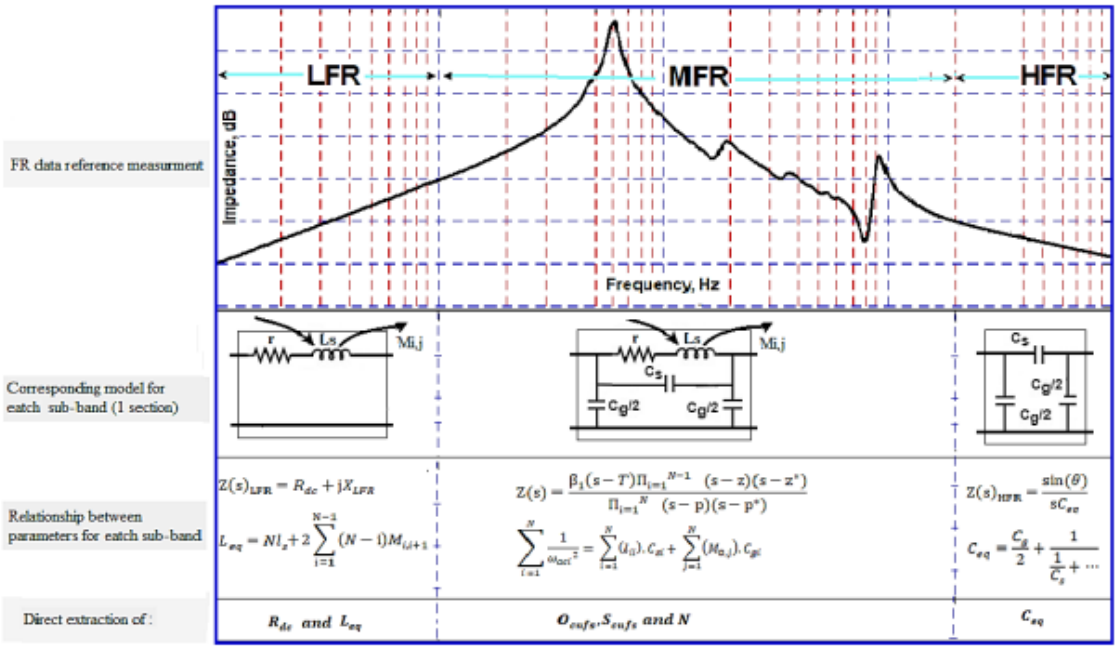


Figure III.2: Décomposition de la réponse fréquentielle FRA

Avec, Q est le facteur de qualité à la pulsation résonante $\omega_{0,i}$.

$$\textbf{Si } \boldsymbol{Q} \gg 1\textbf{, } \boldsymbol{\sigma_i} = \frac{\boldsymbol{\omega_{h,i}-\omega_{l,i}}}{2} \qquad \textbf{(III.3)}$$

Où $\omega_{h,i}$ et $\omega_{l,i}$ représentent respectivement les fréquences inférieures et supérieures à Zmax√2 dans $\omega_{0,i}$.

$$\boldsymbol{\delta_i} = \frac{\boldsymbol{\varphi_{h,i}-\varphi_{l,i}}}{2} \textbf{ et } \quad \boldsymbol{\varphi_i} = \sqrt{\boldsymbol{\varphi_{0,i}}^2 - \boldsymbol{\delta_i}^2} \qquad \textbf{(III.4)}$$

Où $\varphi_{h,i}$ et $\varphi_{l,i}$ représentent respectivement les fréquences inférieure et supérieure à √2.Zmin dans $\varphi_{0,i}$.

III.3.1 Extraction de l'inductance équivalente et de la résistance en courant continu de DPI

La courbe DPI obtenue à partir du test FRA de l'enroulement à noyau d'air est une ligne droite augmentant avec la fréquence dans les basses fréquences (0 Hz-1000 Hz) dont l'équation est donnée par (III.5). Dans lequel, la résistance DC peut être extraite à très basses fréquences (très proches de 0 Hz). La partie linéaire de la courbe DPI représente l'effet inductif de l'enroulement, où l'inductance équivalente (L_{eq}) peut être extraite directement de la courbe DPI dans cette plage de fréquences, comme la montre la figure III.3 en utilisant la relation (III.6). L'inductance équivalente de l'enroulement représente donc la pente de la partie linéaire des courbes FR, dans laquelle cette pente change en fonction de la valeur L_{eq} affectée par les dommages du bobinage.

$$\lim_{s\to 0} \mathbf{Z(s)} = \boldsymbol{R_{dc}} + \boldsymbol{sL_{eq}} \textbf{(III.5)}$$

Où la valeur τ peut être obtenue comme suit $\tau = \frac{-R_{dc}}{L_{eq}}$

$$\boldsymbol{L_{eq}} = \frac{|\mathbf{Z}|\sin\theta}{2\pi \mathbf{f}} = \frac{\mathbf{Z1-Z0}}{2\pi(\mathbf{f1-f0})} = 49.45\ \textbf{mH (III.6)}$$

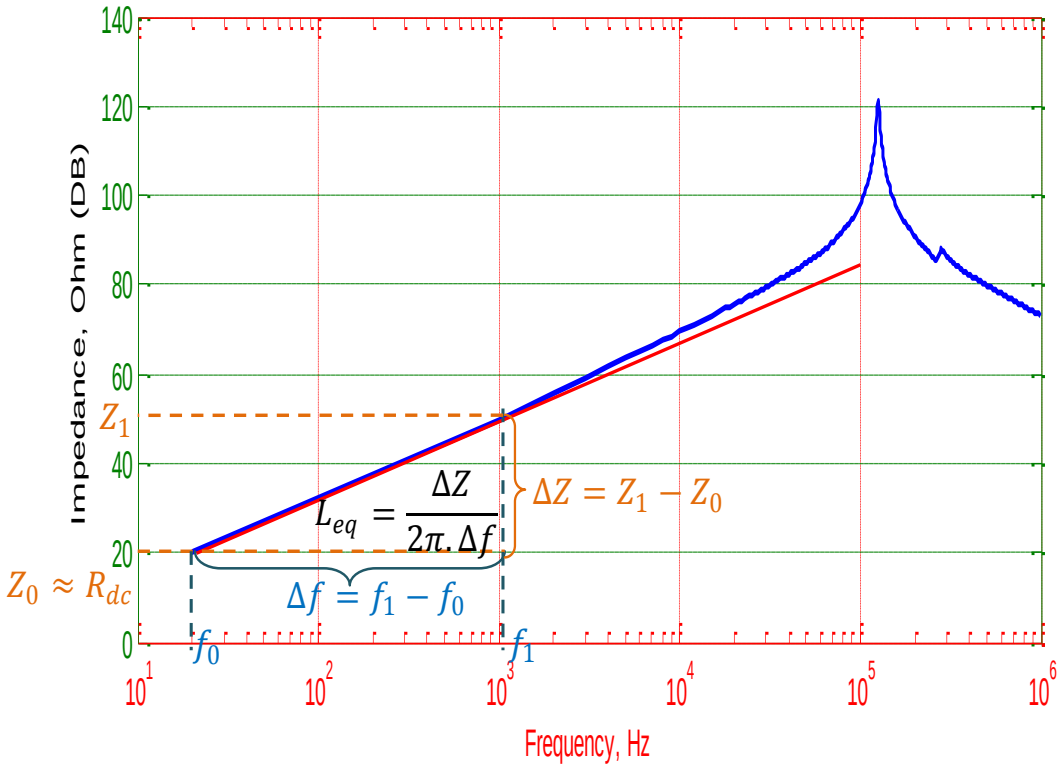


Figure III.3. Procédure d'extraction de l'inductance équivalente de l'enroulement dans la gamme basse fréquence

III.3.2. Extraction de la capacité équivalente dans la gamme HFR

La courbe d'impédance à haute fréquence, après le dernier O_{cnf}, peut être modélisé par un circuit avec des capacités uniquement parce que dans cette plage, l'effet magnétique est négligeable. Cependant, le modèle mutuellement couplé dans la figure III.1 peut être modélisé par des capacités shunt et séries comme dans la figure III.4, où la capacité équivalente totale C_{eq} peut-être extraite de la fonction DPI mesurée. Dans cette gamme de fréquences la fonction de transfert est une fonction hyperbolique contenant l'effet de capacité uniquement comme dans l'équation (III.7), sa valeur doit rester constante sur une gamme de fréquences spécifique où l'angle de phase de l'impédance est approximativement égal à 90°, tel que l'effet résistif est également négligeable [39].

$$z(s)_{HFR} = \lim_{s\to\infty} z(s) = \frac{\sin\theta}{sC_{eq}} \qquad \textbf{(III.7)}$$

Avec : $\quad ceq = \frac{cg}{2} + \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{+\frac{1}{C_s}\ldots}}$

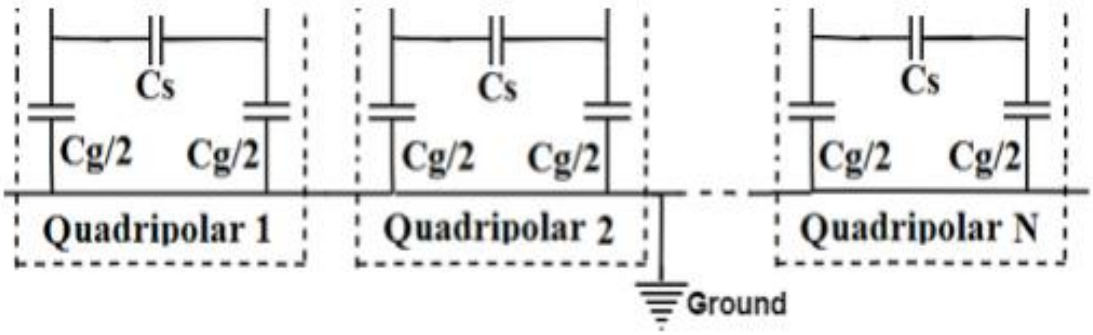


Figure III.4 : Modèle HFR équivalent à un enroulement du transformateur

III.3.3 Extraction des fréquences naturelles ouvertes et courtes dans la gamme MFR

Dans la plage des moyennes fréquences, la fonction de transfert est affectée par l'interaction entre les effets inductifs et capacitifs qui provoquent les fréquences propres de circuit ouvert et de court-circuit (O_{cnfs}, S_{cnfs}) qui représentent les pôles et les zéros de la FT.

Ici, à s=0, le facteur d'échelle K peut être déterminé à partir de l'équation (III.1) dont la valeur tourne autour de $1/C_{eq}$ en fonction de L_{eq}, O_{cnfs}, S_{cnfs}comme dans l'équation (III.8) [37], [38].

$$\boldsymbol{K = z(s)_{HFR} = L_{eq} \frac{\prod_{i=1}^{N-1} S_{\mathrm{cnfs}}{}^{2}}{\prod_{i=1}^{N} O_{\mathrm{cnfs}}{}^{2}}} \textbf{(III.8)}$$

Le facteur K peut constituer un outil utile pour analyser et interpréter les défaillances des enroulements de transformateur. En outre, ce facteur varie en fonction de l'inductance équivalente et les points de résonance et d'antirésonance de la réponse de l'enroulement, qui sont des quantités mesurables, c'est pourquoi le facteur K a été proposé dans ce travail pour localiser et évaluer la gravité des défauts des disques de bobinage.

III.3.4. Procédure de détermination de la fonction de transfert du modèle mutuellement couplé de l'enroulement

L'approche de détermination de la fonction de transfert a été effectué d'une manière autonome via les données mesurées de la réponse d'impédance. Toutefois, l'organigramme montré dans la figure III.5 résume la procédure de calcule de FT du modèle mutuellement couplé équivalent à l'enroulement du transformateur.

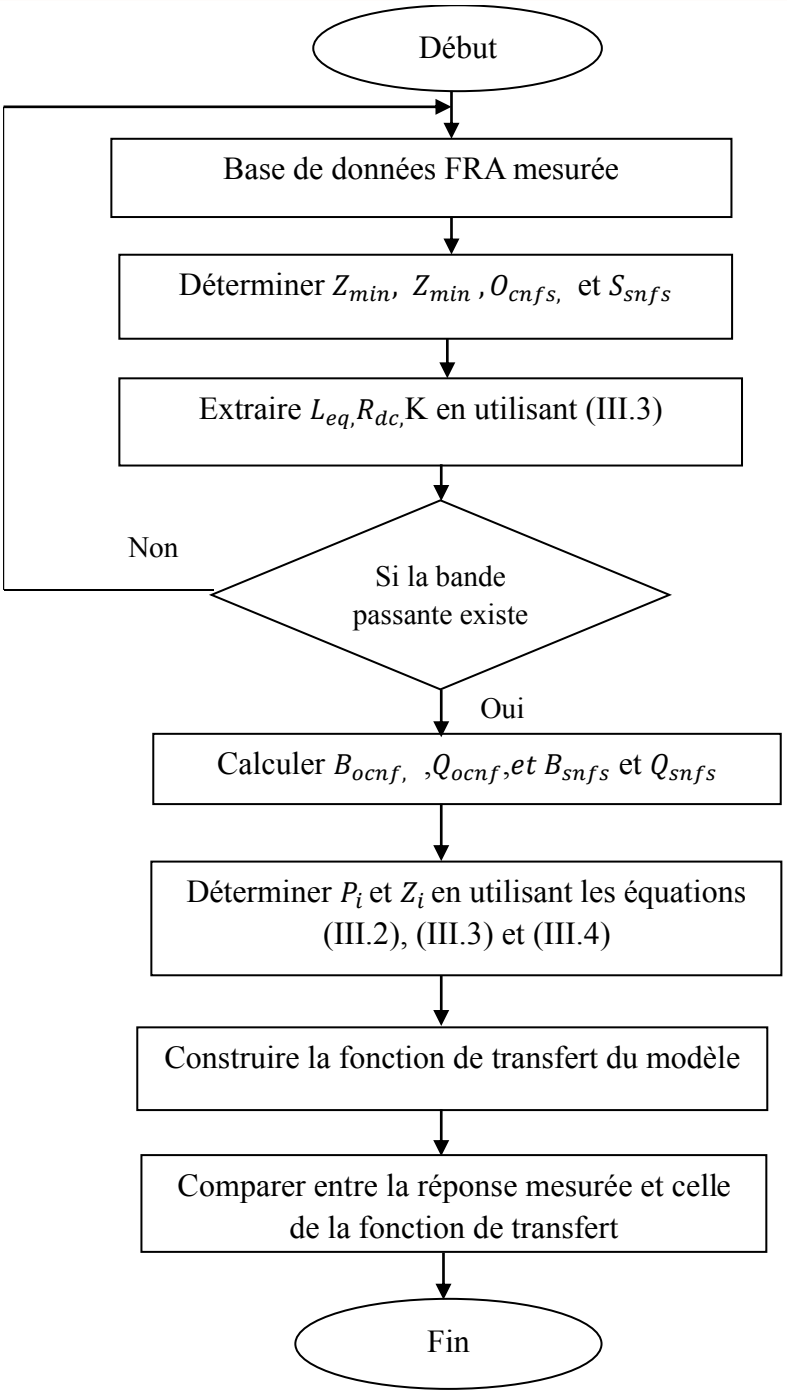


Figure III.5. Procédure de calcule de FT du modèle mutuellement couplé équivalent à l'enroulement du transformateur

III.3.5. Procédure d'estimation des paramètres du modèle mutuellement couplé par la méthode d'interprétation de la morphologie de la réponse d'impédance de l'enroulement du transformateur :

L'interprétation des données de la réponse d'impédance mesurées sur un enroulement de transformateur repose sur la détermination de la gamme des paramètres dans leurs plages de fréquences respectives (LFR, MFR et HFR) illustrées dans la figure III.2.

- ✓ Pour la gamme de fréquences LFR, la linéarité de la courbe d'impédance est importante pour garantir que l'effet d'inductance est généralement inférieur à 1 000 Hz dans tous les enroulements, ce qui est la fréquence la plus basse lorsque la bobine se comporte comme une inductance [41].

- ✓ Pour la gamme de fréquences, la courbe d'impédance $Z_{HFR}(f)$ est déterminée après la dernière fréquence de résonance O_{cnf}lorsque l'angle de phase est très proche de 90°.

- ✓ Pour la gamme de fréquences MFR est situé entre les gammes LFR et HFR.

III.4 Procédure de détermination des paramètres de la fonction de transfert

La courbe de fonction DPI représentée sur la figure III.5 a été mesurée aux bornes de l'enroulement dans une large plage de fréquences ($20\ Hz - 1MHz$) [7], où Leq=49,9 MHz et $Rdc = 7{,}6\Omega$, la valeur de et $K = 2{,}4.10^{10}$. Cependant, sa courbe est composée de trois (03) et deux (02) fréquences propres en circuit ouvert et en court-circuit qui représentent respectivement les pôles et les zéros de la fonction de transfert. Les valeurs de ces paires complexes de pôles et de zéros conjugués ont été calculées en utilisant la procédure proposée dans [38] et sont illustrées dans le tableau. III.1.

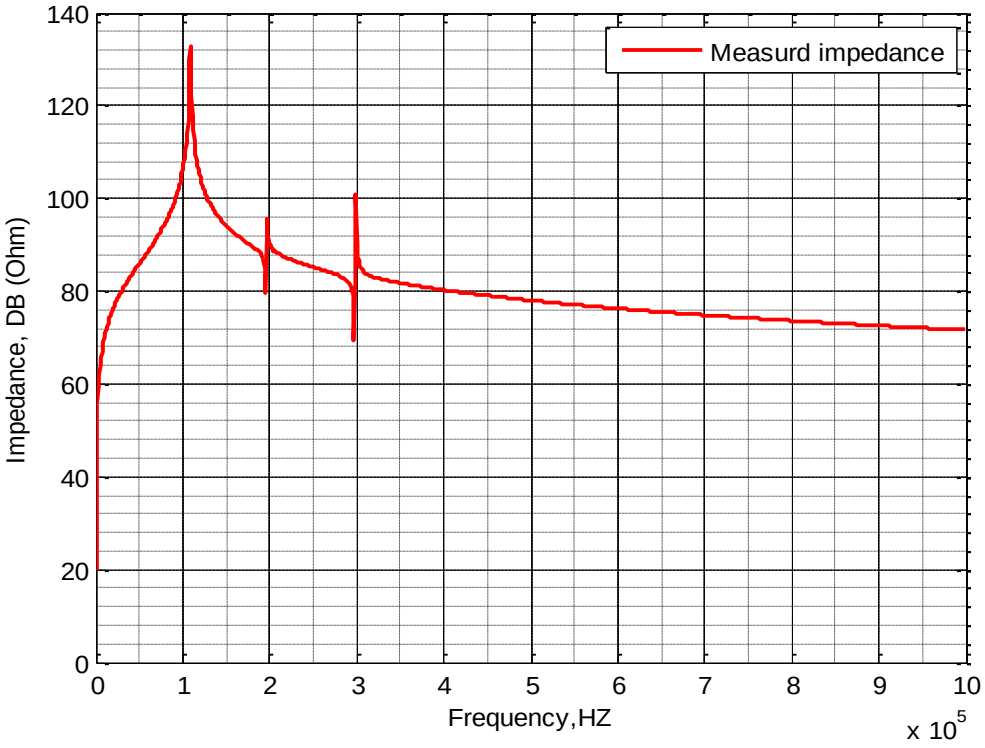


Figure III.6. La courbe de réponse en fréquence mesurée

Tableau III.1. Paires complexes de pôles et de zéros conjugués (M. rad/s)

$\varphi_{0,i}$	z_i	$\omega_{0,i}$	p_i
1.2316	0.0063 + 1.2316i	0.6850	0.0094 + 0.6849i
1.8788	0.0063 + 1.8788i	1.2379	0.0094 + 1.2379i
/	/	1.8914	0.0094 + 1.8913i

L'expression de la fonction de transfert a été obtenue avec le numérateur et le dénominateur pour l'enroulement dans l'état sain comme indiqué dans équation (III.9), le diagramme de Bode (amplitude et phase) de la fonction de transfert déterminée est illustré dans la figure III.6.

$$Z(s) = \frac{2.118e10\, s^5 + 5.363e14\, s^4 + 1.056e23\, s^3 + 1.346e27\, s^2 + 1.108e35\, s + 2.051e37}{s^6 + 3.142e04\, s^5 + 5.532e12\, s^4 + 1.206e17\, s^3 + 7.785e24\, s^2 + 1.11e29\, s + 2.538e36} \text{(III.9)}$$

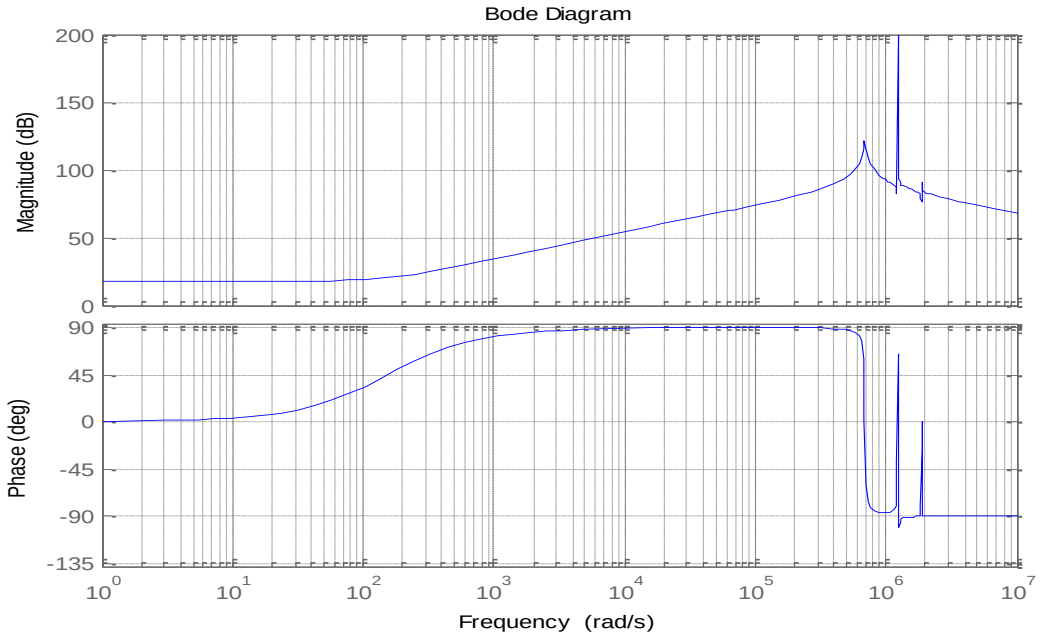


Figure III.7 : Diagramme de Bode de la fonction de transfert calculée

La figure III. 7 montre la comparaison entre la réponse fréquentielle mesurée aux bornes de l'enroulement du transformateur et celle simulée de la fonction de transfert développée du modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur.

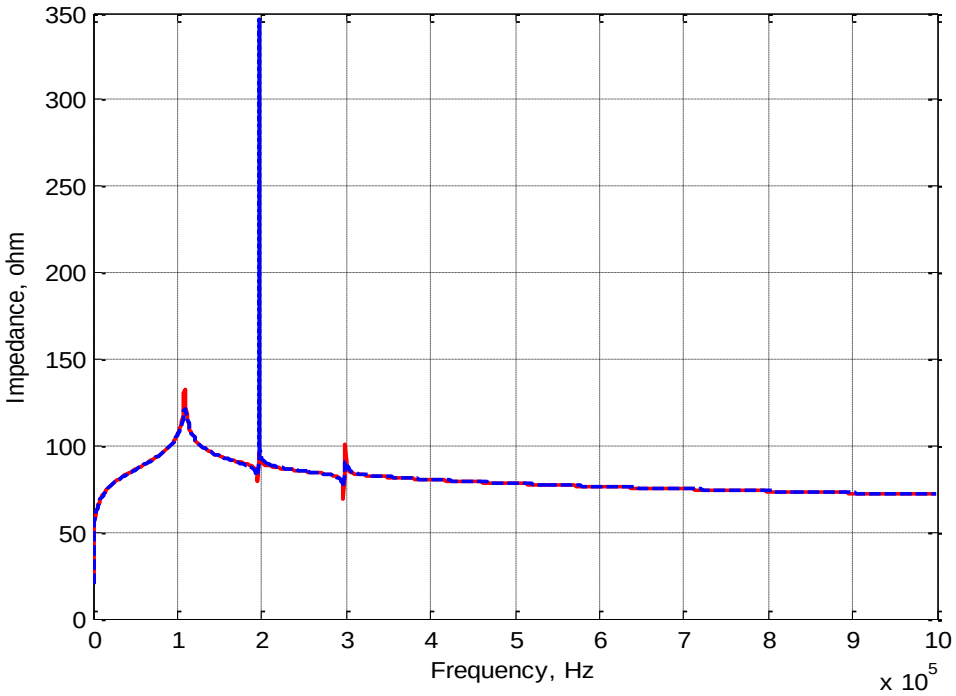


Figure III.8. La comparaison entre la réponse fréquentielle mesurée et simulée de la fonction de transfert développée

III.5. Investigation des défauts de court-circuit en utilisant le modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur

Récemment, des chercheurs ont tenté de proposer le modèle de couplage mutuel comme outil de Simulation des défauts réels de transformateurs [40]. Cependant, après avoir validé le modèle de couplage mutuel correspondant à l'enroulement du transformateur via la procédure d'interprétation de la morphologie du signal d'impédance FR, l'outil utilise ce modèle pour détecter les défauts réels dans l'enroulement du transformateur de puissance, évaluer l'emplacement et la gravité des défauts. Ces déformations d'enroulement.

III.5.1. Procédure de détermination du pourcentage du nombre de spires court-circuités dans chaque disque d'enroulement[7]

Le nombre de spires court-circuitées dans chaque disque est désigné par $ncc1$ pour le disque 1, $ncc2$ pour le disque 2 et $ncci$ pour le disque i. Soit nt est le nombre total de spires par disque dans le cas d'un enroulement sain du transformateur. Les coefficients $n1, n2\ et\ ni$ sont les pourcentages des tours court-circuités sur les disques 1, 2 et i de l'enroulement, qui sont définis comme suit :

$$\begin{vmatrix} n1 = \dfrac{ncc1}{nT} \\ n2 = \dfrac{\mathrm{ncc2}}{nT} \\ ni = \dfrac{\mathrm{ncc}i}{nT} \end{vmatrix}$$

Les coefficients fi représentent le pourcentage de tours non court-circuités par disque de l'enroulement. Ces coefficients sont définis par :

$$\begin{vmatrix} f1 = 1 - n1 \\ f2 = 1 - n2 \\ fi = 1 - n \end{vmatrix}$$

La résistance, inductance propre, les inductances mutuelles et la capacité série d'un enroulement sont déterminées par sa valeur nominale et le coefficient fi donné par les matrices suivantes :

$$\mathbf{R} = \mathbf{r} * \begin{vmatrix} f1 & 0 & 0 \\ 0 & f2 & 0 \\ 0 & 0 & fi \end{vmatrix}$$

$$\mathbf{L} = \begin{vmatrix} f1^2\ ls & f1f2M12 & \dots & f1fiMi,Mj \\ f2f1M12 & f2^2\ ls & \dots & f2fiMi,Mj \\ f1fiMi1 & fif2Mi2 & \dots & fi^2ls \end{vmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} \frac{\mathrm{Cs}}{f1} + \frac{\mathrm{Cg1}}{2} - \frac{cs}{2} & \dots & 0 \\ -\frac{cs}{\mathrm{f2}} + \frac{\mathrm{Cg2}}{\mathrm{f2}} + Cg2 & \dots & 0 \\ 0\ 0 & \dots & 2\frac{\mathrm{CS}}{fi} + CgN \end{vmatrix}$$

Les changements physiques dans l'enroulement (tels que les défauts de court-circuit) se reflètent dans les paramètres du modèle et affectent aussi la courbe DPI de l'enroulement et leurs fréquences de résonances.Cependant, ces changements physiques peuvent être simulés en introduisant un pourcentage fi dans la matrice d'inductance et de capacité du modèle mutuellement couplé correspondant à l'enroulement du transformateur.

Note : La capacité shunt Cg peut être définie par la capacité entre l'enroulement et la terre. Cependant, cette capacité est la capacité équivalente des capacités de shunt entre les spires et la masse. Comme les capacitances entre les spires ne sont pas égales, leur capacité shunt équivalente ne peut pas être exprimée en fonction du nombre de spires et ne peut donc pas être exprimée en fonction du coefficient de défaut fi. Cependant, pour des défauts de court-circuit mineurs, le changement de la capacité shunt est très petit et par conséquent leur influence sur la courbe d'impédance est négligeable.

III.6. Simulation des défauts de court-circuit pour les différents disques de l'enroulement

Le modèle de couplage mutuel peut être proposé comme outil de simulation de défauts de court-circuit pour analyser et expliquer les défauts des enroulements de transformateur Pour atteindre cet objectif, des court-circuit ont été réalisés sur les différents disques de la bobine en modifiant les paramètres de la bobine selon la méthode proposée par [40]. Ensuite, la FT a été utilisée pour évaluer la gravité de ces défaillances. Les figures III.8 (a), (b), (c) et (d) montrent les réponses d'impédance de l'enroulement du transformateur obtenues pour les défauts de court-circuit au niveau de différents disques de l'enroulement. Les défauts ont été effectuées sur les disques de la bobine en pourcentages égaux pour étudier leur influence sur

la réponse en fréquence de la bobine afin de localiser l'emplacement de défaut sur l'enroulement.

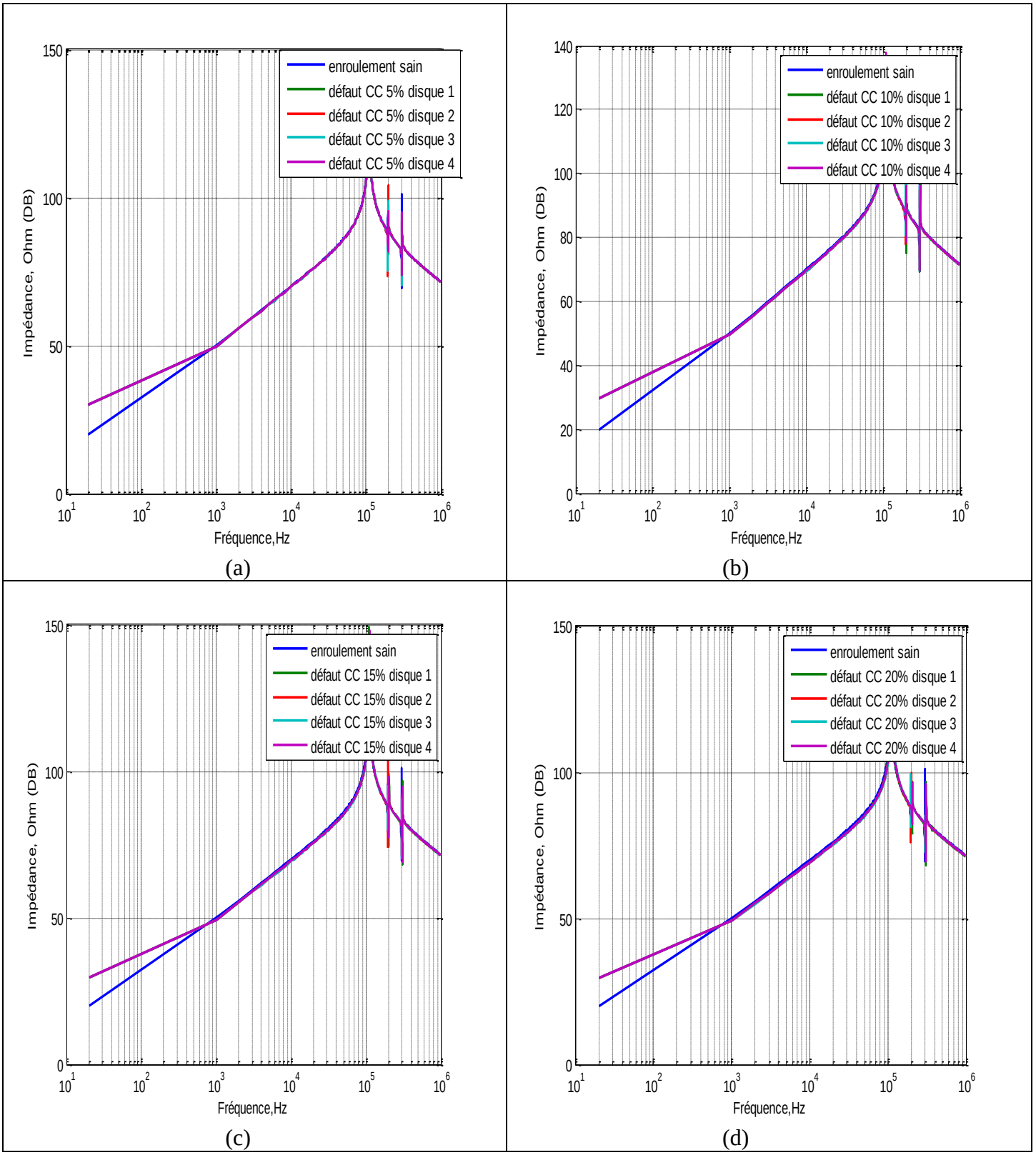


Figure III.9. Les réponses d'impédances de l'enroulement du transformateur pour les défauts de court-circuit, (a) : défauts 5% dans les disque1, 2, 3 et 4, (b) : défauts 10% dans les

disque1, 2, 3 et 4, (c) : défauts 15% dans les disque1, 2, 3 et 4 et (d) : défauts 20% dans les disque1, 2, 3 et 4

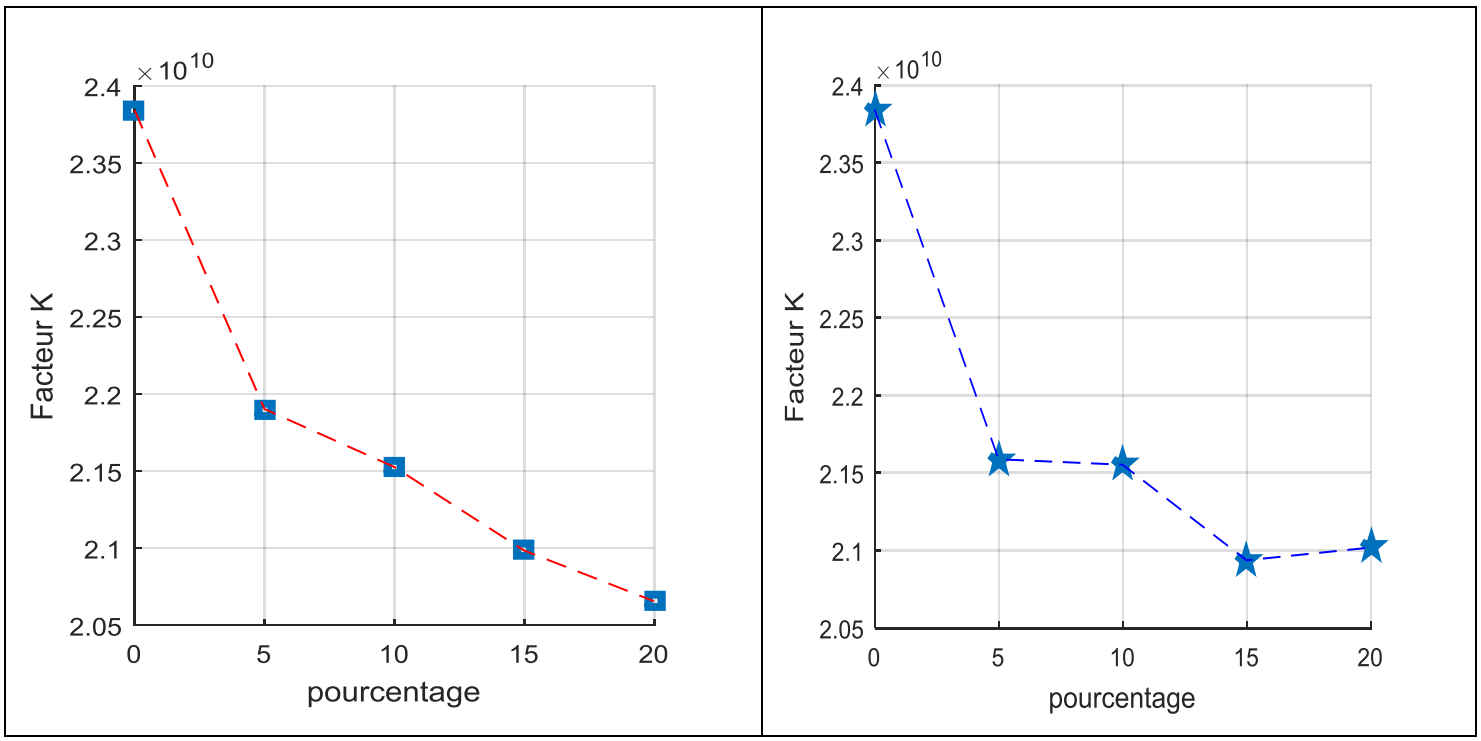
Le tableau III.2 montre les paramètres de la FT tels ; l'inductance L_{eq}(mH), la résistance R_{dc} (Ω), *le facteur K et l'angle de la pente* θ (°)) de l'enroulement pour l'état sain et les états défaillants, où on peut constater que l'inductance équivalente diminue en fonction de déplacement des défaillances dans les disques de l'enroulement et évidement leur angle de phase. Toutefois, les variations des inductances disques symétriques (1 et 4) et (2 et 3) sont égales.

Tableau III.2: Les paramètres de la FT (L_{eq}(mH), R_{dc} (Ω), *K et* θ (°)) de l'enroulement pour l'état sain et défaillant

Paramètres de la FT Etat de l'enroulement	L_{eq}(mH)	R_{dc} (Ω)	K	θ (°)
Sain	0.04945	7.6	2.3843e+10	2.8309
Défaut de CC de disque 1				
Défaut 5%	0.04514	7.50	2.1904e+10	2.5845
Défaut 10%	0.04494	7.41	2.1588e+10	2.5731
Défaut 15%	0.04494	7.31	2.1986e+10	2.5731
Défaut 20%	0.04514	7.22	2.1904e+10	2.5845
Défaut de CC de disque 2				
Défaut 5%	0.04402	7.50	2.1528e+10	2.5205
Défaut 10%	0.04361	7.41	2.1553e+10	2.4971
Défaut 15%	0.04361	7.31	2.1726e+10	2.4971
Défaut 20%	0.04402	7.22	2.1528e+10	2.5205
Défaut de CC de disque 3				
Défaut 5%	0.04291	7.50	2.0986e+10	2.4571
Défaut 10%	0.04231	7.41	2.0937e+10	2.4227
Défaut 15%	0.04231	7.31	2.1456e+10	2.4227
Défaut 20%	0.04291	7.22	2.1369e+10	2.4571
Défaut de CC de disque 4				
Défaut 5%	0.04184	7.50	2.0657e+10	2.3958
Défaut 10%	0.04104	7.41	2.1019e+10	2.3501
Défaut 15%	0.04104	7.31	2.1182e+10	2.3501
Défaut 20%	0.04184	7.22	2.1207 e+10	2.3958

III.6.1. Evaluation de la gravité des défauts de court-circuit dans les disques de l'enroulement

Les figures III.9 (a), (b), (c) et (d) montre L'allure de facteur K de la FT en fonction du pourcentage après avoir inclus les défauts de court-circuit, (a) : défauts 5% dans les disque1, 2, 3 et 4, (b) : défauts 10% dans les disque1, 2, 3 et 4, (c) : défauts 15% dans les disque1, 2, 3 et 4 et (d) : défauts 20% dans les disque1, 2, 3 et 4, où on peut constater que les courbes sont variés du façon monotone, ce qui prouve la possibilité de l'utiliser comme outil de diagnostic des défauts des bobinages, notamment en ce qui concerne l'évaluation de leur gravité. De même pour les courbes de l'angle de la pente θ (°) en fonction de Leq montrés dans la figure III.10.



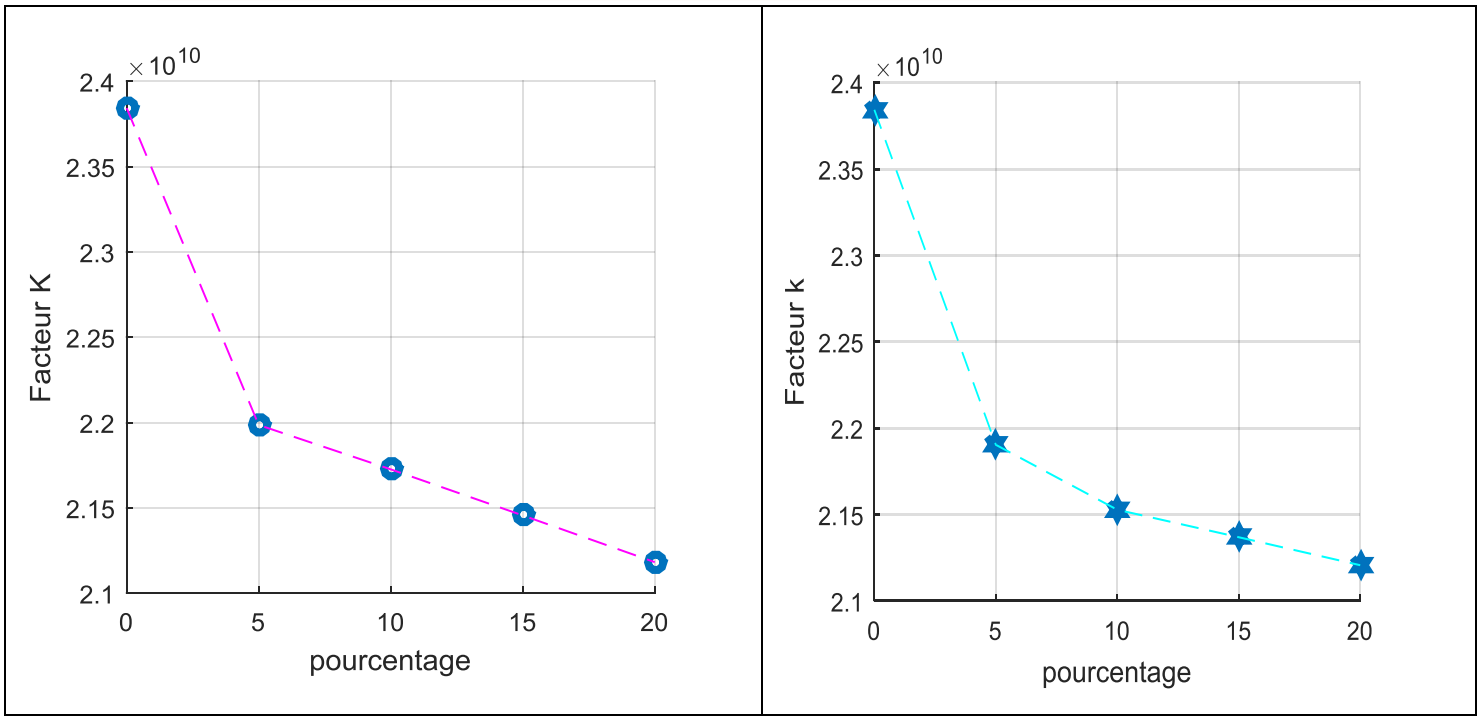
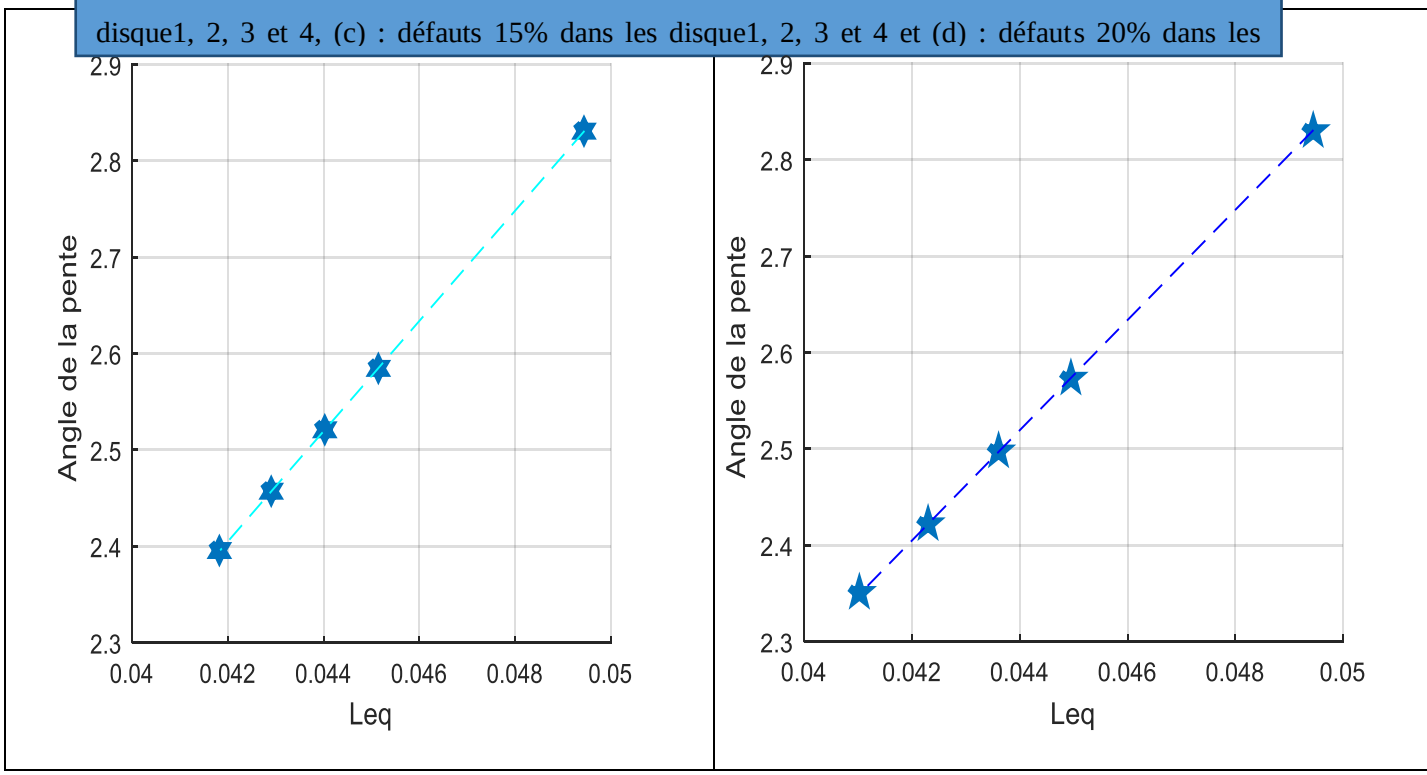


Figure (III.10) : L'allure de facteur K de la FT de l'enroulement du transformateur pour les défauts de court-circuit, (a) : défauts 5% dans les disque1, 2, 3 et 4, (b) : défauts 10% dans les disque1, 2, 3 et 4, (c) : défauts 15% dans les disque1, 2, 3 et 4 et (d) : défauts 20% dans les



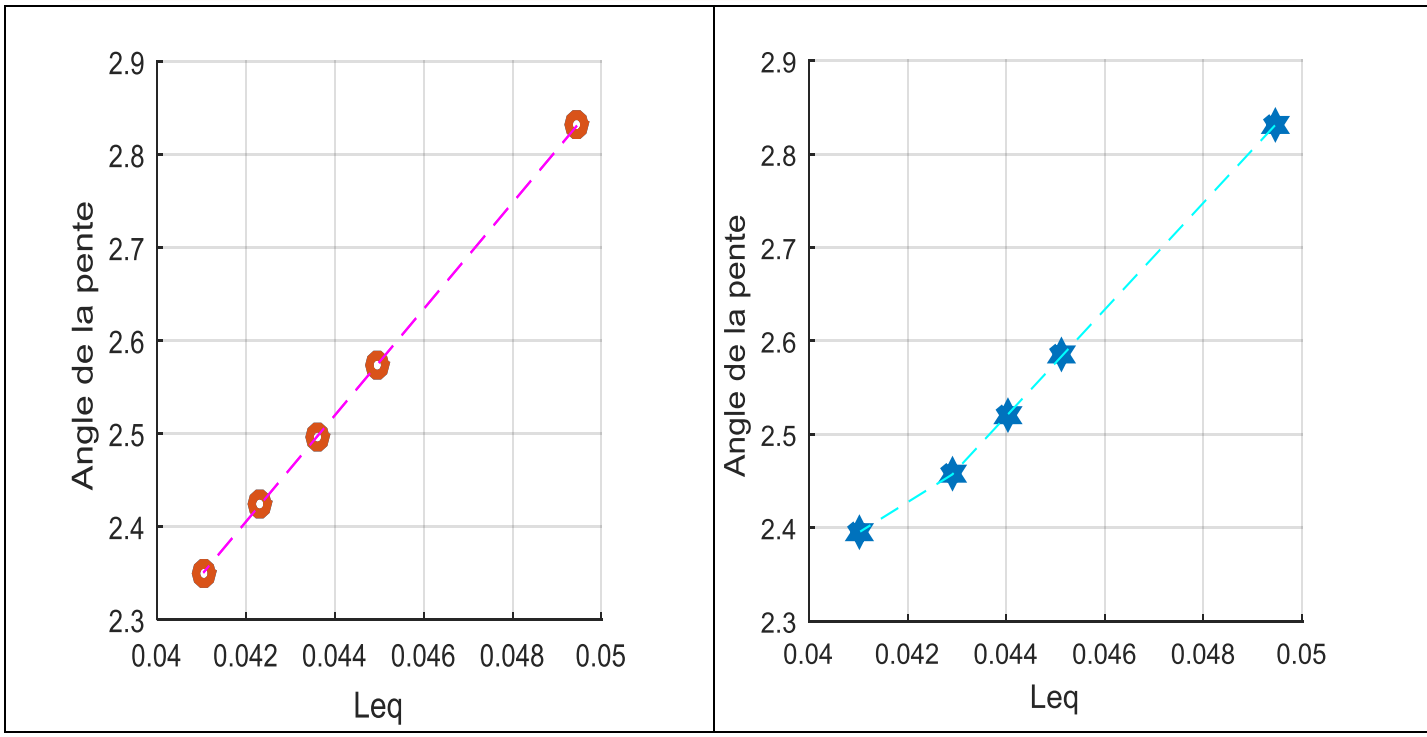


Figure III.11: L'allure de l'angle de la pente θ (°) en fonction de Leq de l'enroulement du transformateur pour les défauts de court-circuit, (a) : défauts 5% dans les disque1, 2, 3 et 4, (b) : défauts 10% dans les disque1, 2, 3 et 4, (c) : défauts 15% dans les disque1, 2, 3 et 4 et (d) : défauts 20% dans les disque1, 2, 3 et 4

III.7 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la proposition de la fonction de transfert du modèle mutuellement couplé physiquement réalisable comme un outil de localisation et d'évaluation de la gravité des défaillances de l'enroulement du transformateur. Toutefois, la fonction de transfert du modèle a été construit via la réponse d'impédance mesurée en régime fréquentiel aux bornes de l'enroulement d'une manière autonome, afin d'utiliser les paramètres (K, Leq, θ (°)et τ) de la fonction de transfert comme outil de diagnostic des défaillances de l'enroulement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail se concentre sur une méthode d'extraction des paramètres d'enroulement du transformateur basée sur les données de réponse en fréquence FRA. En fait, FRA est une méthode de diagnostic relativement nouvelle pour détecter les dommages mécaniques des enroulements de transformateur. Toutefois, nous avons présenté dans ce mémoire une méthode basée sur la morphologie des signaux FRA mesurés aux bornes des enroulements du transformateur pour l'exploiter dans la construction de la fonction de transfert de leur modèle mutuellement couplé physiquement réalisable. La construction de la fonction de transfert est basée sur l'extraction des paramètres principaux du modèle tels que ; la résistance R_{dc}, l'inductance équivalente L_{eq}, la capacité équivalenteC_{eq} de l'enroulement et les fréquences naturelles des circuit ouverts O_{cnfs} et en court-circuit S_{cnfs} dans les gammes des basses, moyennes et hautes fréquences. La fonction de transfert construit permet de caractériser l'entrée du système (la tension) et la sortie du système (le courant) par une relation mathématique dans le domaine fréquentiel qui peut être un outil d'analyse et d'interprétation des caractéristiques fréquentielles des bobinages du transformateur de puissance. En outre, les paramètres de cette fonction de transfert tels que ; le facteur K et l'angle de phase de la pente de l'inductance équivalente ont été utilisé pour localiser et évaluer les défaillances de l'enroulement.

Les Références

[1] : Omicron electronics ‘FR Analyzer Manuel d’utilisation’ Référence – VESD0662 Version du manual: FRA.FR, 2006.

[2] J.R. Lucas, « historical development of the transformer », chairman IEE Srilanka center, 2000/1.

[3] TOTAL, « LES ÉQUIPEMENTS : les transformateurs », MANUEL DE FORMATION, Cours EXP-PR-EQ170, 2007

[4] S. JESZENSKY, « History of transformers », IEEE power engineering review, deceber 1996.

[5]: BOURGEOIS.A, « Etude du phénomène d’électrisation par écoulement sur les cartons Des transformateurs de puissance », Institut national polytechnique de Grenoble, Février 2007

[6] B. BAYALA, « machines électrique », édition revue, 2010.

[7] Bouziane Abderrahmane Yousfi Mohamed Zohir « Investigation des déformations mécaniques des enroulements du transformateur de puissance en utilisant leur modèle équivalent mutuellement couplé » UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA ,2023

[8] LEFEVRE.A, "Contrebutions a la modélisation électriques, électromagnétique et Thermique des transformateurs «, Ecole polytechnique de Nantes, 2006.

[9] : Jean Sanchez, « Aide au diagnostic des défauts des transformateurs de puissance » Université Grenoble alpes, 2011.

[10] : Mr ZELLAGUI Mohamed, « Etude protection des réseaux électriques mt 30& 10 kv », Mémoire de magister université de Constantine. Juillet 2010

[11] : 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).

[12] R. MANDERLIER, « Formation générale au transformateur de puissance », CG Holding Belgium NV, 2012.

[13] G. CORMIER, « chapitre 8. TRANSFORMATEUR », GEN1153.

[14] J. SANCHEZ, « aide au diagnostic de défaut des transformateurs de puissance », université de Grenoble Alpes, 2011.

[15] : DERBALI RABAH, « Diagnostic et Localisation des Défauts dans les Enroulements du Transformateur » Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2012.

[16] : Abdelkebir Amir, Saadi Nassim, « Application de la logique floue pour le diagnostic Des transformateurs de puissance par analyse des gaz dissous », Mémoire de master, Faculté Des Sciences de l'Ingénieur, Université de Boumerdes, Juin 2017.

[17] Cour des hautes tensions transformateur disponible sur :]

http://transfolab.com/monitoring/ [transformateurs de puissance.CH/HT/A-Haute tension Hotmail consulté le 15/05/2020

[18] Transformateur des puissances partie 1 norme la norme CEI 60076-11

[19] : Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs LARIS MOHAMED MEGATELI AHMED AMINEde puissance

GRTE octobre 2008 ».

[20] : Piere. Mayé, « Aide-mémoire, électrotechnique », Duond, paris, 2006, ISBN20

[21] LARIS MOHAMED MEGATELI AHMED AMINE, « Analyse et diagnostic de la déformation des enroulements du transformateur par la technique d'analyse de la réponse fréquentielle FRA », UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA,2015

[22] Abdelkebir Amir et Saadi Nassim, « Application de la Logique Floue pour le diagnostic des Transformateurs de Puissance par Analyse des Gaz dissous », mémoire de magister université de BOUMERDES, Juin 2017.

[23] :Charles Sweetser , B.Sc., M.Sc. Dr. Tony McGrail, 'Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications A Technical Paper from Doble Engineering' Version 1.0, 01/2003

[24] :Cigre, 'mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)' Working Group A2.26.2007.

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

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

[27] :MEGGER« FRAX 101 Analyseur de réponse de la fréquence de balayage », FRAX101_DS_fr_V01.

[28] HASNAOUI Ahmed et MOUSSA Salah «Application de la méthode d'analyse fréquentielle pour le diagnostique des défaillances des enroulements du transformateur de puissance» mémoire de Master, Université de medea ,2020.

[29] HANIF TAVAKOLI .« A High Frequency Transformer Winding Model for FRA

[30] RAHIMPOUR, E.; CHRISTIAN, J.; FESER, K. et al. Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings.IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 493-505

[31] : MEZARI NAOUEL, « Diagnostic des transformateurs de puissances », mémoire de magister ». Département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzo. Juillet 2011.

[32] : ZAIDI .R and HADDADI.A «LOCALISATION DE DEFAUTS DANS UN

TRANSFORMATEUR DE PUISSANCES» mémoire de master, Université de Tizi-Ouzou,2011.

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

[34] Moustafa Sahnoune Chaouche, Samir Moulahoum, and Hamza Houassine. Low and high frequency model of three phase transformer by frequency response analysis measurement. Open Phys. 2018; 16, pp. 117–122

[35] P. Karimifard, G.B. Gharehpetian, A new algorithm for localization of radial deformation and determination of deformation extent in transformer windings, Electric Power Systems Research, 2008, 78, pp. 1701–1711

[36] A. Abu-Siada, N. Hashemnia, S. Islam, and Mohammad A. S. Masoum, Understanding Power Transformer Frequency Response Analysis Signatures, IEEE Electrical Insulation Magazine. 2013, Vol. 29, No. 3, pp. 48 – 56.

[37] K Ragavan, L Satish, Localization of changes in a model winding based on terminal measurements: Experimental study, 2007, IEEE transactions on power delivery, 2007, 22 (3), 1557-1565

[38]K Ragavan, L Satish, Construction of physically realizable driving-point function from measured frequency response data on a model winding, IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (2), 760-767.

[39]Shah, K.R., Ragavan, K.: Assessing mechanical deformations in two winding transformer unit using reduced- order circuit model. Electr. Power Energy Syst. 79, 235–244 (2016)

[40]: RS Chaouche, H Houassine, S Moulahoum, MS Chaouche, S Bensaid "A Robust Approach for Locating and Assessing Mechanical Faults in an Actual Transformer Winding Using the State Space of Its Lumped Equivalent Model" Russian Journal of Nondestructive Testing 58 (6), 488-498 university médéa 2021

[41]. Zhongdong, W., Jie, Li.: Interpretation of transformer FRA responses: Part I: influence of winding structure. IEEE Trans. Power Deliv. 24(2) (2009)