REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : électrotechnique

Spécialité : réseaux électrique

Investigation des déformations mécaniques des enroulements du transformateur de puissance en utilisant leur modèle équivalent mutuellement couplé

Présentés par :

Bouziane Abderrahmane

Yousfi Mohamed Zohir

Proposés et Dirigés par :

Moustafa Sahnoune Chaouche

Abderrazak Gacemi

Promotion 2022-2023

REMERCIMENT

Au commencement, grâce à ALLAH Tout-Puissant, louez-le pour la force, la volonté, la patience et le succès grâce auxquels nous avons pu accomplir ce modeste travail, et les prières et la paix sur Son Messager, le fidèle envoyé.

*Nos remerciements les plus profonds au Dr. Moustafa Sahnoune Chaouche et Dr.A***bderrazak Gacemi** *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

Je dédie d'abord ce modeste travail à mes chères parentes

Yousfi fodhil et B.chafia

Pour leurs incessants encouragements, pour leur soutien durant cette période et les moyens mis à ma

disposition

Leurs extrêmes exigences leur joie de vivre et leurs savoir-faire incommensurables je ferais mon maximum pour ne pas

les décevoir à l'avenir

A Mes Frères : Tarek et Abdel malek

A ma sœur : Lina

A mes deux grandes mères

A mon promoteur : Ms Moustafa chaouche
Et Ms abderrazak Gacemi

A tous ceux qui me sont proches et qui me sont chers.

Yousfi Mohamed zohir

Dédicace

Je dédie d'abord ce modeste travail a mes parents

Mohamed et zhor

Pour leurs incessants encouragements, pour leur soutien durant cette période et les moyens qui ils mettent à ma

disposition

Leurs extrêmes exigences leur joie de vivre et leurs savoir-faire incommensurables je ferais mon maximum pour ne pas

les décevoir à l'avenir

A Mes Frères : Riad et walid adel loyal mesta toni ali

A ma sœur

A ma femme : narimane

Gheribiya makhlsetche pizza

A tous ceux qui me sont proches et qui me sont chers.

Bouziane abderahman

Résumé

ملخص

تم تكريس هذا العمل لبناء دائرة مجدية فيزيائيًا مقترنة بشكل متبادل تعادل لف محول الطاقة بناءً على التفسير المورفولوجي للإشارة ومع ذلك، يهدف النهج إلى تحديد معلمات النموذج من نطاقات التردد (الترددات .(FRA) فقط من تحليل الاستجابة للتردد المقاس المنخفضة والمتوسطة والعالية)، يتم تحويل سلوكيات كل نطاق تردد إلى معلمات كهربائية لبناء النموذج المقترن بشكل متبادل. بالإضافة إلى ذلك، تم التحقق من صحة النموذج الذي تم إنشاؤه بشكل تجريبي من أجل استخدامه كأداة لمحاكاة الإخفاقات الحقيقية للف لتحديد وتقييم جاذبيتها

مفتاح الكلمات : المحولات, التشخيص تحليل التردد كشف اماكن الاخطاء,

Résume :

Ce travail a été consacré à la construction du circuit mutuellement couplé physiquement réalisable équivalent à enroulement du transformateur de puissance basé uniquement sur l'interprétation de morphologique du signal à partir de son analyse de réponse en fréquence mesurée (FRA). Toutefois, l'approche vise à déterminer les paramètres du modèle à partir des gammes de fréquences (basses, moyennes et hautes fréquences), les comportements de chaque gamme de fréquence est convertis en des paramètres électriques pour construire le modèle mutuellement couplé. Par ailleurs, le modèle construit a été validé expérimentalement afin de l'exploiter comme un outil de simulation des défaillances réelles de l'enroulement pour localiser et évaluer leurs gravités.

Mot clés : Transformateur, Diagnostic, Analyse fréquentiel(FRA), détection et la localisation des défauts.

Abstract :

This work was devoted to the construction of the physically realizable mutually coupled equivalent circuit of the power transformer winding based only on the interpretation of the signal morphology from its measured frequency response (FRA). However, the approach aims to determine the parameters of the model from the frequency ranges (low, medium and high frequencies). Besides, the behaviors of each frequency range are converted into electrical parameters to build the mutually coupled model. In addition, the model has been validated experimentally in order to use it as a tool for simulating real winding failures to locate and assess their severity.

Keyword: transformer, Diagnosis, frequency analysis (FRA), Detection and Localization of Faults.

Table des matières

Résumé..... I
Tables des Matières..... III
Liste des Figures VI
Liste des Tableaux VIII
Liste des Abréviations…… IX

Introduction Générale……1

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs électriques

I.1-Introduction :.....3
I.2-Définition :.....3
I.3-Principe de fonctionnement :.....3
I.4-Construction interne d'un transformateur de puissance :.....4
I.4.1-Partie active :.....4
I.4.1.1-Circuit magnétique :.....4
I.4.1.2-Les enroulements :.....5
I.4.2-Isolation :.....7
I.4.2.1-Huile :.....7
I.4.2.2-Isolation papier :.....8
I.4.2.3-La Cuve :.....9
I.4.2.4-Isolation thermoplastique :.....9
I.4.2.5-Traversées :.....10
I.5-Types des transformateurs :.....11
I.5.1-Transformateurs de transmission :.....11
I.5.2-Transformateurs de distribution :.....11
I.5.3-Transformateurs de type sec :.....12
I.5.4-Transformateurs immergés dans l'huile :.....13
I.5.5-Autotransformateurs :.....13
I.6-Le système de refroidissement :.....14
I.7-Composants associés au transformateur de puissance :.....14
I.8-Couplage du transformateur :.....16
I.9. Défauts externes et internes dans le transformateur :.....16
I.9.1. Défauts externes dans le transformateur de puissance.....16
I.9.1.1. Court-circuit externe du transformateur de puissance.....16
I.9.1.2. Haute perturbation de tension dans le transformateur de puissance 16

I.9.2. Défauts internes dans le transformateur de puissance 17
I.9.2.1. Défauts à la terre 17
I.9.2.2. Défauts de base : 18
I.9.2.3. Défauts entre tours 19
I.9.2.4. Défauts phase à phase 19
I.9.2.5. Décharges Partielles 19
I.9.2.6. Mouvement Axial et déformations radiales d'un enroulement : 20
I.10.Conclusion : 20

CHAPITRE II : Interprétation de la technique FRA en utilisant le modèle mutuellement couplé équivalent aux enroulements du transformateur de puissance

II.1. Introduction : 21
II.2. Définition : 21
II.3. L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) 21
II.4. Objectifs de la FRA : 22
II.5. Théorie fondamental de la FRA 22
II.6. Quand mesurer un FRA? 23
II.7. Types de connexions FRA 23
II.7.1 Circuit overt (End-to-End Open Circuit) 23
II.7.2 Court-circuit (End-to-End Short Circuit) 24
II.8. Principaux techniques de modélisation des transformateurs en vue de FRA 24
II.9. Classification des modèles orientés FRA 25
II.10. Modélisation des enroulements du transformateur par la méthode des inductances propres et mutuelles 26
II.11. Les principaux paramètres du modèle mutuellement couplé 26
a) La résistance en courant continu Rdc : 26
b) L'inductance équivalente Leq : 27
c) La capacité shunt effective $Cgeff$: 27
II.12. Équations du modèle mutuellement couplé 28
II.12.1 Représentation matricielle des équations du modèle 29
II.13. Conclusion : 31

CHAPITRE III : Investigation des déformations mécaniques des enroulements du transformateur en utilisant leur modèle équivalent : résultats expérimentaux

III.1. Introduction 32

III.2. Modèle équivalent de l'enroulement du transformateur 32

III.3. Analyse et interprétation de la morphologie de la courbe d'impédance de l'enroulement du transformateur 33

III.3.1. Réponse en basse fréquence (sous-bande LFR) 35

III.3.2 Réponse en moyenne fréquence (sous-bande MFR) 36

III.3.3. Réponse en régime des hautes fréquences (sous-bande HFR) 37

III.3.4. 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 37

III.4. Validation expérimentale de la méthode d'interprétation de la morphologie du signal FRA pour construire le modèle mutuellement couplé 39

III.5. Investigation des défauts de court-circuit en utilisant le modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur 43

III.5.1. Procédure de détermination du pourcentage du nombre de spires court-circuités dans chaque disque d'enroulement 43

III.5.2. Simulation des défauts de court-circuit pour les différents disques de l'enroulement 44

III.5.2.1. Evaluation de la gravité des défauts de court-circuit dans chaque disque de l'enroulement 45

III.5.2.2. Investigation de la position des défauts de court-circuit de l'enroulement 46

III.5.2.3. Exploitation de la morphologie du signal FRA dans la localisation et l'évaluation de la position des défauts de court-circuit de l'enroulement 48

III.6. Conclusion : 49

Conclusion générale 51

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance. 4
Figure I.2 : Figure (I.2) : Circuit magnétique triphasé type colonne 5
Figure I.3 : Circuit magnétique triphasé type cuirassé 6
Figure I.4 : Enroulement. 7
Figure I.5 : Coupe de demi-enroulement. 7
Figure I.6 : Enroulement en couche. 8
Figure I.7 : Enroulement en galettes. 8
Figure I.8 : Processus de raffinage pour les huiles 9
Figure I.9 : Exemple d'un système d'isolation typique avec des barrières en papier séparées par de l'huile 10
Figure I.10 : La cuve d'un transformateur de puissance. 10
Figure I.11 : Isolation thermoplastique. 11
Figure I.12 : Traversé porcelaine 12
Figure I.13 : Traverse condensateur 12
Figure I.14 : Transformateurs de transmission 13
Figure I.15 : Transformateur de distribution. 13
Figure I.16 : Transformateur de type sec. 14
Figure I.17 : Transformateur immerge dans l'huile 15
Figure I.18 : Schéma équivalent d'un autotransformateur.PG1 16
Figure I.19 : Principaux organes d'un transformateur de puissance 17
Figure I.20 : Défaut à la terre d'un enroulement 20
Figure I.21 : Dommages à l'intérieur de la pile d'enroulements de bobine du transformateur rempli d'huile 21
Figure I.22 : Défaut entre les tours du transformateur 22
Figure I.23 : Tests complémentaires recommandés 22
Figure I.24 : Déplacement axial (a) et déformation radiale (b) d'un enroulement. 23
Figure II.1 : Théorie Et Fondamental De FRA 22
Figure II.2 : Modèle de transformateur Vaessen (a) et Wilcox (b) Modèle mutuellement couplé 24
Figure II.3 : Alternatives pour la création d'un modèle à des fins de diagnostic par FRA 25
Figure II.4 : circuit équivalent mutuellement coupler 26
Figure II.5 : Circuit équivalent pour mesurer C_(g.eff) 28
Figure III.1 : Modèle de circuit équivalent mutuellement couplé de l'enroulement de transformateur 32
Figure III.2 : Décomposition de la réponse fréquentielle FRA 33
Figure III.3 : Modèle HFR équivalent à un enroulement du transformateur 36
Figure III.4 : Représentation graphique de la procédure proposée 37
Figure III.5 : Représentation du test FRA expérimentale de l'enroulements réels 38
Figure III.6 : La réponse d'impédance mesurée à l'état sain de l'enroulements réel 39
Figure III.7 : Comparaison entre 〖Z(f)〗_FR mesuré et celle estimé par l'approche d'interprétation de la morphologie du signal FRA. 41
Figure III.8 : Les réponses d'impédances de l'enroulement du transformateur pour les défauts de court-circuit, (a) : défauts 5%, 10%, 15% et 20% sur disque1, (b) : défauts 5%, 10%, 15% et 20% sur disque2, (c) : défauts 5%, 10%, 15% et 20% sur disque3 et (d) : défaut 44

Listes des figure

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 46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Principaux organes d'un transformateur de puissance 18
Tableau III.1 : Valeurs estimées des inductances en mH. 40
Tableau III.2 : Valeurs estimées des capacités (pF).....40
Tableau III.3 : Comparaison entre les fréquences de résonances mesurées et celles estimées.41
Tableau III.4 : Les valeurs de STD calculé dans les gammes lfr et hfr pour l'enroulement sain et d'effectuer.....48

Liste des Abréviations

R : La résistance

L : L'inductance

C : La capacité

f : Fréquence

f_0 : La fréquence des résonance

r_g : Résistance interne de générateur

l_s : L'inductance propre

$M_{i,j}$: L'inductance mutuelle entre les disques i et j.

c_g : Capacité shunt

c_s : Capacité série

R_s : Résistance en parallèle avec la capacité série

i_{cg} : Courant dans la capacité shunt

i_{cs} : Courant dans la capacité série

[C] : La matrice de capacités

[L] : La matrice des inductances

R_{dc} : Résistance mesurée en courant continu

L_{eq} : Inductance à noyau d'air équivalente

C_{geff} : Capacité shunt effective à la masse

kHz : killo Hertz

M_{on} : L'inductance mutuelle équivalente

C_{eq} : La capacité équivalente de l'enroulement

S_{cnfs} : Fréquences de résonance correspond un court-circuit

Liste des Abréviations

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
T_e :	La période d'échantillonnage
T :	La période

Introduction générale

Sur une certaine distance et/ou une certaine puissance, la transmission d'énergie électrique doit s'effectuer sous une tension suffisamment élevée. En fait, la puissance est le produit de la tension par le courant ; pour une puissance donnée, plus la tension est élevée, plus le courant est faible. Par conséquent, cela conduit à des pertes par effet Joule et à des sections de conducteurs plus petites.

Les transformateurs de puissance sont sans aucun doute les dispositifs qui ont conduit à l'essor 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 transformateurs, bien que peu fréquentes compte tenu du nombre d'équipements en fonctionnement, sont souvent gênantes en termes de coûts de réparation, mais sont souvent plus graves en termes d'indisponibilité du réseau associé.[1]

Cela semble donc évident dans le cadre en commençant par leur maintenance préventive, en mettant en œuvre des méthodes de test et de diagnostic, il est possible de suivre et d'identifier les premiers symptômes de défaillance pouvant apparaître lors de la phase de développement du réseau.

C'est pourquoi la recherche se positionne désormais sur l'amélioration des capacités de diagnostic de l'état des transformateurs, sur lesquelles repose l'un des leviers de développement de l'assistance technique électrique.

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.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à la construction du modèle mutuellement physiquement réalisable couplé équivalent à un enroulement du transformateur largement utilisé dans l’analyse et l’interprétation des propriétés électromagnétiques des transformateurs

électriques dans le but de diagnostic des déformations mécaniques des enroulements. Toutefois, la construction de ce modèle est basée sur l'extraction des principaux paramètres de l'enroulement tels que ; les fréquences de résonance et d'antirésonances, l'inductance équivalente et la capacité équivalente directement à partir de la courbe d'impédance mesurée sur une gamme de fréquence. Par conséquent, les paramètres ont été estimés en utilisant un algorithme d'optimisation (BA) via la morphologie du signal FRA uniquement. Par ailleurs, le modèle construit a été validé expérimentalement sur un enroulement réel, où les résultats de simulation ont été comparés aux résultats de mesure et étaient très cohérents. Après avoir validé le modèle de l'enroulement une étude de diagnostique a été réalisé afin de proposer le modèle comme un outil de simulation des déformations mécanique réel du transformateur. 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 ainsi que les différentes méthodes de diagnostic.

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 technique d'analyse de la morphologie du signal FRA des enroulements de transformateur afin de construire le modèle mutuellement couplé physiquement réalisable.

Chapitre I

Généralités sur les transformateurs électriques

I.1-Introduction :

Le transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques, il a été en service pendant des nombreuses années sous différents environnement, conditions électriques et mécaniques. L'apparition d'un défaut dans le système provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des champs parasites dans celui-ci. Ces champs parasites produisent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur. La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à de fortes sollicitations mécaniques. Un transformateur peut aussi être soumis à des contraintes pendant son transport et son installation ainsi que par suite des variations cycliques de la température ambiante. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux magnétiques [1]. Dans ce qui suit, une étude théorique détaillée de transformateur ainsi que ces défauts et les moyens de protection seront présentées.

I.2-Définition :

Sa définition selon la commission électrotechnique internationale est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique » [2].

Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique à distance, en transformant les valeurs de la tension et de l'intensité à des valeurs qui rendent abordable techniquement et économiquement le transport depuis les centres de production aux centres d'utilisation [3].

I.3-Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un transformateur est basé sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Quand une tension U1 variable, est appliquée entre les bornes de l'enroulement primaire, elle y engendre un courant i1variable.

La force magnétomotrice variable N1 i1 va magnétiser le circuit magnétique en y produisant un champ magnétique et un flux variable.

Les deux enroulements, primaire et secondaire, qui se trouvent placés sur ce circuit magnétique et qui sont traversés par ce flux variable, sont donc le siège de forces électromotrices induites.

Comme le flux magnétique est alternatif, la f.e.m induite au secondaire est aussi alternative et sa fréquence est égale à la fréquence du courant circulant dans l'enroulement primaire [4].

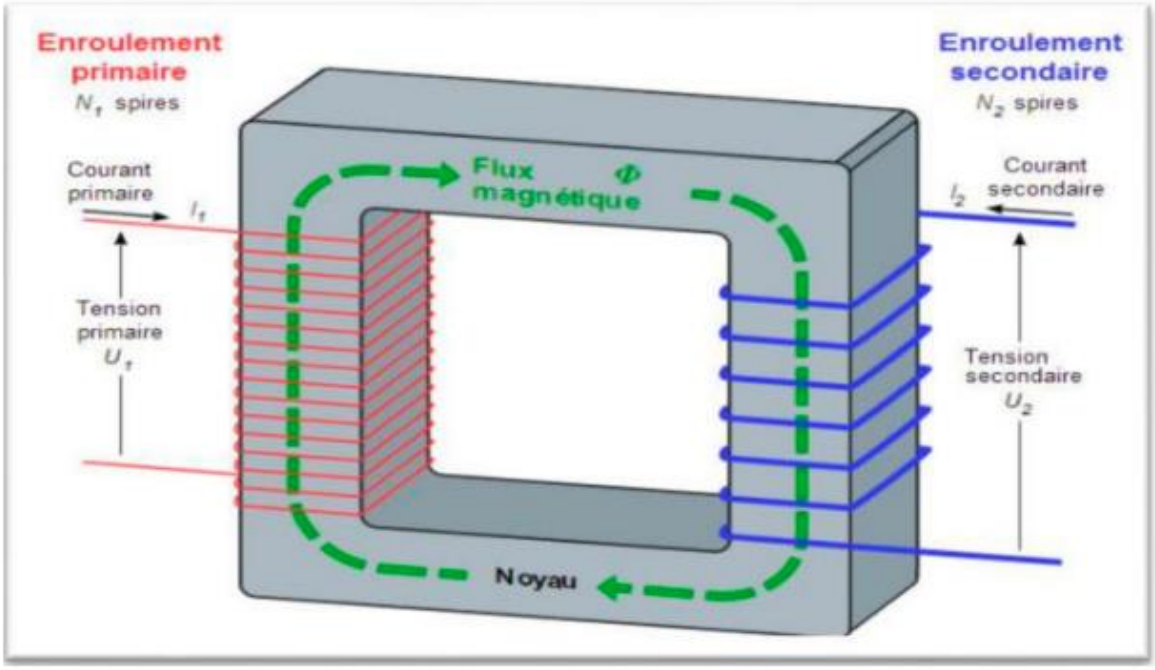


Figure (I.1) : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.

I.4-Construction interne d'un transformateur de puissance :

I.4.1-Partie active :

La partie active est définie comme le circuit magnétique et les enroulements.

I.4.1.1-Circuit magnétique :

Le noyau se compose d'un empilage de tôles ferromagnétique de haute perméabilité et à grains orientés, isolées électriquement entre elles. Il doit être conçu de façon à réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique.

Le rôle du noyau est de guider le flux magnétique entre le primaire et le secondaire.

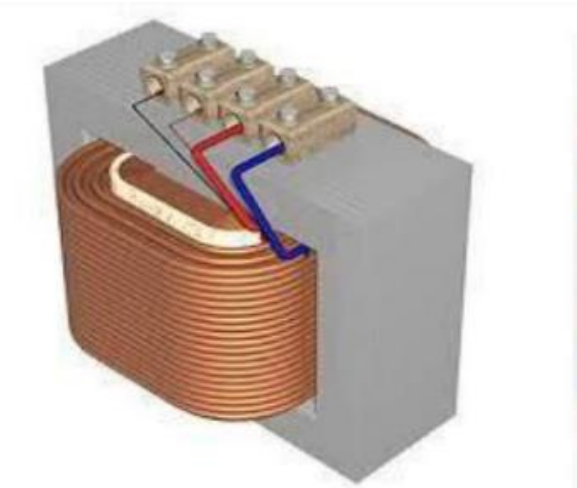
La densité du flux doit être aussi haute que possible sans que le noyau entre en saturation. Cela permet de réduire la taille du transformateur et ainsi son prix. Le champ magnétique a typiquement une valeur comprise entre 1,6 et 1,8 tesla [5]

Deux grandes familles de circuits magnétiques existent : en colonnes et cuirassé. La première est la plus répandue : les enroulements y sont placés autour du circuit magnétique. Les parties métalliques verticales sont appelées colonnes, celles horizontales culasse. Pour les transformateurs triphasés la construction plus courante est celle à 3 colonnes. Les culasses et les colonnes ont alors même section. Le flux doit trouver un chemin de retour hors des enroulements de culasse à culasse, il y a donc formation d'un flux de fuite externe important. Une solution consiste à placer aux côtés des 3 colonnes bobinées 2 colonnes non bobinée servant de chemin de retour pour le flux. Dans ce cas, la section des culasses est la moitié de celle des colonnes, le flux se divisant en deux parties égales en sortant des colonnes. Cela permet de réduire la hauteur totale du circuit magnétique, pour cette raison cette solution est très répandue pour les gros transformateurs.

Les circuits cuirassés entourent au contraire les enroulements. Ceux à colonnes ont l'avantage d'être plus simple à construire et à refroidir ainsi qu'à réparer, les seconds permettent de réaliser des transformateurs avec une faible impédance de court-circuit. En outre, à cause de la meilleure protection magnétique produit par le montage cuirassé, celui-ci est utilisé dans le cas où la tension est faible et le courant très élevé, typiquement dans les fours à arc électrique. Ceux à colonnes sont toutefois largement majoritaires dans le monde [6].



Figure (I.3) : Circuit magnétique triphasé type colonne triphasé



Figure(I.2) : Circuit magnétique type cuirassé.

I.4.1.2-Les enroulements :

Un enroulement de transformateur est l'ensemble des spires formant un circuit associé à l'une des tensions pour lesquelles le transformateur a été établi ». En d'autre terme il

s'agit d'une bobine électrique placée autour du noyau magnétique d'un transformateur. Traditionnellement on appelle l'enroulement qui reçoit la puissance active de la source d'alimentation en service « enroulement primaire » et celui qui délivre la puissance active à une charge, « enroulement secondaire ». Un autre enroulement du transformateur, ayant habituellement une puissance assignée inférieure à celle de l'enroulement secondaire, est alors souvent appelé « enroulement tertiaire ». Pour plus de clarté, il convient d'employer les termes enroulements haute tension (HT), moyenne tension (MT) et basse tension (BT) qui ne prêtent pas à confusion étant classés en fonction de leur niveau de tension [7].

Le rapport du nombre de spires entre primaire, secondaire et tertiaire détermine le rapport de conversion des tensions et des courants. Les enroulements sont quasiment toujours réalisés en cuivre, bien qu'on trouve également de l'aluminium pour des raisons de coût dans les transformateurs de faible puissance.



Figure (I.4) : Enroulement.

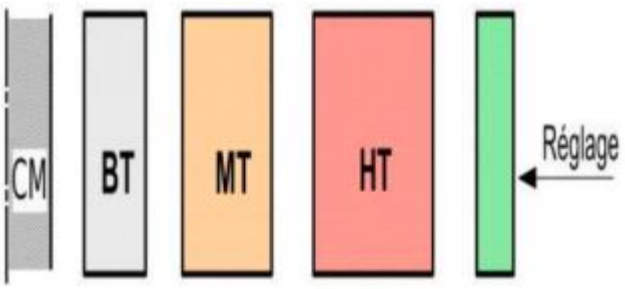


Figure (I.5) : Coupe de demi-enroulement.

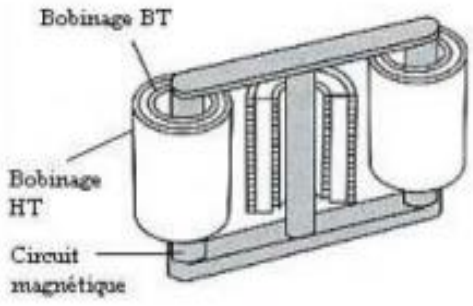
CM : circuit magnétique

BT : basse tension.

MT : moyenne tension.

HT : haute tension

- **On distingue deux types de bobinages** :



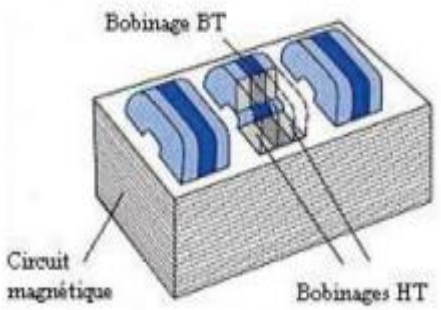


Figure (I.6) : Enroulement en couche.

Figure (I.7) : Enroulement en galettes.

I.4.2-Isolation :

L'isolation diélectrique, qu'elle soit solide ou liquide, doit permettre au transformateur de résister à la fois à la tension alternative en régime permanent et aux surtensions transitoires sans décharge électrique. Pour ce faire, elle doit homogénéiser le champ électrique dans le transformateur. L'isolation solide est constituée principalement de cellulose, celle liquide est normalement constituée d'huile [8].

I.4.2.1-Huile :

Les transformateurs de puissance sont traditionnellement remplis d'huile minérale spécifique. Elle permet l'isolation diélectrique des enroulements entre eux ainsi que le refroidissement du transformateur. Elle a en effet une rigidité diélectrique nettement supérieure à l'air. L'huile est un bon conducteur thermique, et sa circulation au travers de radiateurs permet d'évacuer la chaleur produite par les bobines et le circuit magnétique du transformateur. Elle doit posséder un haut niveau d'isolation diélectrique et un haut point d'inflammation pour permettre une exploitation en toute sécurité [9].

Pour éviter de graves conséquences écologiques en cas de fuite d'huile, un bac de rétention est installé sous les transformateurs.

I.4.2.1.1-Choix de l'huile :

L'huile minérale est obtenue à partir du raffinage du pétrole brut. Selon l'origine du pétrole et du processus de raffinage, on peut identifier différents types d'huiles.[9]

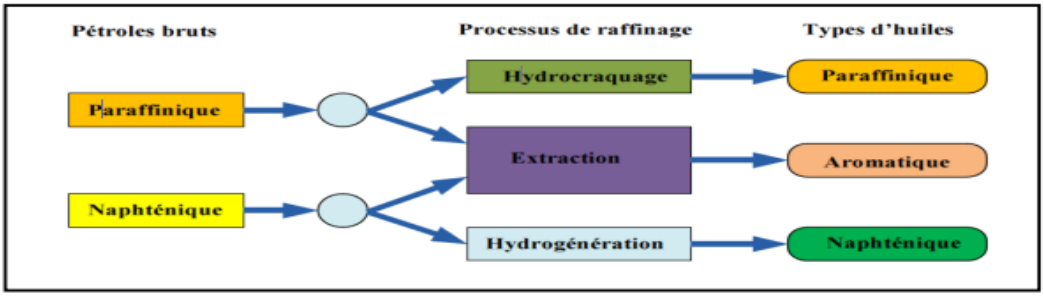


Figure (I.8) : Processus de raffinage pour les huiles brutes.

I.4.2.2-Isolation papier :

L'isolation papier est réalisée à l'aide de couches de papier superposées, imprégnées d'huile puis séchées. Les pores du papier atteignent alors une grande rigidité diélectrique, des pertes diélectriques faibles et une constante diélectrique proche de celle de l'huile. Il est à noter que le papier associé à l'huile a de bien meilleures propriétés diélectriques que le papier ou l'huile séparément. La présence d'humidité dans l'isolation est très néfaste pour ses propriétés. Cette isolation est ensuite disposée dans le transformateur entre les enroulements et la cuve en suivant la technique des barrières, c'est-à-dire que de fines couches d'isolation sont alternées avec de l'huile. L'isolation papier à la propriété de pouvoir absorber une grande quantité d'humidité. Cela détériore ses propriétés diélectriques et augmente considérablement son volume. L'isolation doit donc être séchée avant d'être placée dans la cuve [10].

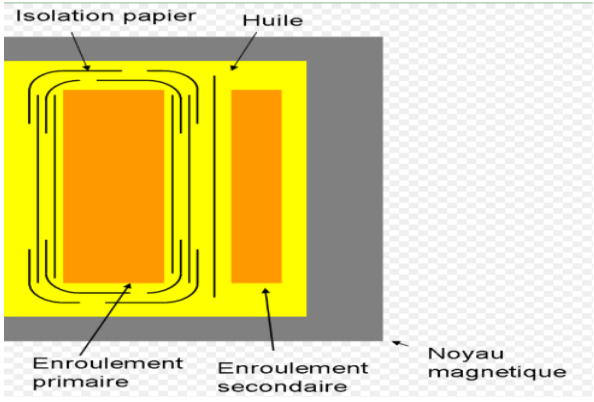


Figure (I.9) : Exemple d'un système d'isolation typique avec des barrières en papier séparées par de l'huile

I.4.2.3-La Cuve :

Les cuves des transformateurs sont faites de tôles d'acier. Elles doivent pouvoir résister aux forces exercées lors du transport du transformateur. Leur couvercle est amovible et scellé grâce à des boulons ou une soudure.la cuve est testée sous vide pour contrôler ce point. Par ailleurs, pour résister aux conditions extérieures les cuves sont peintes à l'aide d'un revêtement résistant à la corrosion [11].

Par ailleurs pour les transformateurs de forte puissance, le flux de fuite devient assez important, pour éviter un échauffement trop important des enroulements ou de la cuve, liés au courant de Foucault s'induisant en leurs seins, des écrans sont placés à l'intérieur des parois de la cuve. Ceux-ci conduisent le flux et évitent ainsi son passage dans les autres parties et ainsi leur échauffement par courant de Foucault. Comme pour les circuits magnétiques, afin d'éviter la circulation du courant, il est important qu'ils ne soient mis à la terre qu'en un point.



Figure (I.10) : La cuve d’un transformateur de puissance.

I.4.2.4-Isolation thermoplastique :

ABB a développé un nouvel isolant thermoplastique pour les entretoises radiales des transformateurs à huile. Le recours au moulage par injection, amélioré par des empreintes ajustables, a permis de baisser les coûts et délais de production. Les essais ont prouvé les excellentes propriétés de ce matériau, qui s’impose comme un substitut viable au carton comprimé. [12]



Figure (I.11) : Isolation thermoplastique.

I.4.2.5-Traversées :

Les traversées isolantes ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire et secondaire, d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ, d'autre part, à travers le couvercle ; d'où le nom de traversées. Leurs fonctions sont principalement l'isolement du champ électrique et une fixation étanche et robuste sur le couvercle. Il existe plusieurs types de traversée. Pour les tensions jusqu'à quelques dizaines de kV le corps des traversées est généralement constitué d'un bloc unique de porcelaine, qui est un matériau isolant [13].



Figure (I.13) : Traversé porcelaine



Figure (I.12) : Traverse condensateur

I.5-Types des transformateurs :

Il existe différents types de transformateurs, mais nous nous intéresserons à l'étude des transformateurs de puissances de réseaux électriques car ils présentent le plus grand intérêt dans le développement de l'interconnexion des réseaux.

I.5.1-Transformateurs de transmission :

Les transformateurs de transmission sont utilisés dans le réseau de transport électrique pour l'interface entre les différents niveaux de haute tension [14].



Figure (I.14) : Transformateurs de transmission

I.5.2-Transformateurs de distribution :

Les transformateurs de distribution sont les transformateurs de plus faible puissance, moins de 2 500 kVA en triphasé. Ils servent, comme leur nom l'indique, à alimenter le réseau 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. Leur noyau magnétique utilise des technologies semblables à celles des transformateurs de plus grande puissance avec chevauchement, acier orienté et absence totale de boulon [15].



Figure (I.15) : Transformateur de distribution.

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

I.5.3-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 [16].



Figure (I.16) : Transformateur de type sec.

I.5.4-Transformateurs immergés dans l'huile :

Le transformateur immergé dans l'huile est constitué d'un circuit magnétique en tôles à cristaux orientés, d'enroulements en cuivre ou en aluminium, d'une cuve métallique, d'un couvercle et des bornes de raccordement MT et BT [17].



Figure (I.17) : Transformateur immerge dans l'huile

I.5.5-Autotransformateurs :

Dans ce type de transformateur de puissance particulier, il n'y a pas d'isolation électrique entre le primaire et le secondaire car le secondaire est une partie de l'enroulement primaire. Cela économise un enroulement. Le courant alimentant le transformateur parcourt le primaire en totalité et une dérivation à un point donné de celui-ci détermine la sortie du secondaire. La conséquence est qu'une partie du bobinage est traversée par le seul courant du primaire alors que l'autre partie est traversée par le courant du primaire moins celui du secondaire. La section du bobinage peut donc être réduite sur ce secondaire [5].

Les autotransformateurs sont surtout utilisés pour interconnecter des réseaux de très haute tension. Les autotransformateurs sont quasiment toujours couplés en étoile et reçoivent une isolation non-uniforme.

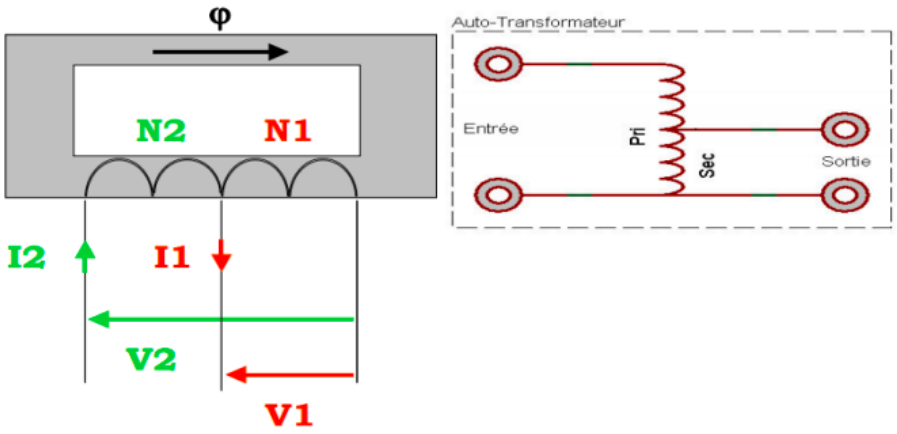


Figure (I.18) : Schéma équivalent d'un autotransformateur.PG1

I.6-Le système de refroidissement :

Les pertes des enroulements, principalement par effet Joule, mais également par courant de Foucault, oblige à les refroidir. L'évacuation de la chaleur par conduction, convection et radiation. Idéalement l'huile doit être en mouvement par rapport à tous les conducteurs afin que la chaleur soit transmise par convection depuis ces derniers vers les premiers. [13] Le système de refroidissement d'un transformateur a pour but de maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables. Le choix du mode de refroidissement se fait en particulier 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.7-Composants associés au transformateur de puissance :

En plus de son noyau magnétique, de ses enroulements et de son isolation, un transformateur dispose de nombreux composants secondaires. Certains sont indispensables comme un dispositif permettant la dilatation de l'huile, d'autres ne le sont pas comme le changeur de prises.

Ceux présentés ici correspondent à un transformateur de puissance « classique ». On peut y ajouter l'huile, l'isolation papier et le système de refroidissement qui ne sont pas représentés. [18]

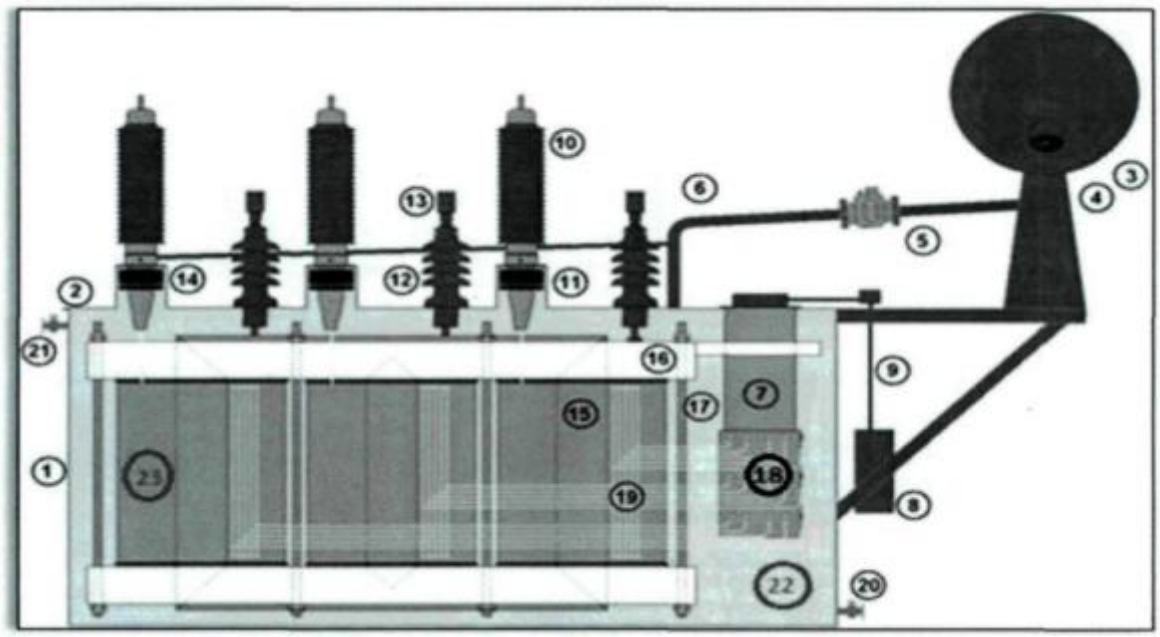


Figure (I.19) : Principaux organes d'un transformateur de puissance

1	Cuve	13	Contact du secondaire
2	Couvercle	14	Transformateur de courant
3	Conservateur	15	Enroulements
4	Indicateur de niveau d'huile	16	Noyau magnétique
5	Relais Buchholz	17	Élément mécanique maintenant le noyau magnétique et les enroulements ensemble exerçant une force de compression
6	Tuyau d'huile	18	Bornes de connexion du changeur de prises
7	Changeur de prises	19	Connexion du changeur de prises aux enroulements
8	Moteur électrique du changeur de prises	20	Robinet pour prélèvement d'huile
9	Transmission mécanique du changeur de prises	21	Robinet d'air
10	Connexion du primaire	22	**fluide diélectrique (huile)**
11	Bornes de traversée	23	**isolant solide (papier)**
12	Connexion du secondaire		

Tableau I.1 : Principaux organes d'un transformateur de puissance

I.8-Couplage du transformateur [14] :

Les transformateurs triphasés disposent au minimum de trois enroulements au primaire et trois au secondaire, il est nécessaire de les coupler entre eux pour connecter ou obtenir des réseaux triphasés. Pour un transformateur triphasé, les enroulements peuvent être connectés de trois manières différentes :

- En étoile, représenté par la lettre Y.
- En triangle, représenté par la lettre D ou Δ.
- En zig-zag, représenté par la lettre Z.
- Le couplage en étoile au primaire et au secondaire (Yy) est utilisé surtout pour les transformateurs de très haute tension.
- Le couplage en étoile au primaire et en triangle au secondaire (Yd) est utilisé pour connecter les générateurs de centrales électriques et de machines industrielles.
- Dans les réseaux de distribution électrique un couplage étoile au primaire et zigzag au secondaire (Yz) est courant.

I.9. Défauts externes et internes dans le transformateur :

Il est essentiel de protéger les transformateurs à haute capacité contre défauts électriques externes et internes [19].

I.9.1. Défauts externes dans le transformateur de puissance

I.9.1.1. Court-circuit externe du transformateur de puissance

Le court-circuit peut se produire dans deux ou trois phases du système d'alimentation électrique. Le niveau de courant de défaut est toujours suffisamment élevé. Cela dépend de la tension qui a été court-circuitée et de l'impédance du circuit jusqu'au point de défaut. La perte de cuivre du transformateur d'alimentation en panne est augmentée de manière abrupte. Cette perte de cuivre croissante provoque un échauffement interne dans le transformateur. Un courant de défaut important génère également de fortes contraintes mécaniques dans le transformateur. Les contraintes mécaniques maximales apparaissent lors du premier cycle de courant de défaut symétrique [19].

I.9.1.2. Haute perturbation de tension dans le transformateur de puissance

Perturbation haute tension dans le transformateur de puissance sont de deux sortes [19]:

I.9.1.2.1. Surtension transitoire

Une surtension et une surtension à haute fréquence peuvent survenir dans le système électrique pour l'une des causes suivantes:

Mise à la terre si le point neutre est isolé.

- Opération de commutation de différents équipements électriques.
- Impulsion de lumière atmosphérique.

Quelles que soient les causes de la surtension, il est après tout une onde progressive ayant une forme d'onde élevée et raide, ainsi qu'une haute fréquence. Cette onde se propage dans le réseau électrique lorsque, une fois dans le transformateur de puissance, elle provoque une rupture de l'isolation entre les spires adjacentes à la borne de ligne, ce qui peut créer un court-circuit entre les spires [19].

I.9.1.2.2. Fréquence de surtension :

Il peut toujours y avoir une chance de système surtension due à la déconnexion soudaine d'une charge importante. Bien que l'amplitude de cette tension soit supérieure à son niveau normal mais que sa fréquence soit la même qu'elle était dans des conditions normales. Une surtension dans le système provoque une augmentation de la contrainte sur l'isolation du transformateur. Comme nous le savons, la tension s'exprime par la relation suivante :

$$\boldsymbol{V = 4,44\Phi.\mathcal{F}.T \Rightarrow \nu\delta\,\Phi}$$

Une tension accrue entraîne une augmentation proportionnelle du flux de travail. Cela provoque donc une augmentation de la perte de fer et d'une augmentation proportionnellement importante du courant magnétisant. Le flux d'augmentation est dévié du noyau du transformateur vers d'autres pièces structurelles en acier du transformateur. Les boulons à noyau qui transportent normalement peu de flux peuvent être soumis à une grande partie du flux dévié de la région saturée du noyau le long. Dans de telles conditions, le boulon peut être rapidement chauffé et détruire son propre isolant ainsi que celui des enroulements.

I.9.2. Défauts internes dans le transformateur de puissance

Les principaux défauts qui se produisent à l'intérieur d'un transformateur de puissance sont classés comme suit [20]:

I.9.2.1. Défauts à la terre

Un défaut sur un enroulement de transformateur entraînera des courants qui dépendent de la source, de l'impédance de mise à la terre du neutre, de la réactance de fuite du transformateur et de la position du défaut dans les enroulements. Les connexions des enroulements influencent également l'amplitude du courant de défaut. Si le neutre est solidement mis à la terre, le courant de défaut est contrôlé par la réactance de fuite, qui dépend de l'emplacement du défaut [20].



Figure (I.20) : Défaut à la terre d‘un enroulement [11].

I.9.2.2. Défauts de base :

Les défauts du noyau dus à une rupture d‘isolation peuvent permettre à un courant de Foucault suffisant à circuler pour provoquer une surchauffe, qui peut atteindre une ampleur suffisante pour endommager l‘enroulement [20].

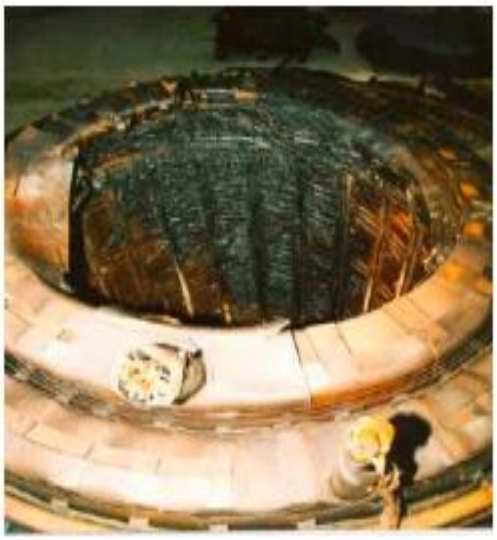


Figure (I.21) : Dommages à l'intérieur de la pile d'enroulements de bobine du transformateur rempli d'huile [11].

I.9.2.3. Défauts entre tours

Les défauts entre produisent en raison de contournements d'enroulement causés par des surtensions de ligne. Un court-circuit de quelques spires de l'enroulement donnera lieu à des courants élevés dans les boucles court-circuitées, mais les courants aux bornes seront faibles. Cela arrive souvent suite à déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements, ce défaut peut aller jusqu‘à la fusion du cuivre des conducteurs, et l‘ouverture du circuit électrique dans certains cas.

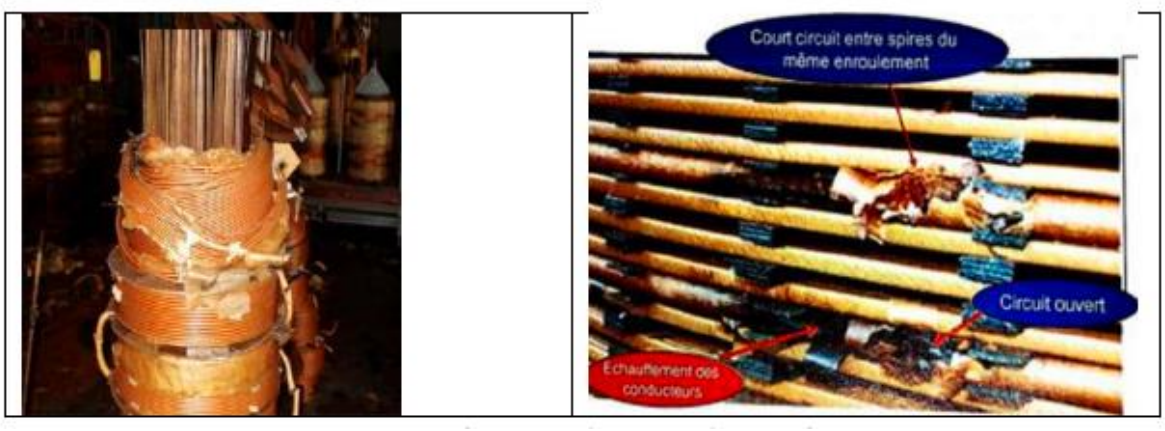


Figure (I.22) : Défaut entre les tours du transformateur [21]

I.9.2.4. Défauts phase à phase

Les défauts phase à phase sont rares mais entraîneront des courants importants de magnitudes similaires aux défauts de terre.

I.9.2.5. Décharges Partielles

Les décharges partielles, sont un phénomène local de micro décharges dues à une faiblesse de l‘isolant. Un exemple entre des cales de bobinages est visible (Figure I.23). Les décharges en elles-mêmes sont rarement destructives, mais leur évolution peut l‘être. Car à terme le carbone, conducteur, qu‘elles génèrent peut se propager et diminuer la tenue diélectrique entre certains éléments sous tension et ainsi aller jusqu‘à provoquer un amorçage. Des mesures de décharges partielles sont possibles mais nécessitent des moyens de mesures haute tension lourds. Ils sont donc généralement réalisés au cas par cas en dehors des usines de transformateurs [22]

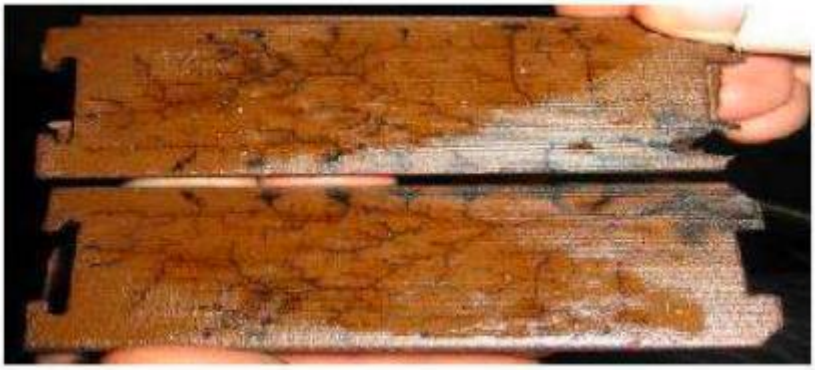


Figure (I.23) : Tests complémentaires recommandés

I.9.2.6. Mouvement Axial et déformations radiales d'un enroulement :

Déplacement axial et déformation radiale d'un enroulement par rapport à une autre suite un défaut

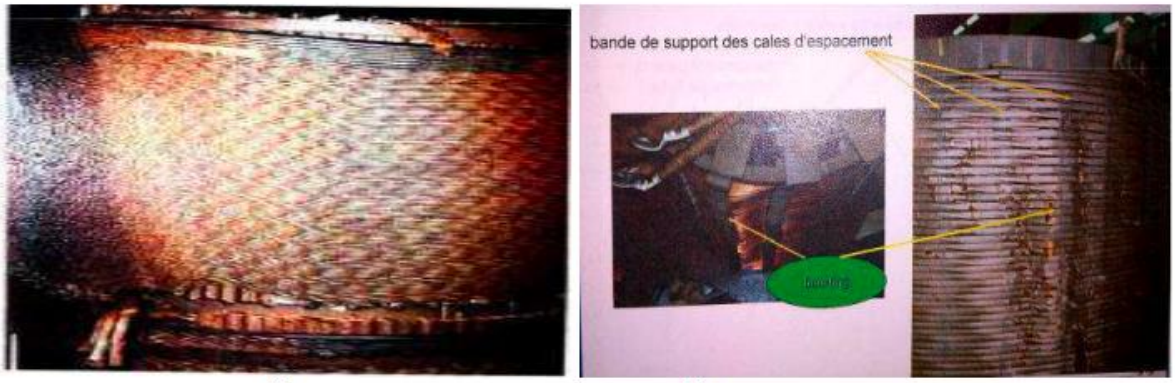


Figure (I.24) : Déplacement axial (a) et déformation radiale (b) d'un enroulement.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur le transformateur de puissance,

Nous avons aussi donné un aperçu sur les principaux éléments qui constituent, leur rôle et leur importance dans cette machine statique. A la fin de ce chapitre, les différents défauts et mode de protection du transformateur ont été introduit pour mieux cerner son fonctionnement.

Le prochain chapitre sera consacré à l'analyse de la technique FRA et la modélisation des enroulements du transformateur en régime fréquentiel.

CHAPITRE II

Interprétation de la technique FRA en utilisant le modèle mutuellement couplé équivalent aux enroulements du transformateur de puissance

II.1. Introduction :

L'apparition d'un défaut dans le réseau électrique provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des champs parasites dans celui-ci. Ces champs produisent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur. La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à de fortes sollicitations mécaniques. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux magnétiques [22]. Le diagnostic efficace de ce type de déformation peut être mis en évidence grâce à l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) des enroulements du transformateur.

Le présent chapitre a pour objet de présenter le modèle mutuellement couplé équivalent aux enroulements et leur importance dans l'interprétation et l'analyse des réponses fréquentielles FRA pour diagnostiquer les défaillances de l'enroulement.

II.2. Définition :

La technique d'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est une méthode qui permet de détecter les défauts mécaniques dans le transformateur. La réponse FRA d'un transformateur est déterminée par sa géométrie et les propriétés de son matériau. Cette réponse peut être considérée comme l'empreinte du transformateur. Tout changement mécanique et /ou électrique dans le transformateur engendre la modification de la réponse fréquentielle de ses enroulements [23].

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

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est largement utilisée pour détecter les déformations des enroulements et du noyau dans l'alimentation des transformateurs. Cependant, l'interprétation de la FRA est toujours un domaine difficile qui nécessite des efforts de recherche, afin d'établir une interprétation standard et largement acceptée. Par ailleurs, pour étudier l'impact de diverses déformations d'enroulement sur le transformateur, l'interprétation de la signature FRA en une haute fréquence et le modèle équivalent de l'enroulement de transformateur est requise.

II.4. Objectifs de la FRA :

L'objectif principal de la technique FRA est de détecter les défaillances d'un transformateur (noyaux magnétiques et enroulements). Cette technique permet de détecter de toute forme de défaillances tels que :

- Les déformations ou déplacements des enroulements.
- Les spires court-circuitées ou les enroulements ouverts.
- Les défauts de la structure de fixation.
- Les défauts dans les connexions du noyau magnétique.
- Les affaissements partiels d'enroulement.
- Les circuits de terre du noyau magnétique défectueux.
- Les déplacements du noyau magnétique.
- Le claquage des enroulements.

II.5. Théorie fondamental de la FRA

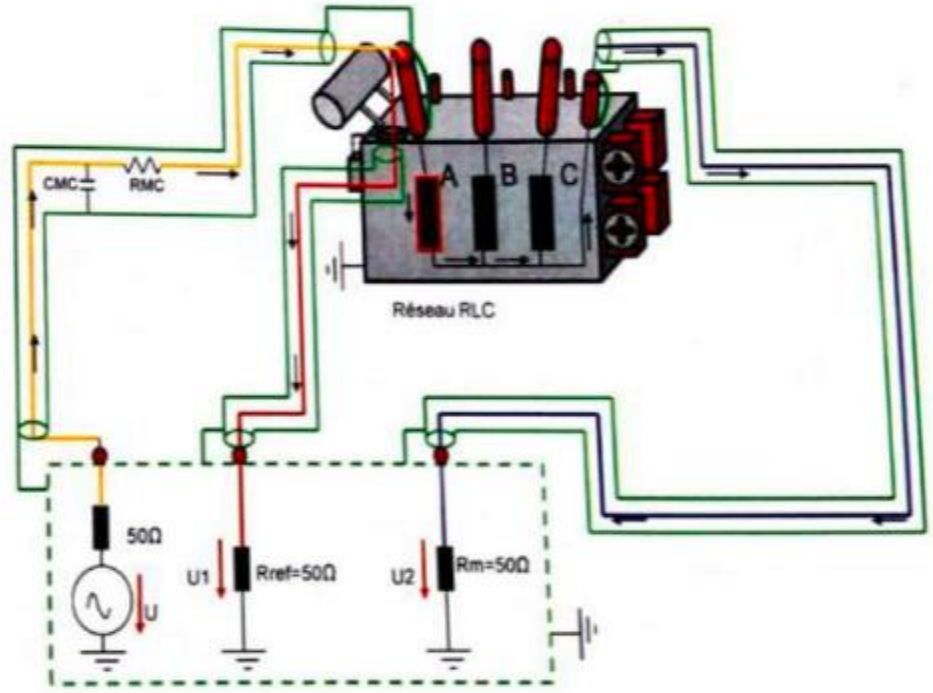


Figure.II.1. Théorie Et Fondamental De FRA [23]

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.1.

II.6. 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 traditionnel

II.7. Types de connexions FRA

Pour effectuer une mesure FRA, une tension (fréquence variable) est fournie à une borne du transformateur. La tension mesurée à la borne d'entrée est utilisée comme référence pour le calcul FRA. Un deuxième paramètre (signal de retour) mesuré est généralement une tension prise à travers une deuxième borne du transformateur (qui peut également être un courant mesuré à la borne d'entrée ou à une autre borne de masse). L'amplitude de la réponse FRA sera alors le rapport en décibels entre le signal de réponse et la tension source.

Les configurations de connexion suivantes pour de mesure FRA sont :

II.7.1 Circuit overt (End-to-End Open Circuit)

Dans le test en circuit ouvert, le signal de référence est injecté dans l'une des bornes des enroulements et la réponse est mesurée à l'autre borne de l'enroulement alors que toutes les autres bornes sont flottantes figure II.2a. Les résultats de cette connexion de mesure sont principalement influencés par les caractéristiques du noyau du transformateur, en particulier dans les basses fréquences. Par conséquent, il est utilisable pour l'évaluation de base [24-25].

II.7.2 Court-circuit (End-to-End Short Circuit)

Ce test est effectué comme en circuit ouvert, mais le second enroulement de la même phase est court-circuité figure II.2b, et il est également possible de court-circuiter tous les enroulements adjacents dans les transformateurs triphasés qui aident à avoir une meilleure symétrie. L'effet principal du noyau du transformateur est supprimé dans ce type de connexion. Par conséquent, le test de court-circuit est pratique pour évaluer exclusivement les enroulements [24-25].

II.8. Principaux techniques de modélisation des transformateurs en vue de FRA

En 1915, la première représentation du transformateur est apparue, réalisée par Weed [26]. Par la suite, différents modèles avec différentes approches et applications ont été développés et présentés [27-28]. L'obtention d'un modèle de transformateur dans une large bande de fréquence est une tâche qui peut conduire à des inefficacités dans la simulation ou à des problèmes dans le calcul des paramètres dus aux complexités des données nécessaires.

Pour la modélisation des transformateurs, il existe deux principaux types de modèles ~~[29]~~, le premier consiste en un modèle de boîte noire, où les paramètres sont basés sur des mesures FRA effectuées en externe au transformateur. Le deuxième modèle consiste en un modèle physique, dans lequel les composants du transformateur sont modélisés en détail et pour cela un réseau de paramètres équivalent de résistances, d'inductances et de capacités est utilisé ~~[30]~~ figure II.2 .

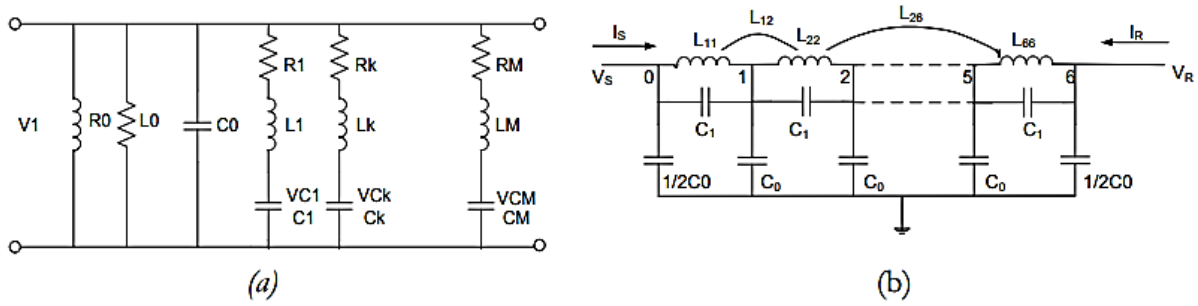


Figure II.2 : *Modèle de transformateur Vaessen (a) et Wilcox (b) Modèle mutuellement couplé*

II.9. Classification des modèles orientés FRA

Les travaux de recherche nécessitent une étude des modèles dont le but est l'interprétation des courbes FRA. Les différents modèles de diagnostic basés sur la technique FRA peuvent être différenciés en deux types, sur la base des deux méthodologies de modélisation prioritaires, décrites dans la figure II.3. La première méthodologie établit un modèle d'identification avec une grande capacité à ajuster la réponse réelle. Dans ce cas, le modèle doit être complété avec la capacité d'interprétation physique à travers les paramètres constitutifs du modèle développé.

La seconde méthodologie établit dans un premier temps un modèle basé sur les principes physiques du champ électromagnétique et donc doté d'une interprétation physique. Par conséquent, il est nécessaire, dans un deuxième temps, de concevoir une procédure de calcul garantissant des valeurs des paramètres permettant de simuler la réponse réelle avec une erreur minimale [31-32]

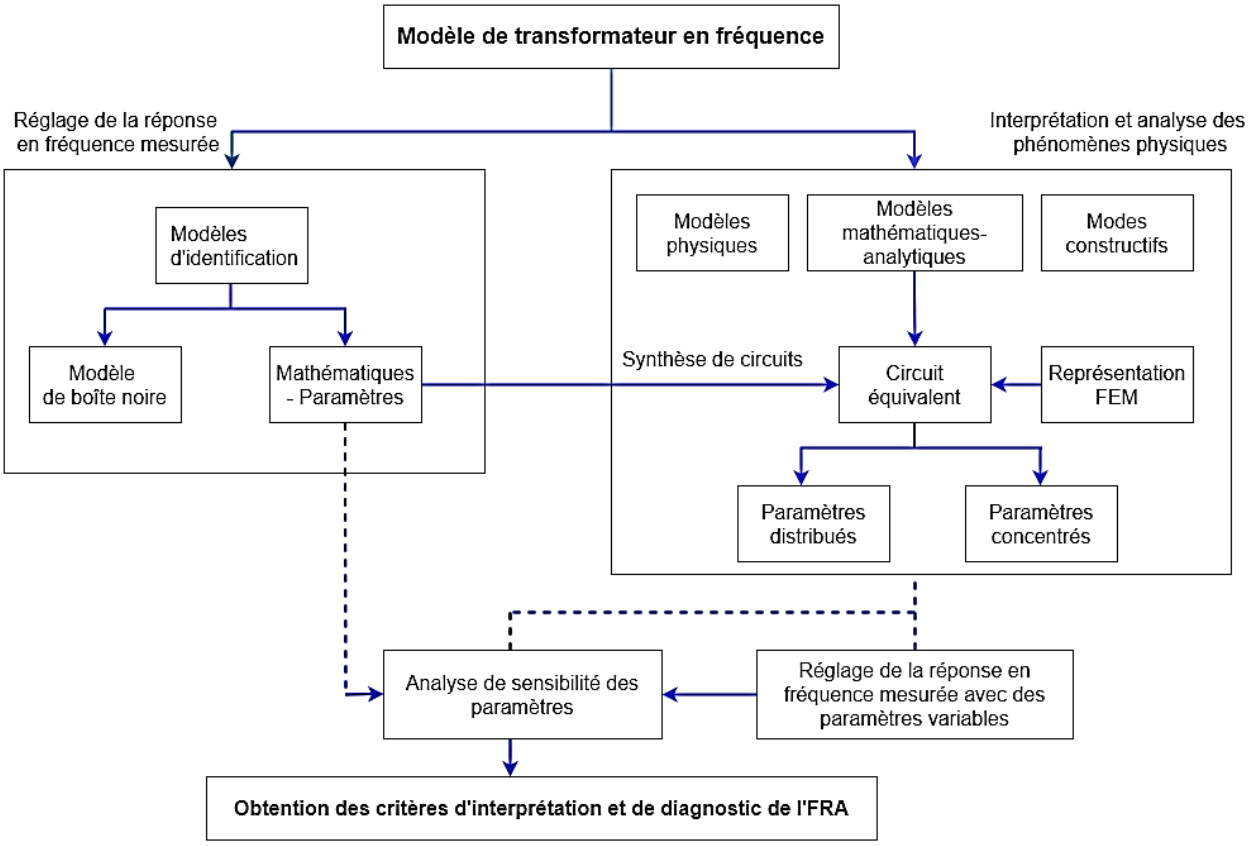


Figure II. 3 : *Alternatives pour la création d'un modèle à des fins de diagnostic par FRA [32]*

II.10. Modélisation des enroulements du transformateur par la méthode des inductances propres et mutuelles

Les caractéristiques physiques de l'enroulement du transformateur peuvent être convertis en des paramètres électriques par la construction d'un circuit équivalent. Ces dernières années, le modèle mutuellement couplé a été largement considéré comme un circuit reflète le comportement physique réel de l'enroulement du transformateur.

Grande fréquence [33-34].

Le modèle de couplage mutuel est essentiellement composé d'une série de cellules, chaque cellule se compose de trois paramètres électriques, résistances (R), une inductance propre (Ls), et des capacités en série (C_S) et shunt (Cg), les cellules sont couplées par des inductances mutuelles (Mij).

Pour le domaine des basses fréquences, l'enroulement du transformateur se comporte comme une simple inductance où les couplages capacitifs sont négligeables, donc le modèle RL est suffisant pour représenter l'enroulement. Mais au fur et à mesure qu'on monte en fréquences les effets capacitifs ne seront plus négligeables et cela se traduit par une limitation du domaine fréquentiel du modèle RL. Pour augmenter son domaine de validité il est nécessaire de prendre en compte les effets capacitifs qui se manifestent à des fréquences élevées.

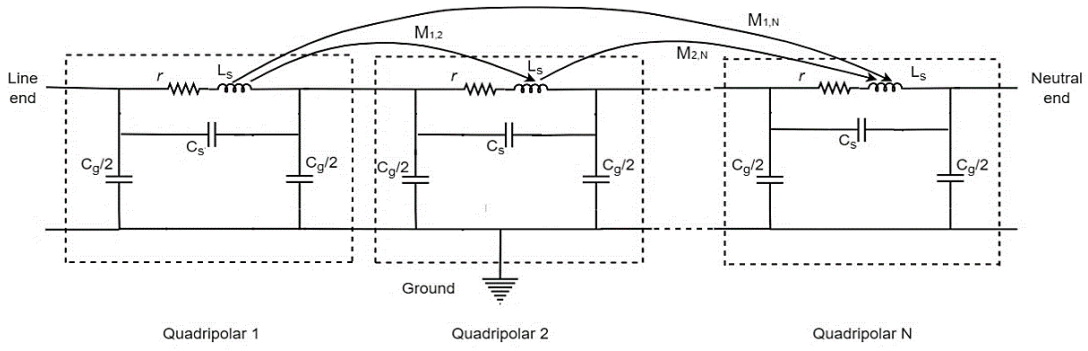


Figure II.4: *circuit équivalent mutuellement coupler*

II.11. Les principaux paramètres du modèle mutuellement couplé

a) La résistance en courant continu Rdc :

Pour la résistance en courant continu, R_{dc} peut être mesuré directement en mode DC en utilisant un multimètre ou le LCR mètre, afin que la résistance par section ($r = {R_{dc}}/{N}$).Les

résistances d'isolement (les résistances en parallèle avec les capacités série et shunt $R_s et\ R_g$. respectivement) dépendent de la fréquence, de la capacité et du facteur de dissipation [35].

Ces résistances diminuent à mesure que la fréquence augmente.

b) L'inductance équivalente Leq :

Pour obtenir le modèle à haute fréquence à couplage mutuel, la valeur de l'inductance équivalente de l'enroulement correspondant à la haute fréquence est obligatoire. Cependant, une approche a été proposé par K.R. Shah [36] qui consiste à l'excitation à haute fréquence de l'enroulement sous test et à déterminer la valeur de la réactance en utilisant l'amplitude et la phase de DPI. Toutefois, avec une excitation à haute fréquence, les capacités sont réfléchies et la réactance est due à la fois à l'inductance et à la capacité. Par conséquent, il n'est pas directement possible d'obtenir la valeur de l'inductance à haute fréquence. Le comportement fréquentiel des inductances d'enroulement dans les gammes de fréquences basse et moyenne, diminue avec la fréquence et devient constant au-delà de certaines fréquences (de l'ordre de certains kHz ou certaines dizaines de kHz) selon la bobine testée. Ces caractéristiques peuvent être obtenues en utilisant le LCR mètre à partir de la relation suivante :

$$L = \frac{|z|\sin\theta}{2\pi f}$$

Ensuite, la plage de fréquence est identifiée dans laquelle l'inductance reste presque constante. L'importe laquelle de ces fréquences peut être considérée comme la fréquence d'estimation de l'inductance équivalente de l'enroulement et l'inductance correspondante peut être appelée L_{eq}. Essentiellement, la fréquence de détermination de L_{eq} devrait être bien au-dessous du premier O_{cnf} . Si c'est le cas, la présence d'effets capacitifs peut être négligée, par conséquent, il est possible d'avoir une meilleure estimation de l'inductance d'enroulement à noyau d'air [36]. Autrement, l'inductance équivalente de l'enroulement peut être déterminée directement à l'aide du LCR mètre en variant la fréquence au-dessous du premier O_{cnf} jusqu'à ce que l'inductance devienne constante.

c) La capacité shunt effective C_{geff} :

Dans le cadre de la détermination de la valeur de C_{geff} , l'extrémité neutre de l'enroulement sous inspection doit être isolée du sol, puis raccordée à la fin du câble (l'enroulement est court-circuité). Ensuite, l'excitation sinusoïdale de certaines basses fréquences (par rapport à

$O_{cnf}\ et\ S_{cnf}$) doit être appliquée à l'une de bornes de l'enroulement par rapport à la masse. Avec le court-circuit à la ligne et les extrémités neutres flottantes et avec l'excitation à basse fréquence, l'influence des inductances et des capacités en série peut être ignorée. Avec cela, le circuit de la figure II.4 peut être considéré est équivalent à une combinaison parallèle de résistances (toutes R_g) et de capacités shunt par rapport à la source d'excitation, qui est représenté par la figure II.5 ci-dessous [36], [37].

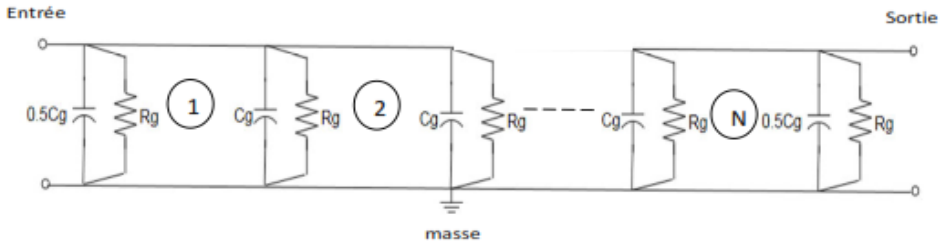


Figure II.5 : *Circuit équivalent pour mesurer* $C_{g.eff}$

II.12. Équations du modèle mutuellement couplé

L'application des lois de Kirchhoff au circuit représenté sur la figure II.3 nous permet d'élaborer les équations aux tensions et aux courants de l'enroulement, dans ce qui suit on donnera un exemple d'un enroulement discrétisé en 6 cellules RLC en cascade [38].

Equations des tensions :

i_0 et u_0 sont respectivement la tension appliquée et le courant à l'entrée de l'enroulement soumis à cette dernière :

$$u_0(t) = U_{max} sin_{max} = r_g i_0 \qquad \text{(II.1)}$$

Avec :

r_g: résistance interne de générateur.

Les équations différentielles des tensions pour l'enroulement du transformateur subdivisé en 6 éléments, sont :

$$u_1 - u_2 - ri_1 = l_s \frac{di_1}{dt} + M_{12}\frac{di_2}{dt} + M_{13}\frac{di_3}{dt} + M_{14}\frac{di_4}{dt} + M_{15}\frac{di_5}{dt} + M_{16}\frac{di_6}{dt}$$

$$u_1 - u_2 - ri_2 = l_s \frac{di_1}{dt} + M_{21}\frac{di_2}{dt} + M_{23}\frac{di_3}{dt} + M_{24}\frac{di_4}{dt} + M_{25}\frac{di_5}{dt} + M_{26}\frac{di_6}{dt}$$

Généralisation :

Pour $1 \leq k \leq 6$

$$u_k - u_{k+1} - r_{ik} = l_s \frac{d_{ik}}{dt} + \sum_{m=1}^{6} u_{km} \frac{di_m}{dt} \quad avec \ \ m \neq k \qquad (II.2)$$

Equations des courants :

$$i_0 = i_1 + i_{cs} + i_{cg/2} \qquad (II.3)$$

$$i_0 - i_1 = i_{cs} + i_{cg/2}$$

Avec :

$$i_{cs} = c_s \frac{d(v_0 - v_1)}{dt} \qquad (II.4)$$

$$i_{cg/2 = c_g/2} \frac{v_0}{dt} \qquad (II.5)$$

En introduisant (II.4) et (II.5) dans (II.3 on obtient :

$$i_0 - i_1 = (c_s + {}^{c_g}/_2) \frac{dv_0}{dt} - c_s \frac{dv_1}{dt}$$

Au nœud (2) correspondant à la tension on a :

$$i_1 - i_2 = -c_s \frac{dv_0}{dt} + (2c_s + c_g) \frac{dv_1}{dt} - c_s \frac{dv_2}{dt}$$

Généralisation

Pour $0 \leq k \leq 6$

$$i_k - i_{k+1} = c_s \frac{du_k}{dt} + \left(2c_s + c_g\right) \frac{du_{k+1}}{dt} - c_s \frac{du_{k+2}}{dt} \qquad (II.6)$$

II.12.1 Représentation matricielle des équations du modèle

Après avoir établi les équations régissant le schéma équivalent d'une phase du transformateur, et après l'intégration des équations (II.2) et (II.6) on obtient :

$$\int_0^t (u_k - u_{k+1}) d_t = \sum_{j=1}^{2n} M_{kj} i_j + R_k \int_0^t i_k d_t \qquad (II.7)$$

Pour les courants :

$$\int_0^t (i_k - i_{k+1})d_t = c_s u_k + (2c_s + c_g)u_{k+1} - c_s u_{k+2} \qquad \text{(II. 8)}$$

Les deux équations ainsi obtenues peuvent se mettre sous la forme condensée suivante :

$$U = C^{-1} \int_0^t \Delta I \, d_t \qquad \text{(II.9)}$$

$$I = L^{-1} \int_0^t (\Delta U - RI) d_t \qquad \text{(II.10)}$$

Dont :

$$\Delta I = (I_k - I_{k+1}) \qquad et \qquad \Delta U = (U_k - U_{k+1}) \qquad \text{(II.11)}$$

U et I sont les vecteurs des tensions et des courants :

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \qquad et \qquad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

[C], [L] et [R] sont respectivement les matrices des capacités et des inductances des enroulements.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_g + C_{g1}/2 & -C_s & \dots & \dots & 0 \\ -C_s & 2C_s + C_{g2} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 2C_s + C_{gN} \end{bmatrix} \qquad \text{(II.12)}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1N} \\ M_{12} & L_2 & \dots & M_{1N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M_{1N} & M_{2N} & \dots & L_N \end{bmatrix}$$

II.13. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle qui basé sur les inductances propres et mutuelles, car il permet de traduire les différents phénomènes qui se produisent le long des enroulements du transformateur. Ce modèle sera retenu dans notre travail afin de modéliser des transformateurs de puissance et étudier leurs comportements internes. Cependant, il est important de rouvert de bonnes procédures dans le calcul des paramètres du modèle afin d'avoir une bonne précision dans les résultats. Cette procédure fait l'objet du troisième chapitre.

CHAPITRE III :

Investigation des déformations mécaniques des enroulements du transformateur en utilisant leur modèle équivalent : résultats expérimentaux

III.1. Introduction

L'analyse de la Réponse en Fréquence (FRA) est un outil puissant et sensible pour évaluer l'intégrité mécanique et géométrique de base, des enroulements et du circuit magnétique dans les transformateurs de puissance, par la mesure de leurs fonctions de transfert sur une large gamme de fréquences [49].

La localisation des dommages mécaniques, à savoir le déplacement ou la déformation, et la détermination de leur gravité dans l'enroulement d'un transformateur posent des problèmes insurmontables. L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est sans aucun doute le moyen le plus sensible de la détecter. Elle contient des informations intégrées sur les dommages et leur gravité, mais il n'existe pas de méthode généralisée pour les extraire ou en tirer des conclusions. Ces dommages devraient être identités à un stade très précoce, localisés et leur gravité évaluée, afin d'éviter des défaillances majeures. Un dommage mécanique de l'enroulement (généralement appelé déplacement ou déformation) est le résultat final des contraintes accumulées par les forces anormales subies par l'enroulement en raison de courts-circuits dans le réseau électrique [49].

Dans ce chapitre nous avons abordé la construction du modèle mutuellement couplé équivalent un enroulement du transformateur en utilisant la morphologie du signal FRA mesuré aux bornes de l'enroulement. Toutefois, la réponse de l'impédance en régime fréquentiel contient tous les paramètres physiques de leur modèle électrique équivalent. Par conséquent, le travail présenté de ce mémoire repose sur l'étude des caractéristiques du signal FRA dans les différentes gammes de fréquence afin d'extraire les paramètres principaux (l'inductance équivalente, la capacité équivalente et les fréquences de résonances) de la réponse d'impédance de l'enroulement du transformateur qui peuvent être utilisées pour l'estimation de tous les paramètres du modèle mutuellement couplé, dans l'objectif de le proposer comme un outil de simulation des défaillances réelles des enroulements du transformateur pour l'évaluation de la position et de la gravité des dommages (ex. défauts de court-circuit) d'enroulements. Des résultats expérimentaux sur un enroulement construit pour cette étude, ont validé le travail réalisé dans ce mémoire.

III.2 Modèle équivalent de l'enroulement du transformateur

Afin de surveiller et de diagnostiquer un enroulement de transformateur, il doit être le représenté par un modèle de circuit équivalent physiquement réalisable. Le circuit doit être

synthétisé de manière à caractériser le comportement fréquentiel de l'enroulement du transformateur. L'enroulement symétrique et homogène du transformateur peut être modélisé par un nombre fini de sections (N) qui forment un seul réseau magnétiquement et électriquement couplé. Chaque section identique (quadripôle) est composée d'une résistance d'enroulement interne (r) en série avec inductance propre (l_s), des capacités shunt et série ($C_g et\ C_s$) et des inductances mutuelles entre les sections i et j ($M_{i,j}$) comme la montre la figure III.1.

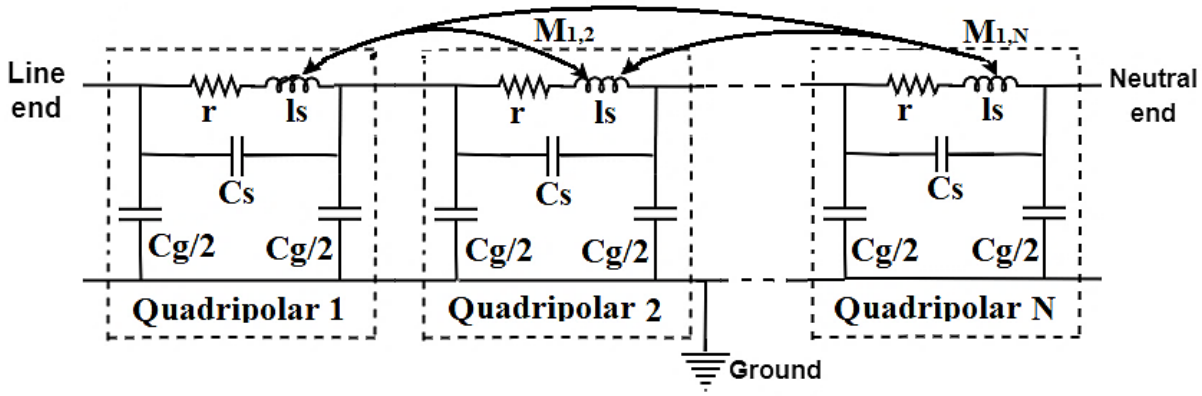


Figure III.1 : *Modèle de circuit équivalent* mutuellement couplé *de l'enroulement de transformateur* [39]

III.3. Analyse et interprétation de la morphologie de la courbe d'impédance de l'enroulement du transformateur

L'interprétation de la réponse d'impédance montré par la figure III.2 donne les effets des paramètres de l'enroulement sur leurs gammes de fréquences appropriés :

- L'effet inductif dans la bande basse fréquence peut être modélisé par une inductance équivalente en série avec une résistance équivalente, qui suit des valeurs linéairement croissantes d'impédance, et cela peut ne pas être exactement linéaire en raison de la non linéarité du noyau dans le cas d'un enroulement avec noyau de fer. En effet, en pratique, il est possible de limiter l'influence du noyau et l'effet des enroulements voisins en choisissant une connexion de bornes appropriée [40,41].
- Aux moyennes fréquences, l'impédance peut être modélisée par des circuits de résonance parallèles et série ; la capacité shunt représente le diélectrique entre l'enroulement et le noyau (terre), la capacité série représente l'effet capacitif entre les

disques, et elles sont convenablement combinées afin de reproduire les pics et les creux du signal FRA.

- Dans les hautes fréquences, l'impédance peut être modélisée par un réseau en échelle de capacités shunt et série ; le modèle est représenté par des capacités uniquement, et il suit des valeurs décroissantes de l'impédance en fonction de la fréquence.

L'étude et la compréhension des propriétés physiques d'enroulement est basée sur l'analyse et l'interprétation de la morphologie du signal FRA mesuré dans leurs bornes, qui est liée aux composants physiques de l'enroulement (sections des conducteurs, nombres de spires, diélectrique, … ect.). Par conséquent, il contient toutes les spécifications techniques de l'enroulement du transformateur, qui peuvent être représentées par des paramètres électriques

(résistance, inductance et capacité). Comme illustre la figure III.2, les paramètres du modèle peuvent être déterminés uniquement à partir des données FRA dans les sous-bandes de fréquences : basses, moyennes et hautes fréquences. L'analyse et l'interprétation exacte du signal FRA dans ces régions peuvent effectivement améliorer la précision de l'identification des paramètres du modèle équivalents. Ainsi, la détermination du paramètre dominant est basée sur sa sous-bande de fréquence correspondante, alors que l'influence des autres paramètres est généralement négligeable [42].

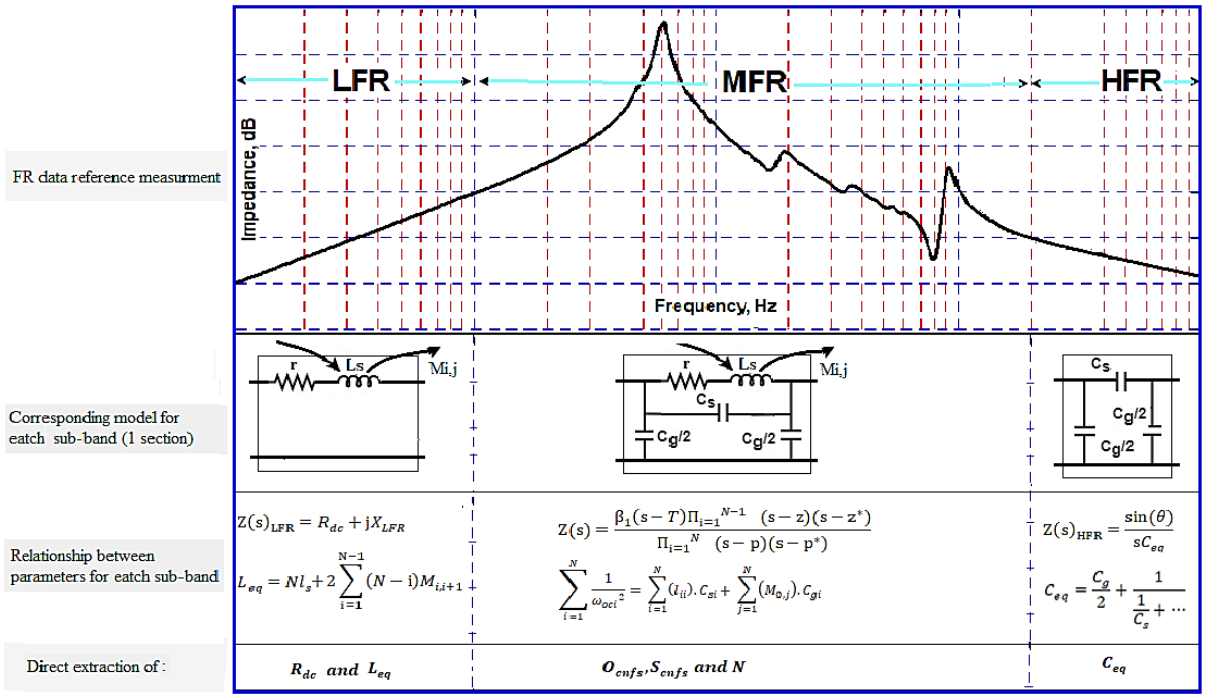


Figure III.2: *Décomposition de la réponse fréquentielle FRA* [39]

- Dans la zone de basse fréquence, l'effet est purement inductif, les inductances propres et mutuelles sont les paramètres dominants.
- Dans la zone de moyenne fréquence, l'effet est double inductif et capacitif, influencé par les capacités série (C_s) et shunts (C_g) et les inductances.
- Dans la zone de haute fréquence, l'effet est purement capacitif, influencé par la capacité équivalente (C_{eq}) causée par les deux paramètres dominants qui sont les capacités (C_s) et (C_g).

III.3.1. Réponse en basse fréquence (sous-bande LFR)

Dans cette zone, l'enroulement isolé peut être modélisé par une résistance équivalente en série avec une inductance équivalente, cette dernière représente les inductances propres et mutuelles l_s et M_j comme le représente la figure III.2. Ainsi, les paramètres présents dans cette région sont $R_{dc}, L_{eq}, l_s \; et \; M_{i,j}$ aux basses fréquences l'impédance est [43]. Dans cette gamme de fréquence la fonction de transfert de l'impédance $Z(s)$ peut être exprimé par la relation (III.1), où la réactance $X(f)$ est donnée par l'équation (III.2).

$$\lim_{S \to 0} Z(s) = R_{dc} + sL_{eq}$$

$$Z(f)_{LFR} = R_{dc} + jX(f)_{LFR} \quad \text{(III.1)}$$

$$X(f)_{LFR} = 2\pi f L_{eq} \quad \text{(III.2)}$$

L'expression de l'inductance équivalente d'enroulement peut être exprimé en fonction des inductance propre et mutuelles comme suite [43] :

$$L_{eq} = N l_s + 2\sum_{i=1}^{N-1}(N-i)\, M_{i,j+1}$$

$$\cong \; l_s[N + 2\sum_{i=1}^{N-1}(N-i)\, \lambda^i]$$

Avec :

R_{dc} : Résistance au courant continu

L_{eq} : Inductance équivalente.

l_s : Inductance propre.

N : Nombre de sections.

$M_{i,j+1}$: Inductances mutuelles

λ: Coefficient d'inductances mutuelles, compris entre 0 et 1.

Remarque : le coefficient λ doit être sensiblement constant pour les différentes inductances mutuelles en cas d'un enroulement de transformateur isolé et uniforme ($M_{i,i+j} \cong M_{i+j,i}$).

En raison de la construction des enroulements du transformateur, le couplage magnétique entre les spires doit suivre certaines règles. Dans des études antérieures [44,45,46], les contraintes des inégalités données dans les équations (III.4) et (III.5) sont utilisées pour identifier les paramètres du modèle.

$$M_{1,1} > M_{1,2} > M_{1,3} > M_{1,4} \qquad \text{(III.4)}$$

$$\lambda\, min^{i} l_s < M_{i,i+1} < \lambda max^{i} l_s \qquad \text{(III.5)}$$

Avec : $0 < \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max} < 1\ \lambda$

Et : $M_{1,2} = \lambda l_s, M_{1,3} = \lambda^2 l_s, M_{1,4} = \lambda^2 l_s, \ldots . etc$

III.3.2 Réponse en moyenne fréquence (sous-bande MFR)

Dans la gamme des moyennes fréquences, la réponse est affectée par l'interaction entre l'effet inductif et capacitif qui provoquent des fréquences de résonance et antirésonance, dans lequel l'impédance est représentée par la fonction de transfert dans l'équation (III.6) comme le montre la figure III.3. Les pôles et les zéros représentent respectivement les fréquences propres en circuit ouvert et en court-circuit O_{cnfs} (open circuit natural frequencies) et S_{cnfs} (short circuit natural frequencies). Cette gamme de fréquence comprend tous les paramètres de l'enroulement (capacités et inductances) :

$$Z(s) = \frac{\beta_1 (s-T) \Pi i=1^{N-1} (s-Z)(s-Z^*)}{\Pi\, i=1^{N} (s-P)(s-P^*)} \qquad \text{(III.6)}$$

β_1 : Facteur d'échelle ; s : zéro réel ;

Z_i , Zi^* : Paire de zéro complexe conjugué ;

p_1 , Pi^* : Paire de pôles complexe conjugué ;

La relation qui relié entre les fréquences de résonance et les paramètres de modèle (capacités et inductances) développé par Mukherjee et al. [47] est donné comme suit :

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{\omega_{oci}^2} = \sum_{i=1}^{N} (l_{ii}) C_{si} + \sum_{j=1}^{N} (M_{o,j}) C_{gi} \qquad \text{(III.7)}$$

Avec $\omega_{oci} = 2\pi O_{cnfi}, la\ \ i\grave{e}me$ fréquence de résonance (pulsation) :

l_{ii}: Inductance propre du $i\grave{e}me$ disque ;

C_{si} : Capacité série du $ième$ disque;

C_{gi} : la capacité shunt du $ième$ du disque

$M_{o,j}$: Inductance totale entre la fin de la ligne et la fin du $ième$ disque ;

III.3.3. Réponse en régime des hautes fréquences (sous-bande HFR)

Aux fréquences plus élevées, l'effet capacitif peut être exprimé par l'équation (III.8) [48], Comme le montre la figure III.3, la courbe est une fonction hyperbolique qui diminue avec l'augmentation de la fréquence. La capacité totale de l'enroulement représente la valeur équivalente de la capacité shunt et série de chaque partie, sa valeur doit rester constante sur une plage de fréquence déterminé où l'angle de phase de l'impédance est approximativement est égal à 90°. Par conséquent, dans cette région les paramètres existants sont C_{eq} , C_g et C_s, avec cela, le circuit de la figure III.1 peut être considéré est équivalent à une combinaison composée des capacités shunt et sérié, qui est représenté par la figure III.3 ci-dessous.

$$Z(s)_{HFR} = \frac{\sin\theta}{sC_{eq}} \qquad \text{(III.8)}$$

Avec : $$C_{eq} = \frac{C_g}{2} + \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_g + \frac{1}{\frac{1}{C_s}\cdots\cdots}}}$$

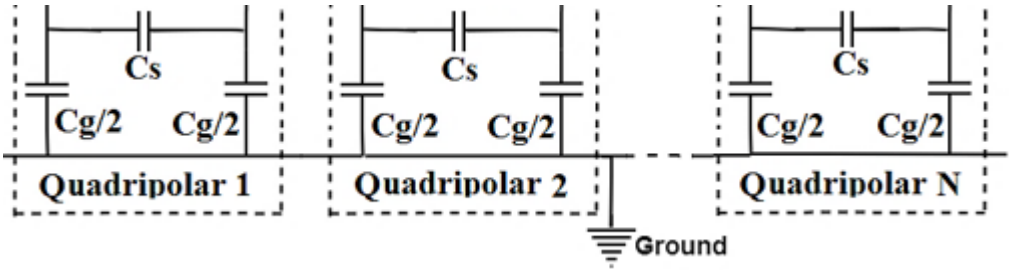


Figure III.3. Modèle HFR équivalent à un enroulement du transformateur

III.3.4. 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 aux bornes de l'enroulement du transformateur repose sur la détermination des régions des paramètres dans leurs gammes de fréquences correspondantes (LFR, MFR et HFR) ce que représente la figure III.2 :

- ✓ Pour la gamme de fréquence LFR, la linéarité de la courbe d'impédance $Z(f)_{LFR}$est important pour assurer que l'effet est purement inductif est typiquement inférieure à 1000 Hz dans tous les enroulements, qui est la fréquence la plus basse lorsque l'enroulement se comporte comme une inductance [45].
- ✓ Pour la gamme de fréquence HFR est commencé après la dernière fréquence de résonance O_{cnfs} lorsque l'angle de phase est très proche de 90°.
- ✓ Pour la gamme de fréquence MFR est comprise entre les deux plages LFR et HFR.

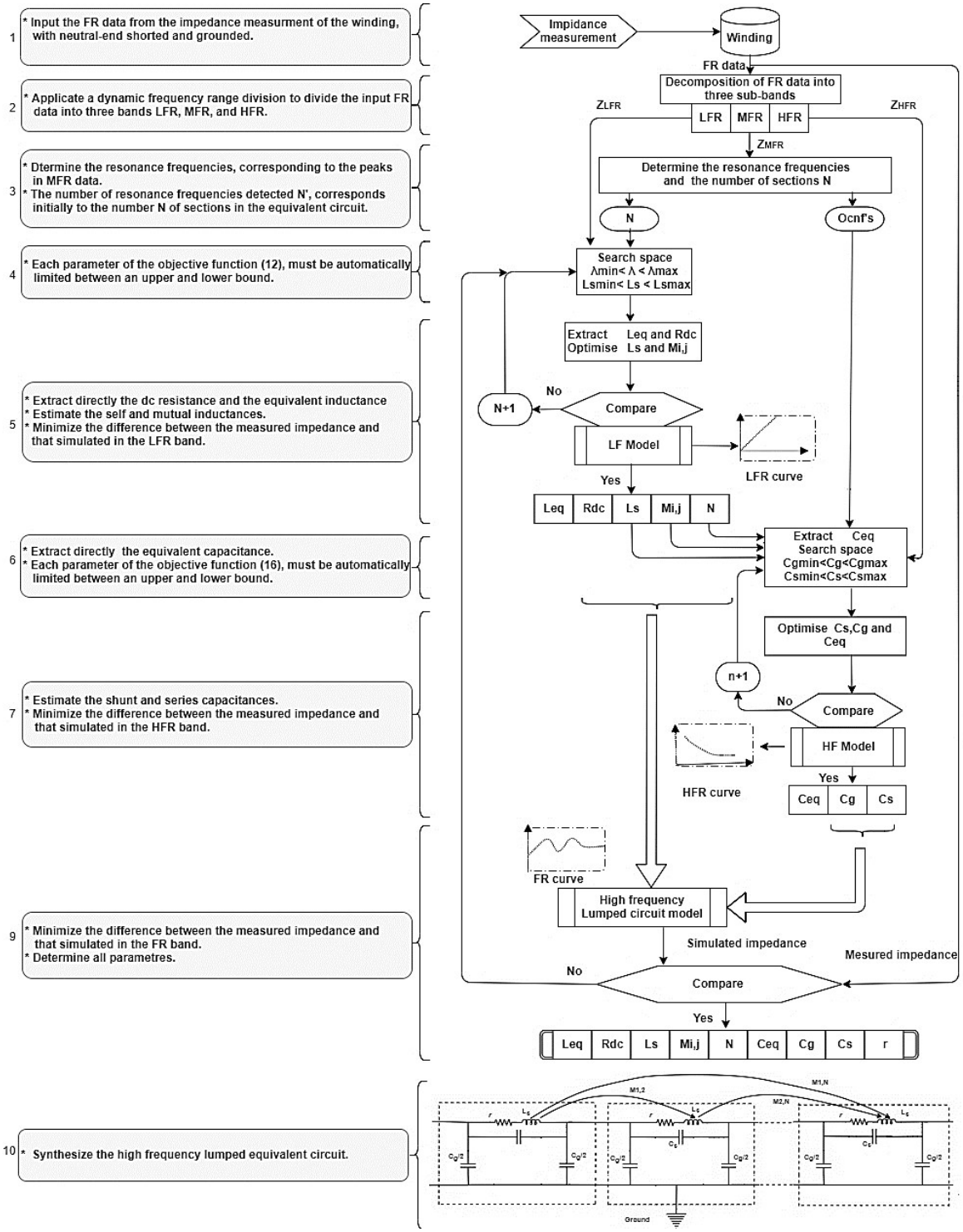


Figure III.4: *Représentation graphique de la procédure proposée* [39].

Comme le montre la Fig.III.4 [39], différents paramètres constituant le modèle dans chaque sous-bande sont extraits séparément. Partant du nombre de nœuds N du circuit à synthétiser, il doit initialement être supérieur ou égal au nombre de fréquences de résonance, qui peut être déterminé en extrayant directement des données de sous-bande MFR. Ensuite, l'inductance équivalente est extraite directement de la pente de la réactance $X(f)_{LFR}$. Ensuite,

pour identifier les inductances propres et mutuelles, un algorithme d'optimisation nécessite la définition de la fonction objective et l'espace de recherche des paramètres à estimer. Ainsi, en utilisant l'algorithme BA [48], on peut déterminer ls et λ dans l'équation (III.2) et substituer leurs valeurs dans l'équation (III.3) pour obtenir facilement toutes les inductances mutuelles. Dans le processus, des simplifications mathématiques ont été proposées par Amara et al. pour limiter les espaces de recherche des paramètres à estimer, réduire le temps d'exécution et améliorer la précision l'optimisation. Par la suite, l'estimation des capacités C_g et C_s est réalisée par l'équation (III.7) en utilisant les résultats déjà obtenus (O_{cnfs} , N, l_s et $M_{i,j}$).

La méthode d'estimation est basée sur des critères de performance incluant la minimisation de la différence entre les courbes LFR, MFR et HFR mesurées et les courbes simulées à partir du modèle équivalent, comme le montre l'organigramme de la Figure III.4 [39].

III.4. Validation expérimentale de la méthode d'interprétation de la morphologie du signal FRA pour construire le modèle mutuellement couplé

La méthode d'interprétation de la morphologie du signal d'impédance en régime fréquentiel est appliquée à un enroulement réel de laboratoire dont le banc d'essai illustré dans la Figure.III.5. La synthèse de circuit mutuellement couplé commence par la mesure de la réponse en fréquence de l'impédance de l'enroulement sur une large gamme de fréquence (20 Hz - 1 MHz) représenté dans la figure III.6. Toutefois, l'approche devrait identifier tous paramètres pour reproduire un comportement similaire de l'enroulement testé.

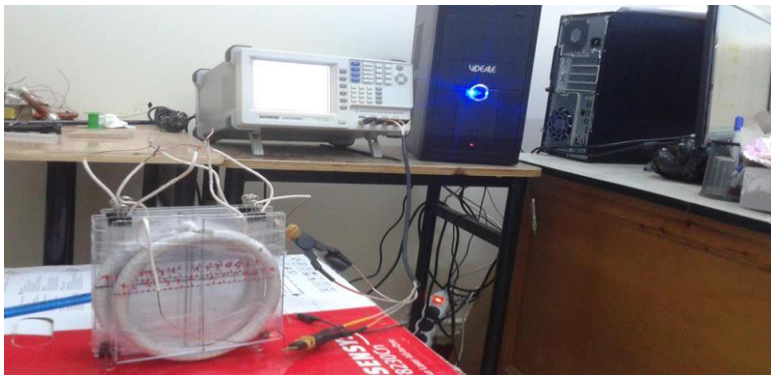


Figure III.5: Représentation du test FRA expérimentale de l'enroulements réels[39]

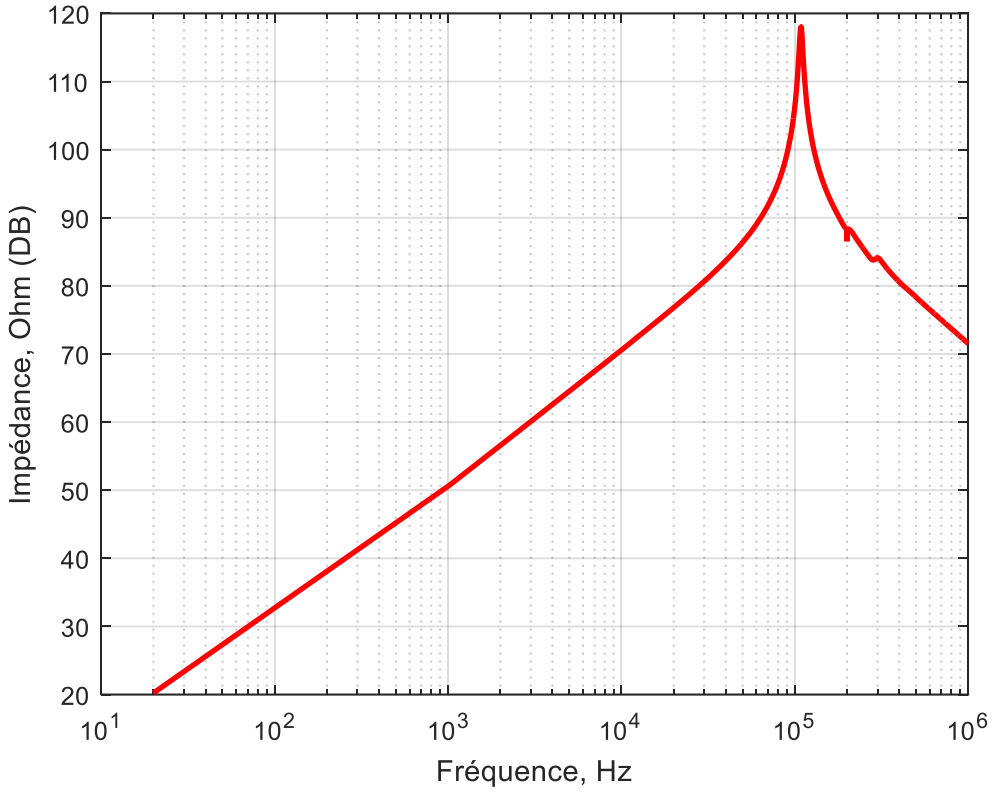


Figure III.6: *La réponse d'impédance mesurée à l'état sain de l'enroulements réel* [39]

Le processus d'identification des paramètres est effectué selon l'organigramme de la figure III.4, où tous les paramètres d'entrée de l'algorithme sont extraits directement des données de la réponse en fréquence d'impédance comme suit :

• Extraire les fréquences de résonances O_{cnfs} De la gamme MFR indiquée sur la figure III.6 ($O_{cnf1} = 109$ kHz, $O_{cnf2} = 201$ kHz et $O_{cnf3} = 301$ kHz).

• Déterminer le nombre de nœuds *N* du circuit équivalent, initialement égal à nombre de fréquence O_{cnfs} extrait ($N = 3$).

• Extraire la résistance globale d'enroulement des données LFR ($R_{dc} = 7{,}72\ \Omega$).

• Extraire la valeur d'inductance équivalente de la bande LFR, qui est $L_{eq} = 53{,}5$ mH.

• Pour trouver la solution optimale pour les inductances propres et mutuelles, la fonction objectif et l'espace de recherche doivent être spécifiés pour l'algorithme optimisation. De plus, la restriction de l'espace de recherche des inductances propres et mutuelles est choisis les valeurs supérieure et inférieure de λ ($\lambda_{min} = 0{,}4$ et $\lambda_{max} = 0{,}8$), alors la borne avec une inductance appropriée peut être obtenue comme suit:

- La limite supérieure de λ λ_{max} = 0,8

- La limite inférieure de λ λ_{min} = 0,4 ;

- La limite supérieure de l_s l_{smax} =7,6 mH ;

- La limite inférieure de l_s l_{smin} =4,44 mH ;

Cet algorithme est utilisé pour optimiser la self-inductance l_s et le coefficient, où les résultats estimés sont $\lambda = 0{,}6\ et\ ls = 5{,}1\ mH$.

Le nombre de sections N est initialisé à une valeur égale au nombre de fréquences résonance de réponse en fréquence. Dans le cas étudié, il a été initialisé à N=3, mais N = 4 est obtient comme la meilleure valeur, qui est le nombre de disques qui composent l'enroulement d'essai, qui reflètent la réalité physique de l'enroulement étudié. Les valeurs estimées des inductances propre et mutuelles sont données dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Valeurs estimées des inductances en mH.

Paramètres	Valeurs
N	**4**
$\mathbf{L_{eq}}$	**50**
$\mathbf{l_s}$	**5.1**
$\mathbf{M_{1,2}}$	**3 .2**
$\mathbf{M_{1,3}}$	**2**
$\mathbf{M_{1,4}}$	**1.2**

Les valeurs optimales estimées des capacités shunt et série (C_g et C_s) sont données dans le tableau III.2.

Tableau III.2 Valeurs estimées des capacités (pF)

Paramètres	Valeurs
$\mathbf{C_s}$	139
$\mathbf{C_g}$	5.6
$\mathbf{C_{eq}}$	38.2

Enfin, la procédure des critères de performance consiste à rapprocher la courbe FRA mesurée de celle de la simulation du modèle équivalent mutuellement couplé. L'approche permet de minimiser la différence entre la courbe d'impédance $Z(f)_{FR}$ et celle obtenue à partir des paramètres identifiés du modèle dans toute la gamme de fréquences figure III.6.

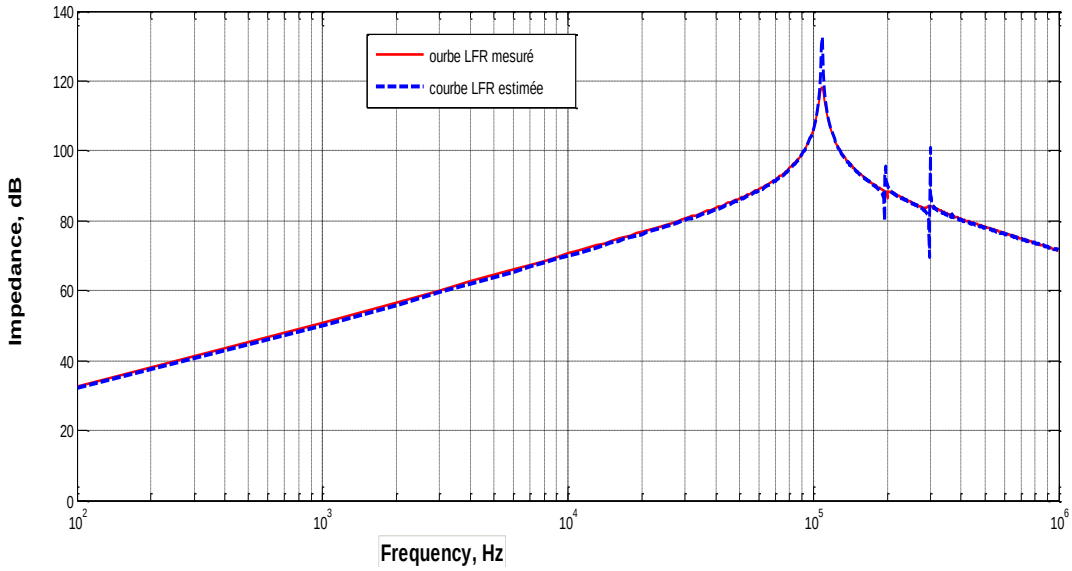


Figure III.6 : *Comparaison entre* $Z(f)_{FR}$ *mesuré et celle estimé par l'approche d'interprétation de la morphologie du signal FRA.*

La comparaison des valeurs de fréquences de résonance mesurées avec celles estimées est présentée dans le tableau III.3, où il est clair qu'elles sont identifiées avec une grande précision en utilisant l'approche *d'interprétation de la morphologie du signal FRA*, l'erreur calculée ne dépasse pas 1%.

Tableau III.3 : Comparaison entre les fréquences de résonances mesurées et celles estimées.

Fréquence de résonance	Mesuré	Identifié	Déviation
$\mathbf{O}_{cnf1}$	109	109	0.0%
$\mathbf{O}_{cnf2}$	199	197	1%
$\mathbf{O}_{cnf3}$	300	299	0.33%

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

Récemment, les chercheurs ont tenté de proposer le modèle mutuellement couplé comme un outil de simulation des défauts réels du transformateur [44]. Par ailleurs, après avoir valider le modèle mutuellement couplé équivalent à un enroulement du transformateur par la procédure d'interprétation de la morphologie du signal FR de l'impédance, ce dernier a été utilisé pour simuler des défauts de court-circuit réels dans l'objectif de proposer le modèle comme un outil de réalisation des défaillances réelles des enroulements du transformateur de puissance et afin d'évaluer la position et la gravité de ces déformations d'enroulement.

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

Les spires court-circuitées dans chaque disque est désigné par n_{cc1} pour le disque 1, n_{cc2} pour le disque 2 et n_{cci} 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 n_1, n_2 et ni sont le pourcentage des tours court-circuités sur les disques 1, 2 et i de l'enroulement, qui sont définis comme suit :

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{n1 = \frac{n_{cc1}}{n_T}} \\ \boldsymbol{n2 = \frac{n_{cc1}}{n_T}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{n1 = \frac{n_{cci}}{n_T}} \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{bmatrix} f1 = 1 - n_1 \\ f1 = 1 - n_2 \\ fi = 1 - n \end{bmatrix}$$

Les résistances, les inductances propre et mutuelles et les capacités en série de l'enroulement dépendent de leurs valeurs nominales et des coefficients fi, qui sont donnés par les matrices ci-dessous. Tout changement physique de l'enroulement (ex. défaut de court-circuit) reflète sur les paramètres du modèle et par conséquent affecte la courbe FR de l'enroulement et leurs

fréquences de résonances évidemment. Cependant, ces changements physiques peuvent être simulés en introduisant les pourcentages fi dans les matrices des inductances et des capacités du modèle mutuellement couplé équivalent à l'enroulement du transformateur.

$$R = r * \begin{bmatrix} f_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & f_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & f_i \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} f_1^2 l_{11} & f_1 f_2 M_{12} & \dots & f_1 f_i M_{i,j} \\ f_2 f_1 M_{12} & f_2^2 l_{11} & \dots & f_2 f_i M_{i,j} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1 f_i M_{i1} & f_i f_2 M_{i2} & \dots & f_{i,j}^2 l_{i,j} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} \frac{C_S}{f_1} + \frac{C_{g1}}{2} & -\frac{C_S}{2} & \dots & 0 \\ -\frac{C_S}{f_S} & 2\frac{C_S}{f_2} + C_{g2} & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 2\frac{C_S}{f_i} + C_{gN} \end{bmatrix}$$

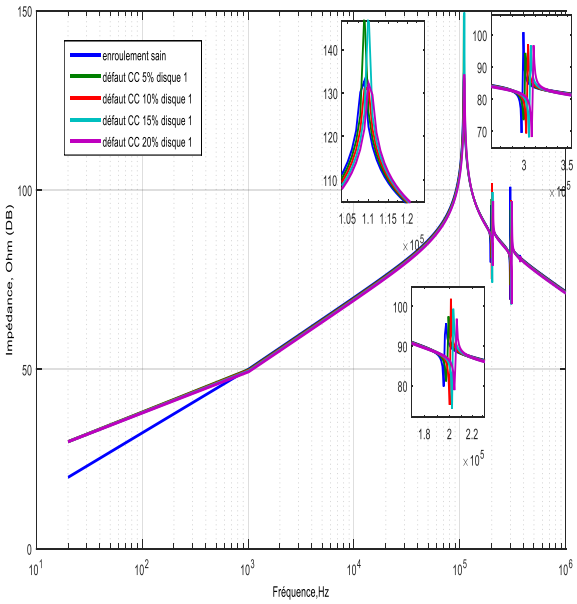
Note : La capacité shunt C_g peut être définie par la capacité entre l'enroulement et la terre. Cependant, cette capacité est la capacité équivalente des capacités de shunt entre les spires et la masse. Comme les capacitances entre les spires ne sont pas égales, leur capacité shunt équivalente ne peut pas être exprimée en fonction du nombre de spires et ne peut donc pas être exprimée en fonction du coefficient de défaut f_i. 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.5.2. Simulation des défauts de court-circuit pour les différents disques de l'enroulement

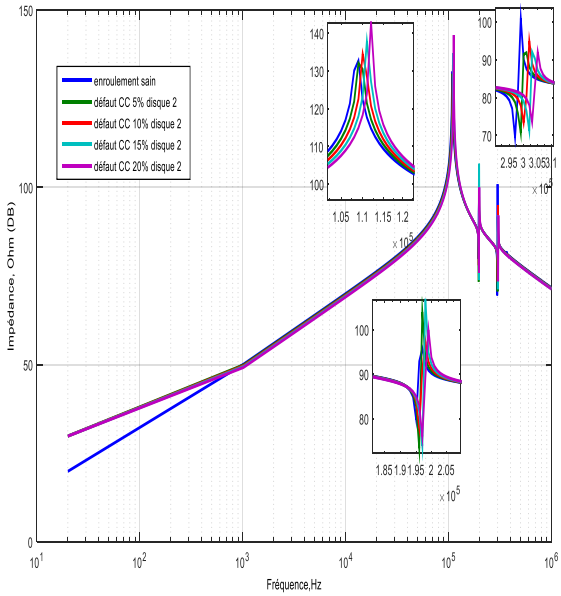
Le modèle mutuellement couplé peut être proposé comme un outil de simulation des défauts de court-circuit afin d'analyser et d'interpréter les défaillances de l'enroulement du transformateur. A cette fin, des défauts de court-circuit ont été réalisés sur les différents disques de l'enroulement en modifiant les paramètres de l'enroulement par l'approche proposée. Ensuite, la technique d'analyse fréquentielle est utilisée pour évaluer la gravité de ces défaillances.

III.5.2.1. Evaluation de la gravité des défauts de court-circuit dans chaque disque de l'enroulement

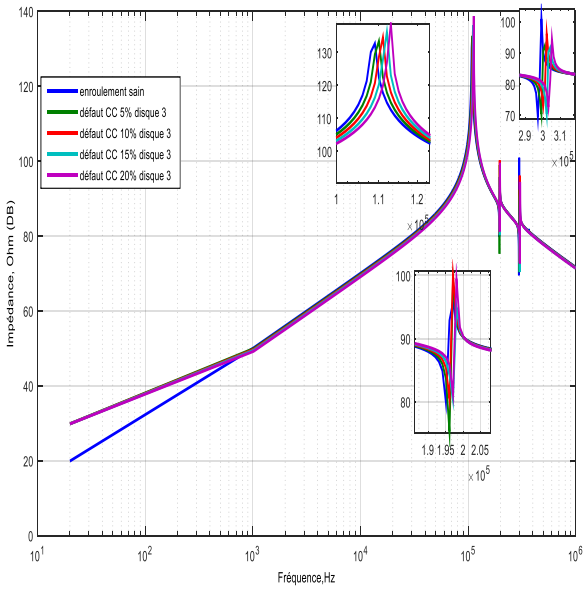
Les figures III.7 (a), (b), (c) et (d) montre les réponses d'impédances de l'enroulement du transformateur après avoir inclus les défauts de court-circuit dans leur modèle équivalent mutuellement couplé.



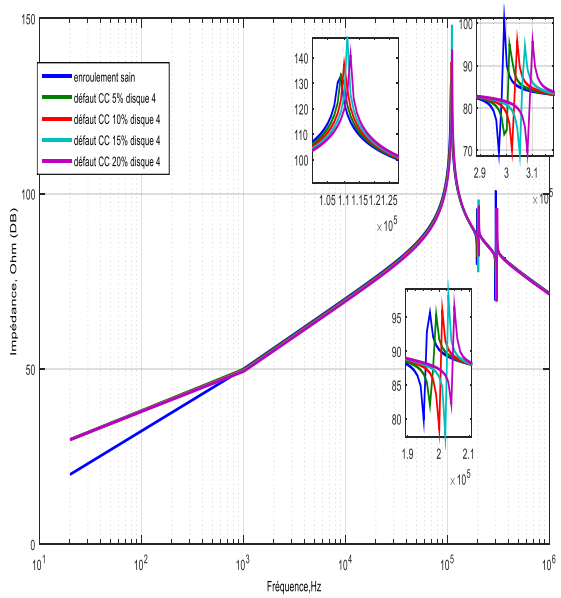
(a)



(b)



(c)



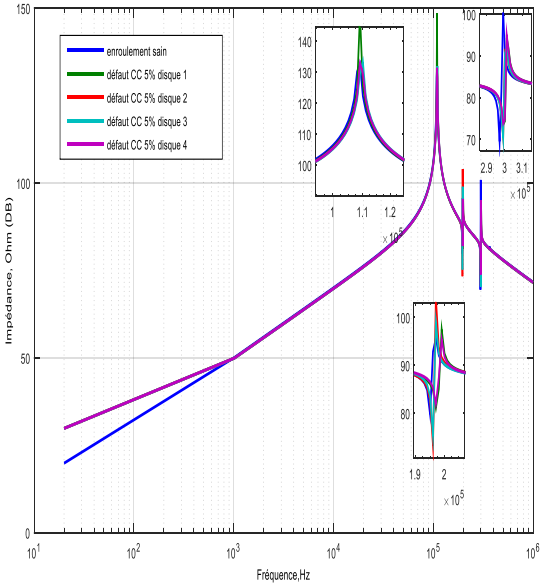
(d)

Figure III.7. Les réponses d'impédances de l'enroulement du transformateur pour les défauts de court-circuit, (a) : défauts 5%, 10%, 15% et 20% sur disque1, (b) : défauts 5%, 10%, 15% et 20% sur disque2, (c) : défauts 5%, 10%, 15% et 20% sur disque3 et (d) : défauts 5%, 10%, 15% et 20% sur disque 4.

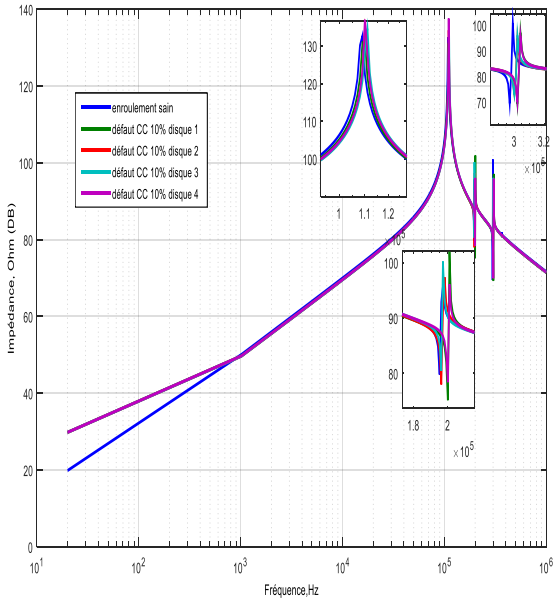
Les défauts ont été réalisé pour les différents disques de l'enroulement dans des pourcentages déterminés (5%, 10%, 15% et 20%) afin d'analyser l'influence de ces défaillances sur les comportements fréquentiels de l'enroulement. Par ailleurs, à partir de ces courbes on peut constater que les courbes FRA obtenues sont décalés vers la droite d'une manière uniforme en fonction de l'augmentation des pourcentages des défauts des disques de l'enroulement, et l'influence de ces défaillances en haute fréquence est plus importante qu'en basse fréquence, ce que peut donner une idée sur l'évaluation de la gravité des défauts de court-circuit dans les bobinages du transformateur.

III.5.2.2. Investigation de la position des défauts de court-circuit de l'enroulement

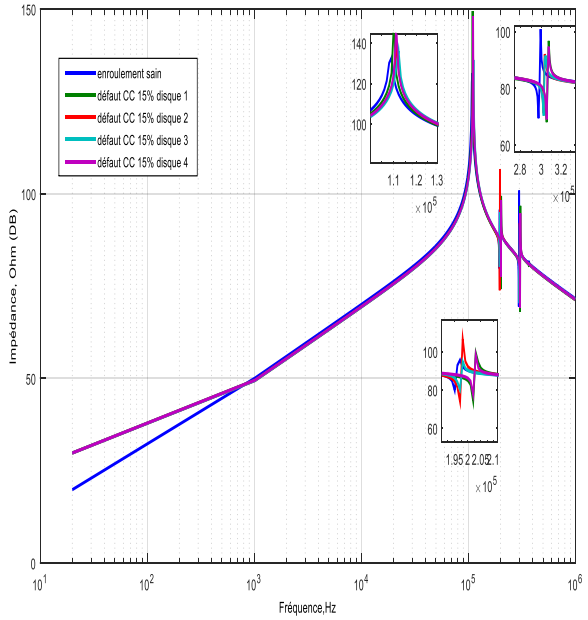
Les figures III.7 (a), (b), (c) et (d) montre les réponses d'impédances de l'enroulement du transformateur pour les défauts de court-circuit dans les différents disques de l'enroulement. Les défauts ont été réalisés sur les disques de l'enroulement dans des pourcentages égaux afin d'étudier leur effet sur les réponses en fréquence de l'enroulement pour investiguer la position du défaut sur l'enroulement. A partir de ces courbes on peut constater que les courbes des impédances obtenues sur les disques (1 et 4) et (2 et 3) sont similaires à cause de la symétrie des disques de l'enroulement. Par conséquent, il suffit d'étudier les défauts des disques sur la moitié de l'enroulement pour avoir une idée sur la position de défauts.



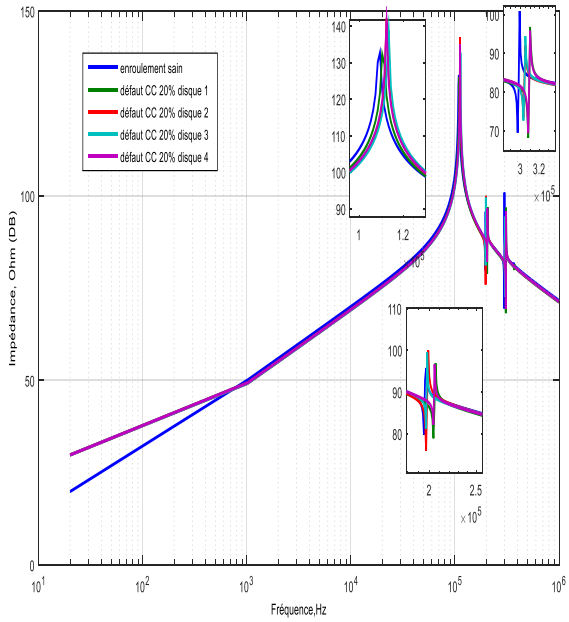
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.7. 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.

III.5.2.3. Exploitation de la morphologie du signal FRA dans la localisation et l'évaluation de la position des défauts de court-circuit de l'enroulement

L'utilisation des indices numériques est l'une des méthodes introduites pour l'interprétation de la FRA afin de détecter, localiser et évaluer l'étendue des déformations des enroulements du transformateur pour prendre une décision sur la situation du transformateur, s'il a besoin d'une réparation ou s'il peut continuer son fonctionnement normal. Dans ce chapitre, l'écart type (STD) a été utilisé pour diagnostiquer les défaillances de l'enroulement. Toutefois, cet indice a été calculé dans chaque gamme de fréquence (LFR, MFR et HFR) pour les différents degrés de défaillances des disques de l'enroulement. Le tableau III.3 montre les valeurs de STD, où on peut constater que ces valeurs sont égales dans la gamme LFR dans les disques 1 et 4, et 2 et 3 à cause de la symétrie de l'enroulement et due à l'effet magnétique de l'enroulement qui comporte comme inductance dans cette gamme de fréquence, contrairement dans les autres gammes de fréquences (MFR et HFR) les valeurs de STD ne sont pas égales due à la présences des deux effets capacitifs et inductifs. Par ailleurs, pour l'évaluation de la gravité de ces défaillances on peut constater que l'indice STD est diminue d'une façon monotone en fonction de l'augmentation de degré de défaut CC dans la gamme LFR.

Tableau III.4 : les valeur de STD calculé dans les gammes LFR et HFR pour l'enroulement sain et d'effectuer

Enroulement sain												
Gammes de fréquences	Basses			Moyennes			Hautes					
STD	222.1640			1.9290×10^5			61.6873×10^5					
Défaut CC_ disque1	5%			10%			15%			20%		
Gammes de fréquences	LFR	MFR $\times 10^5$	HFR	LFR	MFR $\times 10^5$	HFR	LFR	MFR $\times 10^5$	HFR	LFR	MFR $\times 10^5$	HFR
STD	217.1106	8.8234	60.9127	212.1706	1.8180	60.1371	207.3440	9.7345	59.3606	202.6306	1.8181	58.5833
Défaut CC_ disque2	5%			10%			15%			20%		
STD	216.2218	1.8720	61.0627	210.3930	2.1047	60.4349	204.6776	2.7782	59.8039	199.0755	4.6846	59.1697
Défaut CC_ disque3	5%			10%			15%			20%		
STD	216.2217	1.9793	61.1535	210.3929	2.1152	60.6152	204.6774	2.3985	60.0727	199.0753	3.0031	59.5257
Défaut CC_ disque4	5%			10%			15%			20%		
STD	217.1105	1.9353	61.1975	212.1704	2.7162	60.7022	207.3436	8.3765	60.2016	202.6302	3.8233	59.6956

III.6.Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la synthèse du modèle mutuellement couplé physiquement réalisable équivalent à un enroulement du transformateur en utilisant uniquement leur impédance mesurée sur une large gamme de fréquence. Toutefois, l'impédance mesurée a été subdivisée en trois régions de fréquence (LFR, MFR et HFR) afin d'exploiter les comportements fréquentiels de l'enroulement dans l'estimation des paramètres de leur modèle équivalent. Le modèle construit a été proposé pour la simulation des défauts de court-circuit réels des enroulements du transformateur pour l'évaluation de la position et de la gravité de ces défauts.

Conclusion générale

Notre travail est consacré à une méthode d'estimation de paramètres d'un enroulement de transformateur basée sur des données de réponse en fréquence FRA. En fait, FRA est une méthode de diagnostic relativement nouvelle pour détecter les dommages mécaniques des Bobinages du transformateur.

Nous avons présenté dans notre mémoire une approche qui est basée sur la morphologie du signal FRA mesuré aux bornes des enroulements du transformateur de puissance pour construire leur modèle équivalent très répondu dans le domaine de diagnostic des défaillances. L'approche est basée sur la décomposition du signal FRA en trois gammes de fréquence (basse, moyenne et haute fréquences ou LFR, MFR et HFR), en utilisant ses trois gammes on a étudié les comportements fréquentiels de l'enroulement afin d'extraire les principaux paramètres électriques de l'enroulement pour estimer tous les paramètres du modèle équivalent.

La deuxième approche du notre travail est basé sur la proposition du modèle mutuellement couplé physiquement réalisable dans la simulation des défaillances réelles des bobinages du transformateur de puissance. Les résultats obtenus ont montré que cette approche peut constituer un outil simple et efficace pour le diagnostic des défaillances qui peuvent avoir lieu dans les enroulements du transformateur.

Dans ce travail, la simulation des défauts a été limitée uniquement aux défauts de court-circuit très répandu dans les enroulement du transformateur de puissance, nous attendons donc dans les prochaines études de proposer le modèle afin de simuler d'autres défauts des enroulements du transformateur, tels que; les déformations radiaux et axiaux, qui sont liés au changement des inductances mutuelles et de la capacité shunt du modèle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : Omicron electronics 'FRAnalyzer Manuel d'utilisation' Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006.

[2] : Sonelgaz DEPT GRTE formation sur le diagnostic des transformateurs de puissance « Méthodes de diagnostic de transformateur E. cottens janvier 2008 ».

[3] : Document SONELGAZ « Ecole technique de Blida les transformateurs de puissance ».

[4] : Support de cours, «TECHNOLOGIES DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES HTB DES POSTES ».

[6]: A. A. Halacsy, « Transformer Invented 75 Years Ago », IEEE Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 80, n o 3, avril 1961, p. 121-125.

[5] : Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE octobre 2008 ».

[6]: T. Nakata ;N. Takahashi ;Y. Kawase « magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores » IEEE Transactions On Magnetics, Vol. Mag-18, No. 6, November 1982.

[7] : Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE octobre 2008 ».

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

[9] : 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).

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

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

[12] : ABB REVIEW

REFERENCES

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

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

[15] : 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.

[16] 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

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

[18] https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance

[19] http/riverglennapts.com

[20] : http/electrical-engineering-portal.com.

[21] (Crédit photo: forensic.cc).

[22] BOUKIRAT Samia et SALHI Sakhria. «Modélisation et diagnostic des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé» mémoire de Master.

[23] **HANIF TAVAKOLI** .« A High Frequency Transformer Winding Model for FRA Applicat ions » Licent iate thesis in Electromagnetic Engineering, Stockholm, Sweden ,juli 2009.

PG2 [17] OMICRON/ Tests de diagnostic et surveillance des transformateurs de puissance pdf.

[24] IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, IEEE C57.149-2012

[25] F. Predl (OMICRON Australia), Interpretation of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) Measurement Results, OMICRON, Sydney, 2016.

[26] Weed, J.M. "Abnormal Voltages in Transformers". AIEE Trans., Vol. 34, pt.II, 1915, pp. 2197 2236.

[27] González C. - Examen et analyse de la modélisation du transformateur de puissance à partir de sa réponse

[28] Abetti, P. A.; "Bibliography on the Surge Performance of Transformers and Rotating Machines," Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol.77, no.3, pp.1150-1168, April 1958 doi:10.1109/AIEEPAS.1958.4500118.

REFERENCES

[29] M. Wang, A. Vandermaar, and K. Srivastava, "Improved detection of power transformer winding movement by extending the fra high frequency range," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, no. 3, pp. 1930–1938, 2005.

[30] « Modelo del Transformador de Distribucion para el Analisis de Respuesta en Frecuencia»

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

[32] E. Rahimpour, J. Christian, K. Feser, and H. Mohseni, "Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings," IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 2, pp. 493– 505, Apr. 2003.

[33] Ragavan, K., Satish, L.: 'Localisation of changes in a model winding based on terminal measurement', IEEE Trans. Power Deliv., 2007, 22, (3), pp. 1557–1565

[34] Toudji M, Parent G, Duchesne S, Dular P. Determination of Winding Lumped Parameter Equivalent Circuit by Means of Finite Element Method. Ieee T Magn. 2017; 53:1 -4

[35] Vivek Landage, Ashish Khsrche, Vadirajacharya. K, Harish Kulkarni, 'Transformer health condition monitoring through GSM Technology", International Journal of Scientific &Engineering. Research Volume 3, Issue 12, December-2012, ISSN 2229-5518. 2012.

[36] Jafar Nosratian Ahour, Saeed Seyedtabaii, Gevork B. Gharehpetian: 'Determination and localisation of turn-to-turn fault in transformer winding using frequency response analysis', IET Sci. Meas. Technol., 2018, Vol. 12 Iss. 3, pp. 291-300

[37] Krupa Rajendra Shah and K. Ragavan, Estimation of Transformer Winding Capacitances through Frequency Response Analysis – An Experimental Investigation, International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2013; vol. 14, no. 6, pp. 549–559

[38]: Otmane-Cherif T, N.Mufidzada, N.Benamrouche «Influence of the Number of the nodes in the Windings Equivalent circuit o the Surge voltages in transformers»,international Review on Modeling and simulation, Italy, vol.1, N°2, pp 78-84, October 2008.

[39] Amara A, Gacemi A, Houassine H, Chaouche MS. A novel methodology for high-frequency lumped equivalent circuit of an isolated transformer winding construction based on frequency response analysis signal morphology interpretation. IET Electr. Power Appl. 2021;1–15. https://doi.org/ 10.1049/elp2.12013 university médéa 2020;

[40]. 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)

REFERENCES

[41]. Mukherjee, P., Satish, L.: Localization of radial displacement in an actual isolated transformer winding – an analytical approach. IEEE Trans. Power Deliv. 31(6) (2016)

[42]. Huan, L., Ziwei, Z.: Equivalent gradient area-based fault interpretation for transformer winding using binary morphology. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 24(3) (2017)

[43]. Ragavan, K., Satish, L.: Localisation of changes in a model winding based on terminal measurement. IEEE Trans. Power Deliv. 22(3), 1557–1565 (2007)

[44]: 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;

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

[46]. Ahour, N.J., Seyedtabaii, S.: Modified transformer winding ladder network model to assess non-dominant frequencies. IET Electr. Power Appl. 11(4), 578–585 (2017)

[47]. Mukherjee, P., Satish, L.: Localization of radial displacement in an actual isolated transformer winding an analytical approach. IEEE Trans. Power Deliv. 27, 963–70 (2012)

[48] Toguyeni, A.K.A., (1992). “Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière“, Thèse de doctorat, Université de Lille.

[49] Enquête internationale sur les défaillances en service des transformateurs de grande puissance. Electra (88), 21-42.