

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Projet de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en électromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

Simulation d'une décharge partielle dans un enroulement d'un transformateur de puissance

Proposé et dirigé par :

Dr. HOUASSINE Hamza

Mme. AISSAOUI Nassima

Préparé et présenté par :

M. CHENANE SOUHEYB

M. RAKHOUANE ADNANE

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciement

Nous remercions tout d'abord Dieu de nos avoir prêté santé et volonté pour mener à terme ce mémoire.

Nous remercions vivement Mr. HOUASSINE HAMZA et Mme. AISSAOUI NASSIMA pour leurs disponibilités tout au long de ce travail, nous les remercies encore pour leurs aide si précieux sur les plans conseils et orientations.

Nous tenons tout particulièrement à remercier tous les enseignants qui ont contribués à nos formations, son disponibilités et encouragement

Nos reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury, pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.

J'ai également une pensée pour tous mes proches, famille et mes amis, qui ont fait preuve de beaucoup de patience et m'ont encouragé.

Et finalement, nous adressons nos remerciements les plus profonds et les plus distingués à tous ceux qui ont contribués de proche ou de loin à ce modeste travail.

Dédicace

Tous les mots ne pourraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que je dédie ce mémoire à :

À mes très chers parents, symbole de l'amour et d'affection qu'ils trouvent ici le fruit de leur sacrifice et leur encouragement

À toute la famille CHENANE et LADJALI

À mes très chers amis, À l'ensemble des étudiants de ma promotion

Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le primaire à ce jour, en particulier : HOUASSINE HAMZA et Mme AISSAOUI NASSIMA

À tous ceux qui me sont chers et que j'ai de citer

SOUHEYB

Dédicace

Tous les mots ne pourraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que je dédie ce mémoire à :

À mes très chers parents, symbole de l'amour et d'affection qu'ils trouvent ici le fruit de leur sacrifice et leur encouragement

À toute la famille RAKHOUANE

À mes très chers amis, À l'ensemble des étudiants de ma promotion

Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le primaire à ce jour, en particulier : HOUASSINE HAMZA et MADAME AISSAOUI

À tous ceux qui me sont chers et que j'ai de citer

ADNANE

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur les transformateurs de puissance

I.1-Introduction : 3

I.2-Définition : 3

I.3-Principe de fonctionnement : 3

I.4-Historique : 4

I.5-Construction interne d'un transformateur de puissance : 5

I.5.1-Partie active : 5

I.5.1.1-Circuit magnétique : 5

I.5.1.2-Les Enroulements : 6

I.5.2-Isolation : 7

I.5.3-Huile : 8

I.5.4-Isolation papier : 8

I.5.5-La Cuve : 8

I.5.6-Traversées: 9

I.5.7-Le système de refroidissement : 10

I.6-Composants associés au transformateur de puissance : 10

I.7-Couplage du transformateur : 11

I.8-Types des transformateurs : 11

I.8.1-Transformateurs de transmission : 11

I.8.2-Transformateurs de distribution : 11

I.8.3-Transformateurs de type sec : 12

I.8.4-Transformateurs immergés dans l'huile : 13

I.8.5-Autotransformateurs : 13

I.9-Défauts dans les transformateurs : 14

I.10-Protection de transformateur : 15

I.11-Techniques de diagnostic des transformateurs : 16

I.12-Conclusion : 17

Chapitre II : Généralités sur les décharges partielles

| | |
|--|----|
| II.1-Introduction :..... | 18 |
| II.2-Généralités :..... | 18 |
| II.3-Définition :..... | 19 |
| II.4-Classification de la décharge partielle :..... | 19 |
| II.4.1-Décharge partielle externe :..... | 20 |
| II.4.2-Décharge partielle interne :..... | 20 |
| II.4.3-Décharge Corona :..... | 20 |
| II.4.4-Décharge de surface :..... | 20 |
| II.4.5- Décharge en arborescence :..... | 20 |
| II.4.6- Décharge de cavité :..... | 20 |
| II.5-Mécanisme de décharge :..... | 21 |
| II.6-Causes de la décharge partielle :..... | 22 |
| II.6.1- DP causé par des vides :..... | 22 |
| II.6.2- Surfaces irrégulières sur le matériau isolant :..... | 22 |
| II.6.3-Bulles dans l'isolation liquide :..... | 22 |
| II.6.4- décharges coronales :..... | 23 |
| II.6.5- L'inefficacité de la fabrication :..... | 23 |
| II.7-Effets de la décharge partielle :..... | 23 |
| II.8-Effet de DP dans l'enroulement de transformateur :..... | 24 |
| II.9-Nécessité de la détection de la décharge partielle en transformateur :..... | 24 |
| II.10-Le modèle d'une décharge partielle :..... | 25 |
| II.11-Circuit de détection de signal de DP en enroulement isolation :..... | 26 |
| II.12-Techniques de détection et de mesure des décharges partielles :..... | 27 |
| II.12.1-Méthode de détection optique :..... | 27 |
| II.12.2-Méthode de détection acoustique :..... | 28 |
| II.12.3-Méthode de détection électrique :..... | 28 |
| II.13- Analyse de la réponse en fréquence (FRA) :..... | 28 |
| II.13.1-Généralités :..... | 28 |
| II.13.2-Principe de fonctionnement :..... | 29 |
| II.13.3-Les méthodes d'analyse de la réponse en fréquence :..... | 30 |

| | |
|--|----|
| II.13.3.1-Impulsion : | 30 |
| II.13.3.2-Balayage : | 31 |
| II.13.4- Détection de défaut par FRA : | 31 |
| II.13.5- Objectifs des mesures par FRA : | 32 |
| II.14-Conclusion : | 32 |

Chapitre III : Modélisation d'un transformateur de puissance

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction : | 33 |
| III.2 - Principaux modèles des transformateurs de puissance : | 33 |
| III.2.1 Le modèle RESEL : | 33 |
| III.2.2. Le modèle universel EMTP : | 34 |
| III.2.3-Modèle de Leon : | 35 |
| III.2.4. Modélisation par l'analyse modale : | 36 |
| III.2.5. Modélisation par la théorie de lignes : | 37 |
| III.2.6- Modèle de Chimklai : | 38 |
| III.2.7- Modèle d'Andrieu : | 40 |
| III.2.8- Modèle de Noda : | 41 |
| III.2.9-Modèles basés sur les inductances propres et mutuelles : | 41 |
| III.3- Modèle adopté pour l'enroulement de transformateur : | 43 |
| III.3.1- Equations du schéma équivalent adopté : | 44 |
| III.3.1.1-Equations des tensions : | 45 |
| III.3.1.2.Equations des courants : | 45 |
| III.3.3-Représentation matricielle des équations du modèle : | 46 |
| III.4-Conclusion : | 47 |

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

| | |
|---|----|
| IV.1-Introduction : | 48 |
| IV.2- Caractéristique de l'enroulement étudié et mesure : | 48 |
| IV.3- Méthode de calcul des paramètres du modèle adopté : | 49 |
| IV.4- Optimisation par les essaims de particules : | 51 |
| IV.5- Les étapes de la méthode PSO : | 52 |

| | |
|---|----|
| IV.6- Critères d'arrêt : | 52 |
| IV.7- Application de la méthode PSO pour l'identification des paramètres de l'enroulement du transformateur : | 53 |
| IV.8- Identification des paramètres du l'enroulement étudié : | 53 |
| IV.9- Diagnostic des défauts dans l'enroulement du transformateur : | 55 |
| IV.10- Simulation des différents défauts étudiés : | 56 |
| IV.10.1- Défauts de décharge partielle dans l'enroulement : | 56 |
| IV.10.1.1- Décharge partielle dans la 1 ^{ère} cellule : | 57 |
| IV.10.1.2- décharge partielle dans la 2 ^{ème} cellule : | 58 |
| IV.10.1.3- décharge partielle dans la 3 ^{ème} cellule : | 59 |
| IV.10.1.4- décharge partielle dans la 4 ^{ème} cellule : | 60 |
| IV.10.1.5- décharge partielle dans la 5 ^{ème} cellule : | 61 |
| IV.10.1.6- Comparaison entre les défauts de décharge partielle et un enroulement sain : | 62 |
| IV.11- Défauts de court-circuit sur l'enroulement : | 63 |
| IV.11.1- Court-circuit entre la 1 ^{ère} et la 2 ^{ème} cellule : | 64 |
| IV.11.2- Court-circuit entre la 2 ^{ème} et la 3 ^{ème} cellule : | 65 |
| IV.11.3- Court-circuit entre la 3 ^{ème} et 4 ^{ème} cellule : | 66 |
| IV.11.4- Court-circuit entre la 4 ^{ème} et la 5 ^{ème} cellule : | 67 |
| IV.11.5- Comparaison de la réponse en fréquence entre les défauts de court-circuit et l'enroulement sain : | 68 |
| IV.12- Ouverture des cellules : | 69 |
| IV.12.1- Ouverture de la 1 ^{ère} cellule : | 69 |
| IV.12.2- Ouverture de la 2 ^{ème} cellule : | 70 |
| IV.12.3- Ouverture de la 3 ^{ème} cellule : | 71 |
| IV.12.4- Ouverture de la 4 ^{ème} cellule : | 72 |
| IV.12.5- Ouverture de la 5 ^{ème} cellule : | 73 |
| IV.12.6- Comparaison de la réponse en fréquence entre les défauts d'ouverture des cellules et un enroulement sain : | 75 |

| | |
|---|-----------|
| IV.13- Localisation de défaut de long de l'enroulement :..... | 76 |
| IV.14-Conclusion :..... | 77 |
| Conclusion générale | 78 |
| Bibliographie | |

Liste des figures :

| | |
|--|----|
| Figure (I.1) : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance | 4 |
| Figure (I.2) : Circuit magnétique triphasé type cuirassé..... | 6 |
| Figure (I.3) : Circuit magnétique triphasé type colonne..... | 6 |
| Figure (I.4) : Enroulement..... | 7 |
| Figure (I.5) : Coupe de demi-enroulement..... | 7 |
| Figure (I.6) : Enroulement en couche..... | 7 |
| Figure (I.7) : Enroulement en galettes..... | 7 |
| Figure (I.8) : La cuve d'un transformateur de puissance | 9 |
| Figure (I.9) : Traversé porcelaine..... | 9 |
| Figure (I.10) : Traverse condensateur..... | 9 |
| Figure (I.11) : Composants constituant un transformateur de puissance..... | 10 |
| Figure (I.12) : Transformateur de distribution..... | 12 |
| Figure (I.13) : Transformateur de type sec | 12 |
| Figure (I.14) : Transformateur immergé dans l'huile..... | 13 |
| Figure (I.15) : Schéma équivalent d'un autotransformateur..... | 14 |
| Figure (I.16) : Décharges partielles..... | 15 |
| Figure (II.1) : Une décharge partielle dans l'isolation solide..... | 19 |
| Figure (II.2) : Une décharge partielle dans un diélectrique..... | 19 |
| Figure (II.3) : Différents types de décharges..... | 21 |
| Figure (II.4) : Représentation schématique et représentation équivalente d'une décharge dans un isolant solide..... | 25 |
| Figure (II.5) : Circuit de détection de signal DP de type RLC..... | 27 |
| Figure (II.6) : Principe de la FRA..... | 30 |
| Figure (III.1) : Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL..... | 34 |
| Figure (III.2) : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP..... | 35 |
| Figure (III.3) : Circuit de FOSTER en série..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Figure (III.4) : Modèle de CAUER pour le noyau de fer..... | 36 |
| Figure (III.5) : Schéma équivalent modal..... | 37 |
| Figure (III.6) : Schéma équivalent d'un enroulement..... | 37 |
| Figure (III.7) : Modélisation du transformateur par une ligne..... | 38 |
| Figure (III.8) : Modèle du transformateur de Chimklai..... | 39 |
| Figure (III.9) : Impédance de l'enroulement (Zwinding)..... | 39 |
| Figure (III.10) : Modèle d'Andrieu..... | 40 |
| Figure (III.11) : Circuit équivalent de Z_{cc} | 40 |
| Figure (III.12) : Modèle de Noda..... | 41 |
| Figure (III.13) : Schéma de principe de la modélisation par inductances propres et mutuelles..... | 42 |
| Figure (III.14) : Couplage de l'élément j avec les autres éléments..... | 43 |
| Figure (III.15) : Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur..... | 44 |
| Figure (IV.1) : Schéma équivalent du bobinage | 50 |
| Figure (IV.2) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence..... | 50 |
| Figure (IV.3) : Organigramme de la méthode PSO. | 53 |
| Figure (IV.4) : Réponse en fréquence obtenu par PSO..... | 54 |
| Figure (IV.5) : Comparaison entre la mesure et l'estimation de l'impédance en fonction de la fréquence | 55 |
| Figure (IV.6) : Schéma équivalent du bobinage avec décharge partielle..... | 56 |
| Figure (IV.7) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence..... | 57 |
| Figure (IV.8) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence..... | 58 |
| Figure (IV.9) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence..... | 59 |
| Figure (IV.10) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence..... | 60 |
| Figure (IV.11) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence..... | 61 |
| Figure (IV.12) : Les différentes impédances pour chacun des points de décharge partielle entre cellules et celle de l'enroulement sain. | 63 |
| Figure (IV.13) : Schéma équivalent du bobinage avec court-circuit..... | 64 |

| | |
|--|----|
| Figure (IV.14) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 1 ^{ème} et le 2 ^{ème} élément et un enroulement sain. | 64 |
| Figure (IV.15) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 2 ^{ème} et le 3 ^{ème} cellule et un enroulement sain. | 65 |
| Figure (IV.16) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 3 ^{ème} et le 4 ^{ème} élément et un enroulement sain. | 66 |
| Figure (IV.17) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 4 ^{ème} et le 5 ^{ème} élément et un enroulement sain. | 67 |
| Figure (IV.18) : Les différentes impédances pour chacun des points de court-circuit entre élément et spires et celle de l'enroulement sain..... | 68 |
| Figure (IV.19) : Schéma équivalent du bobinage avec ouverture de cellule..... | 69 |
| Figure (IV.20) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire à la 1 ^{ème} cellule..... | 70 |
| Figure (IV.21) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 2 ^{ème} cellule. | 71 |
| Figure (IV.22) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 3 ^{ème} cellule. | 72 |
| Figure (IV.23) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 4 ^{ème} cellule. | 73 |
| Figure (IV.24) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 5 ^{ème} cellule..... | 74 |
| Figure (IV.25) : Les différentes impédances pour chacun des points de circuit ouvert des spires et celle de l'enroulement sain..... | 75 |
| Figure (IV.26) : La comparaison entre les différentes valeurs des fréquences de premier pic dans le cas d'un enroulement sain d'une part et d'autre part dans le cas d'un défaut..... | 76 |

Liste des tableaux :

| | |
|--|----|
| Tableau (IV.1) : L'inductance propre et mutuelle obtenir par PSO, Les valeurs en mH..... | 53 |
| Tableau (IV.2) : La comparaison des fréquences normale en circuit ouvert (Ocnf) et celles en court-circuit (Scnf) de la mesure et de PSO..... | 54 |
| Tableau (IV.3) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 1 ^{ère} cellule et un enroulement sain..... | 57 |
| Tableau (IV.4) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 2 ^{ème} cellule et un enroulement sain..... | 58 |
| Tableau (IV.5) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 3 ^{ème} cellule et un enroulement sain..... | 59 |
| Tableau (IV.6) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 4 ^{ème} cellule et un enroulement sain..... | 61 |
| Tableau (IV.7) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 5 ^{ème} cellule et un enroulement sain..... | 62 |
| Tableau (IV.8) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 1 ^{ère} et le 2 ^{ème} élément un enroulement sain..... | 65 |
| Tableau (IV.9) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 2 ^{ème} et le 3 ^{ème} élément un enroulement sain..... | 66 |
| Tableau (IV.10) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 3 ^{ème} et le 4 ^{ème} élément un enroulement sain..... | 67 |
| Tableau (IV.11) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 4 ^{ème} et le 5 ^{ème} élément et un enroulement sain..... | 68 |
| Tableau (IV.12) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 1 ^{ère} cellule et l'enroulement sain..... | 70 |
| Tableau (IV.13) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 2 ^{ème} cellule et l'enroulement sain..... | 71 |

Tableau (IV.14) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 3^{ème} et l'enroulement sain.....72

Tableau (IV.15) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 4^{ème} cellule et l'enroulement sain.....73

Tableau (IV.16) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au le 5^{ème} cellule et l'enroulement sain.....74

Introduction générale

Introduction générale

Le transformateur est considéré comme l'élément indispensable dans le réseau de transport et de distribution d'électricité, l'impact d'une défaillance du transformateur peut être catastrophique car il peut provoquer des pannes prolongées, des réparations coûteuses et des avaries potentiellement graves, afin de conserver une longue durée de vie, une qualité et une continuité de service, un diagnostic périodique est nécessaire.

Durant une défaillance ou un défaut, les intégrités mécanique, diélectrique et thermique du transformateur sont souvent affectées et évoluées dans le temps. Ainsi elles provoquent une dégradation d'isolement par de différentes causes telles que les courants de défaut (courant de court-circuit, courant d'enclenchement....) et les surtensions électriques (transitoire, manœuvre, ou de foudre).

Dans le cas des contraintes électriques, les matériaux isolants subissent l'action d'un champ électrique. Cependant, la répartition instantanée du champ n'est pas homogène et ceci est en partie dû au fait que l'ensemble des isolants constitue un milieu assez souvent hétérogène et que ce milieu comprend des défauts. Il est possible ainsi, de définir en chaque point un gradient localisé qui peut atteindre la valeur disruptive lorsqu'il y a présence de bulles gazeuses (cavités). Dans ce cas, il apparaît à partir du seuil disruptif un arc de décharge locale qui neutralise le gradient. Cet arc de décharge locale se reproduit chaque fois que le gradient dépasse au point critique la valeur disruptive du gaz. Ce phénomène irréversible est dit décharges partielles ; car elles ne court-circuitent pas l'ensemble de l'isolation.

En effet, il est admis à ce jour que le phénomène de décharges partielles peut entraîner la destruction du matériel après un certain temps d'usage alors qu'il a subi avec succès les essais diélectriques. Il devient donc important de connaître et de mesurer sur un matériel, neuf ou en service, une grandeur représentative du phénomène de décharges partielles. Cette connaissance ne pourra pas entraîner directement une relation avec la durée de vie probable du matériel, mais elle donnera des renseignements intéressants.

Le diagnostic consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement du transformateur, un système de diagnostic peut être mis en œuvre dans deux cas ; en cours d'exploitation ou pendant l'arrêt d'exploitation. En cours d'exploitation, le but est de garantir la sécurité et la continuité de service. En arrêt d'exploitation, l'objectif est d'évaluer le degré de vieillissement de certains éléments et de décider d'une opération de maintenance préventive ou curative.

Introduction générale

La maintenance des transformateurs est un facteur important pour la fiabilité et la maintenabilité de l'alimentation électrique.

L'identification des paramètres de l'enroulement du transformateur est un problème difficile, plusieurs méthodes ont été proposées pour le résoudre. Dans notre étude, nous nous intéressons, au cours de ce mémoire à l'identification des paramètres d'un enroulement d'un transformateur de puissance, par la méthode d'Optimisation par Essaim de Particule (PSO).

L'analyse de la réponse en fréquence (FRA) se trouve être un outil utile pour la détection fiable de défauts mécaniques et électriques naissant dans un transformateur. Il existe différentes méthodes d'évaluation du spectre des fréquences pour confirmer la présence d'un défaut [1]. Ainsi, la technique FRA a le potentiel pour détecter des problèmes d'enroulement. C'est la technique la plus efficace actuellement disponible qui n'exige pas d'ouvrir le transformateur en raison de sa sensibilité élevée pour détecter les défauts. Cette méthode est basée sur le concept du changement géométrique dans les enroulements en raison de la déformation et des déplacements causés par une modification dans les impédances de l'enroulement du transformateur et par conséquent d'une modification de sa réponse en fréquence. L'impédance du transformateur de puissance est composée d'une configuration complexe comportant des résistances, inductances et condensateurs (circuit résonnant RLC).

L'application pratique de la technique FRA pour détecter les dommages mécaniques et électriques dans un transformateur dépend de sa sensibilité à tout changement dans les inductances et les capacités réparties. Le circuit équivalent est utile dans la modélisation de la sensibilité de la réponse fréquentielle aux changements qui peuvent avoir lieu dans les enroulements. L'interprétation de la FRA basée sur la modélisation de circuit du transformateur a pour but de représenter le comportement d'un transformateur sur toute la gamme de fréquence. La modélisation du transformateur basée sur la variété de types des modèles, utilisent des paramètres de réseau équivalent (RLC) et se concentrent sur la gamme de fréquence d'intérêt [1].

L'objectif essentiel de ce travail est de proposer un modèle d'un transformateur traduisant son comportement en régime fréquentiel afin de l'utiliser comme un outil de simulation des défauts le long de l'enroulement du transformateur, ainsi localiser et détecter les différents défauts dans un transformateur de puissance.

Pour cerner cet objectif, notre mémoire est subdivisé en 04 chapitres.

Introduction générale

Le premier chapitre concerne une étude bibliographique portant sur les généralités, les contraintes et les différentes méthodes de diagnostic de transformateur de puissance.

Le second chapitre a pour objet de présenter l'une des défauts ; les décharges partielles et leurs influences sur les transformateurs de puissance.

Le troisième chapitre a pour objet de présenter les principaux modèles de transformateurs existant dans la littérature qui semble plus adéquat à la problématique posée, le modèle classique du transformateur est discuté et décrit brièvement le contexte théorique sur les circuits RLC parallèle. Et décrit la présentation du modèle électrique de l'impédance du transformateur basé sur le réseau des cellules RLC passif.

Le quatrième chapitre de notre étude est consacré à la validation du modèle adopté et son exploitation pour une étude de diagnostic à haute fréquence par FRA, en réalisant plusieurs défauts sur l'enroulement étudié. Les résultats obtenus sont enfin discutés en fin de chapitre.

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

I.1-Introduction :

Un 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 [2].

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 » [3].

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 [4].

I.3-Principe de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un transformateur est basé sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Quand une tension U_1 variable, est appliquée entre les bornes de l'enroulement primaire, elle y engendre un courant i_1 variable.

La force magnétomotrice variable $N_1 i_1$ 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 [5].

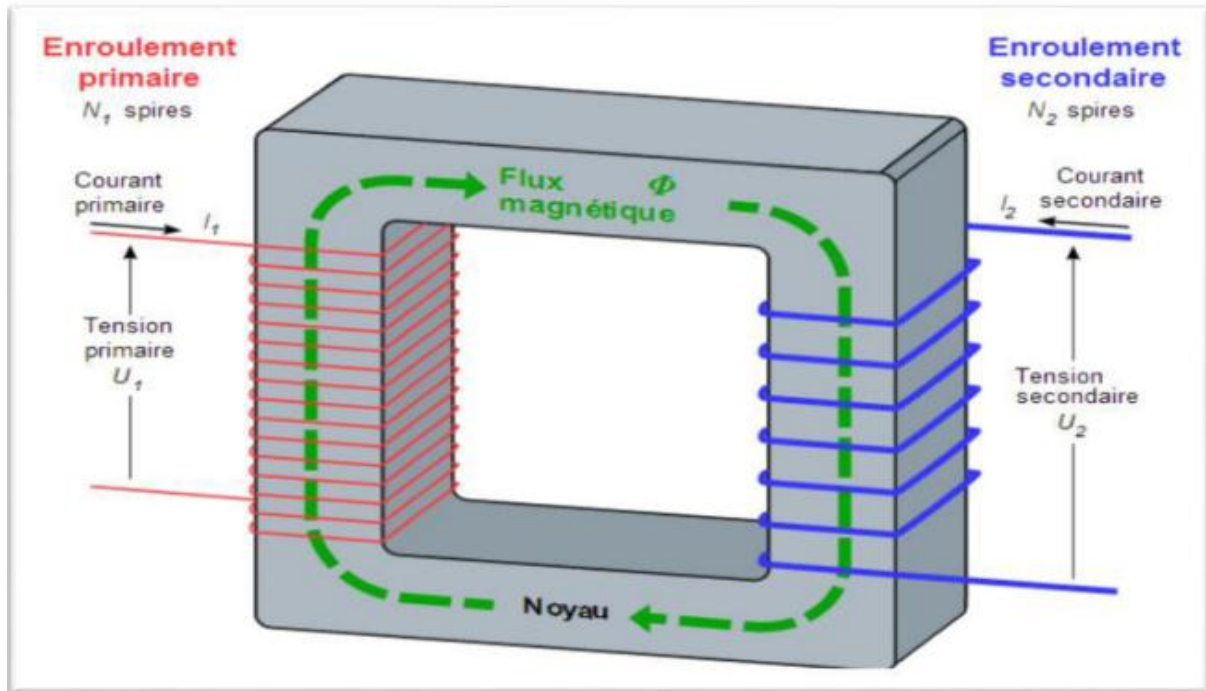


Figure (I.1) : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.

I.4-Historique :

Le principe de l'induction électromagnétique est découvert indépendamment par Michael Faraday et Joseph Henry en 1831. Mais Faraday ayant publié le premier ses résultats expérimentaux, le crédit de la découverte lui revient.

Dans les années 1870, des générateurs électriques en courant alternatif apparaissent. On se rend compte qu'en l'utilisant dans une bobine d'induction le système d'ouverture du circuit devient inutile. Le premier système à circuit magnétique en fer est exposé par Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs à Londres en 1882, qui le dénomment générateur secondaire. En automne 1884, la société Ganz, venu à la conclusion que les circuits magnétiques ouverts ne sont pas la solution pour les usages pratiques et pour réguler la tension, Toujours en automne 1884, la société Ganz réalise le premier transformateur à haut rendement et le livre le 16 septembre 1884 [6].

En 1889, le russe Mikhaïl Dolivo-Dobrovolski construit le premier transformateur triphasé chez AEG, une société allemande.

I.5-Construction interne d'un transformateur de puissance :

I.5.1-Partie active :

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

I.5.1.1-Circuit magnétique :

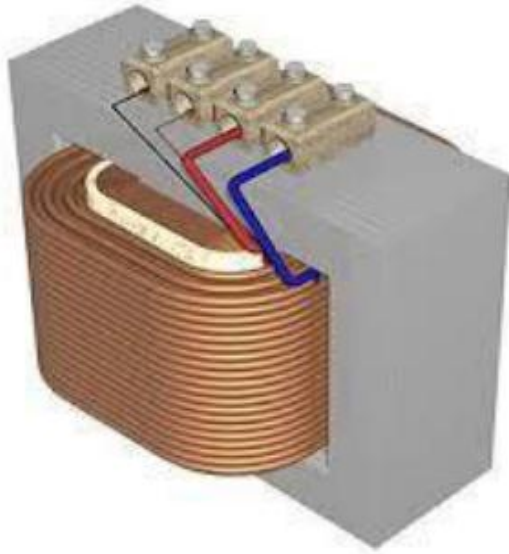
Le noyau se compose d'un empilage de tôles ferromagnétique de haute perméabilité et à grains orientés, isolées électriquement entre elles. Il doit être conçu de façon à réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique.

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 [7].

- 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 [8].



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



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

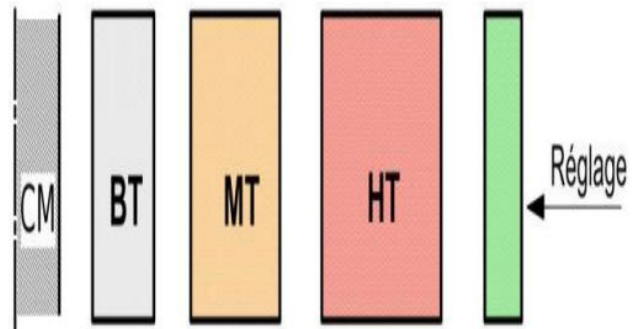
I.5.1.2- Les Enroulements :

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 [9].

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.

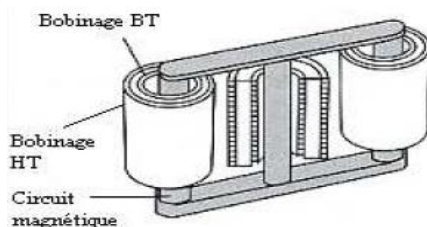
CM : circuit magnétique.

BT : basse tension.

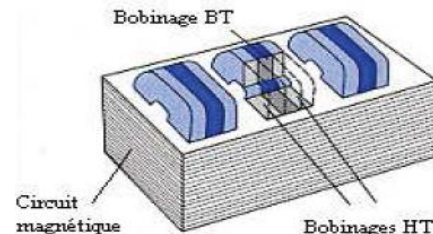
MT : moyenne tension.

HT : haute tension.

- On distingue deux types de bobinages :



Figure(I.6) : Enroulement en couche.



Figure(I.7) : Enroulement en galettes.

I.5.2-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 [10].

I.5.3-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 [11].

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

I.5.4-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 a 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 [12].

I.5.5-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 [12].

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.8) : La cuve d'un transformateur de puissance.

I.5.6-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 dizaine de kV le corps des traversées est généralement constitué d'un bloc unique de porcelaine, qui est un matériau isolant [13].



Figure (I.9) : Traversé porcelaine



Figure (I.10) : Traverse condensateur

I.5.7-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]

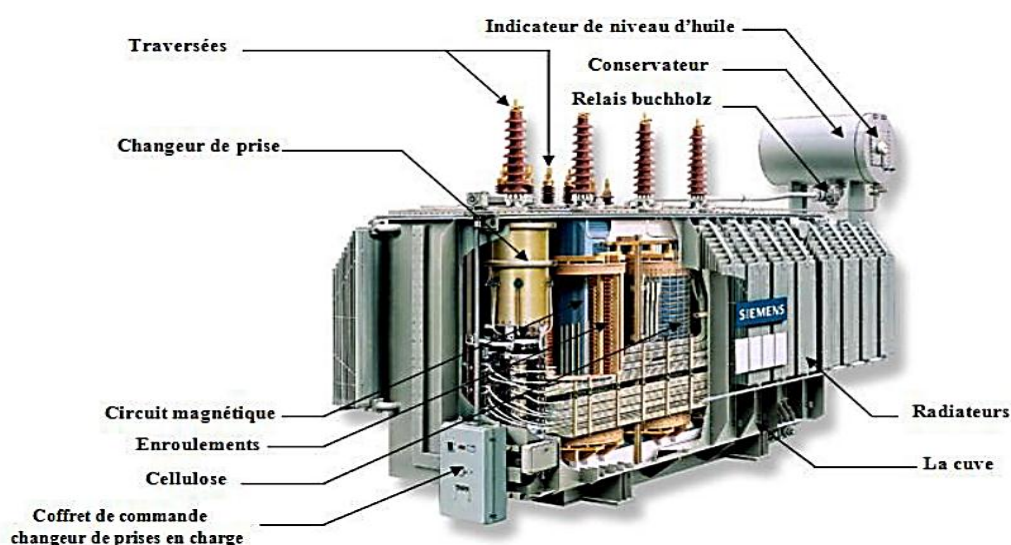
Le système de refroidissement d'un transformateur a pour but de maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables. Le choix du mode de refroidissement se fait en particulier en fonction des paramètres suivants :

- pertes à évacuer
- température ambiante extérieure
- contraintes de bruit
- contraintes dimensionnelles limitant la taille du transformateur
- et bien sûr le coût.

I.6-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.



Figure(I.11) : composants constituant un transformateur de puissance.

I.7-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.8-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.8.1-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 [15].

I.8.2-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.12) : Transformateur de distribution.

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

I.8.3-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.13) : Transformateur de type sec.

I.8.4-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 [16].



Figure (I.14) : Transformateur immergé dans l'huile.

I.8.5-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.

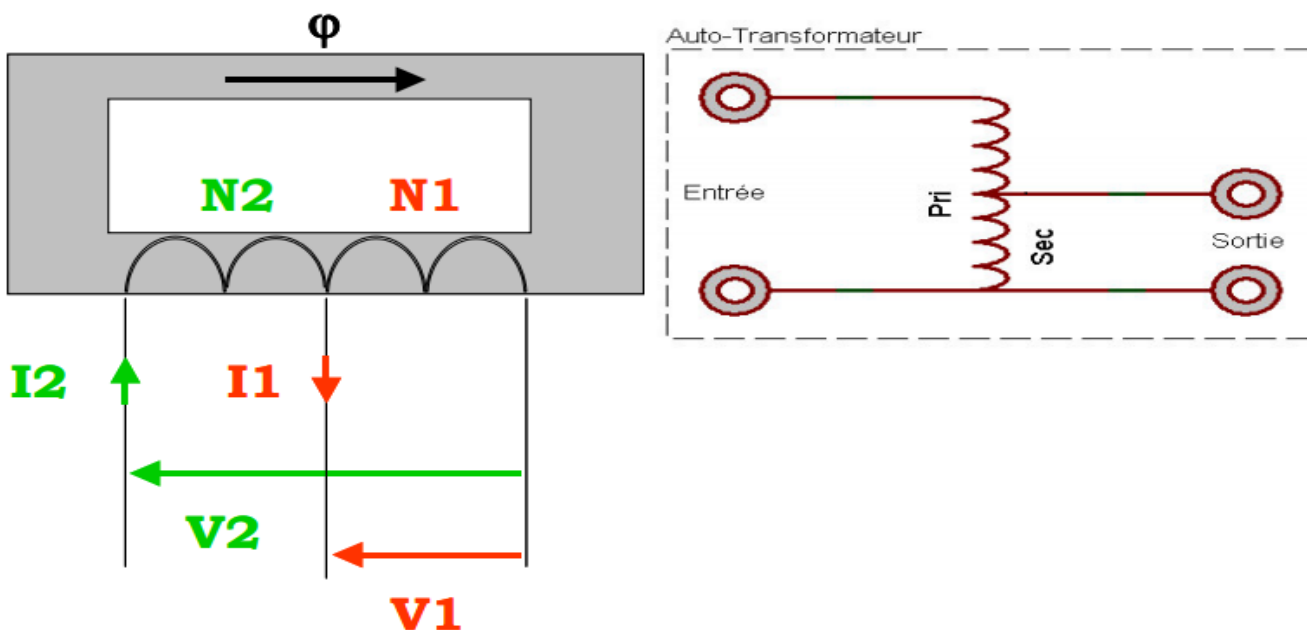


Figure (I.15) : Schéma équivalent d'un autotransformateur.

I.9-Défauts dans les transformateurs [17] :

Les défauts dans les transformateurs sont de quatre types : les surcharges, les courts-circuits, les défauts à la masse et les surfluxages.

Nous passerons rapidement en revue dans cette analyse, les défauts que l'on rencontre couramment sur les transformateurs, leurs causes, leurs conséquences.

Dans le premier cas, l'intensité traversant le transformateur devient trop grande, ce qui conduit à une augmentation de la température interne du transformateur ce qui est nuisible à la durée de vie.

Les courts-circuits sont eux de deux types : interne et externe. Les premiers sont dus à des arcs entre les enroulements, ils entraînent une dégradation rapide de l'huile et la formation de gaz qui peuvent mener à des incendies ou à l'explosion du transformateur. Les seconds entraînent principalement une forte contrainte mécanique sur les enroulements et peuvent s'ils sont prolongés mener à un court-circuit interne.

Les défauts à la masse sont comparables aux courts-circuits internes avec une connexion entre le bobinage et le noyau ou la cuve.

Un autre défaut à éliminer est le surfluxage, c'est-à-dire une hausse du flux magnétique dans le noyau de fer du transformateur. Il est causé soit par une surtension, soit par une baisse de la tension.

Les décharges partielles sont des décharges disruptives localisées d'une petite partie d'un système d'isolement électrique solide ou liquide sous l'effet d'une forte contrainte de tension.

Les décharges partielles peuvent être provoquées par :

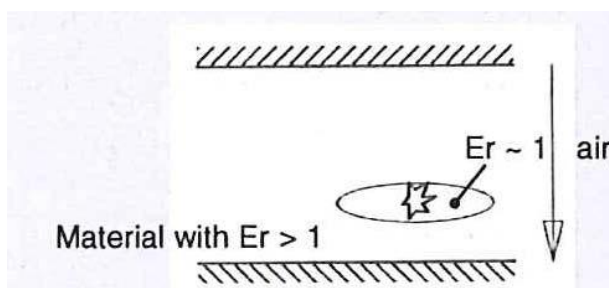
- Une cavité non imprégnée d'huile.
- Une contamination (particule métallique).
- Une conception non optimale (choix du matériau, de sa disposition,...).
- Un dommage mécanique (guipage mou, déformation d'une cornière,...).
- Une mauvaise réalisation (arêtes, effet de pointe, traitement insuffisant,...).

Le champ électrique dans la cavité est 2 à 5 fois supérieur à celui dans le matériau il se produit un micro-claquage dans la cavité.

Cette décharge peut :

- S'éteindre si les parois de la cavité se charbonnent et si le matériau est sain.

Se développer en détruisant le matériau ce qui affaiblit sa tenue diélectrique et peut conduire à un claquage.



Figure(I.16) : décharges partielles.

Dans tous les cas, si un défaut est détecté, il convient de déconnecter au plus vite le transformateur. Concrètement un relais envoie un ordre d'ouverture (de déclenchement) au disjoncteur relié au transformateur.

I.10-Protection de transformateur [18] :

Pour la protection contre les surcharges, des protections à maximum de courant de phase temporisées ou des protections à image thermique sont utilisées. Un capteur de débit d'huile permet de s'assurer de la bonne circulation de l'huile dans le circuit de refroidissement.

Pour les courts-circuits, des relais Buchholz sont utilisés dans le cas des transformateurs respirants. Pour les transformateurs hermétiques, des détecteurs de gaz et de pression sont utilisés. Par ailleurs une protection différentielle mesure, par l'intermédiaire des transformateurs de courant comme toutes les protections liées au courant, la différence entre les courants entrants dans le transformateur et ceux en sortant et protège le transformateur contre les courts-circuits entre phases. Ces protections peuvent être également capables de détecter les défauts

entre spires. Par ailleurs, une protection à maximum de courant de phase instantanée protège des courts-circuits violents au primaire. Pour éviter un déclenchement abusif lors de la connexion du transformateur à cause des courants d'enclenchement, un système mesurant en général la 2^e harmonique, caractéristique de la saturation du noyau magnétique, « bloque » (empêche le déclenchement) les protections différentielles et de maximum de courant.

Pour les défauts de masse, la première solution est de mesurer le courant homopolaire. Une autre solution, dite protection de terre restreinte, compare le courant dans la connexion au neutre et la somme des courants dans les phases. On peut la ranger avec les protections différentielles. On peut également isoler la cuve du transformateur de la masse, et mesurer le courant dans la connexion reliant la cuve et la masse : on parle alors de protection masse-cuve. Si ce courant devient trop important, le transformateur déclenche, cette protection est donc fondamentalement une protection à maximum de courant.

Pour détecter le surfluxage, la mesure de la 5^e harmonique du courant est en général utilisée. Le flux est directement proportionnel au rapport tension sur fréquence, si le phénomène devient trop fort, il faut déconnecter le transformateur. De manière similaire une protection contre les surtensions, les sous-tensions ou les sous fréquences peuvent être utilisées.

Pour la détection des décharges partielles plusieurs méthodes qui ont été communément connues pour la mesure sont : méthode de détection optique, méthode de détection acoustique, méthode de détection électrique.

I.11-Techniques de diagnostic des transformateurs [19] :

Les quatre grandes familles de diagnostics avec leurs abréviations usuelles sont les suivantes : l'analyse des gaz dissous (DGA), l'analyse fréquentielle (FRA), la mesure des décharges partielles (DP) et méthodes impliquant des mécanismes de polarisation/relaxation (PDC). Elles ont chacune des fonctions distinctes et complémentaires.

L'analyse des gaz dissous, sous-entendu dans l'huile, est une méthode qui permet à partir de l'évaluation des proportions des différents gaz dissous dans l'huile de détecter la présence : de décharges partielles, de décharges électriques ou de surchauffes dans le transformateur. Elle est réalisée par prélèvements ponctuels d'huile sur les transformateurs, ou par un système de surveillance en ligne qui réalise alors l'analyse de manière régulière.

L'analyse furanique qu'on peut y associer consiste à rechercher dans l'huile la présence de furane, témoignant d'une dégradation de l'isolation et tout particulièrement du degré de

polymérisation de la cellulose, une valeur en dessous de 150 est considérée comme critique pour le transformateur.

L'analyse fréquentielle consiste à déterminer la réponse fréquentielle du transformateur sur une plage de fréquences allant de 1 kHz, à cause de la non-linéarité du noyau magnétique, jusqu'à 1 MHz, à cause du bruit environnant. Pour définir l'ensemble du spectre, les méthodes par balayage ou par impulsions peuvent être utilisées. La seconde utilise par la suite une transformation de Fourier rapide. Elle a l'avantage d'être plus rapide, mais est moins précise que la méthode par balayage. L'analyse des fonctions de transfert des différentes phases s'effectue en les comparant entre elles et/ou à une mesure antérieure permet de détecter la présence de défauts mécaniques dans les enroulements, à savoir : une déformation mécanique ou un défaut d'isolation entre deux spires.

La mesure des décharges partielles permet de détecter des défauts dans l'isolation et de les localiser.

Les méthodes mettant en jeu les courants de polarisation et de dépolarisation consistent à polariser puis à dépolariser l'isolation afin d'en déduire son humidité. En effet, cette dernière influe sur les constantes de temps de charge et de décharge dans le cas où on assimile les phénomènes de polarisation à des charges et des décharges d'un condensateur (circuit RC).

I.12-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les transformateurs de puissance, nous avons aussi donné un aperçu sur les principaux éléments qui les constituent, leur rôle et leur importance dans cette machine statique. A la fin de ce chapitre, les différents défauts et modes de protection du transformateur ont été introduits pour mieux cerner son fonctionnement.

Le prochain chapitre sera consacré au l'un des défauts ; les décharges partielles, généralités et leur influence sur les transformateur de puissance.

II.1-Introduction :

L'apparition de décharge partielle est un problème pour la défaillance de l'isolation de l'enroulement du transformateur de puissance utilisé dans une centrale électrique. On voit que la plupart des enroulements du transformateur sont fabriqués avec veiller à ce qu'aucune impureté ne soit ajoutée dans l'isolant d'enroulement, mais une petite quantité de l'impureté est toujours présente pendant le processus de fabrication. Les impuretés sont sous la forme de solide, liquide ou gazeux.

Pendant le processus de fabrication d'un tel isolant d'enroulement l'impureté est présente sous la forme d'une bulle d'air qui crée une zone faible à l'intérieur de l'enroulement. La plupart défaillance d'une telle isolation se produit en raison de la présence de DP dans les zones faibles à haute tension contrainte dans l'enroulement du transformateur. Par conséquent, la détection et la mesure de ces décharges sont une tâche très importante pour éviter la défaillance catastrophique du transformateur de puissance ainsi qu'un fonctionnement fiable du transformateur pendant toute sa période de service.

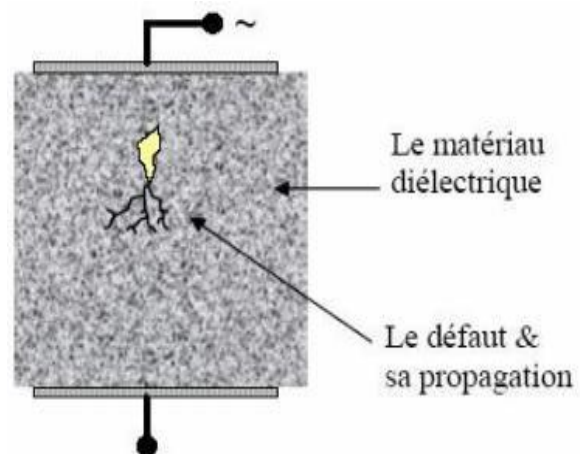
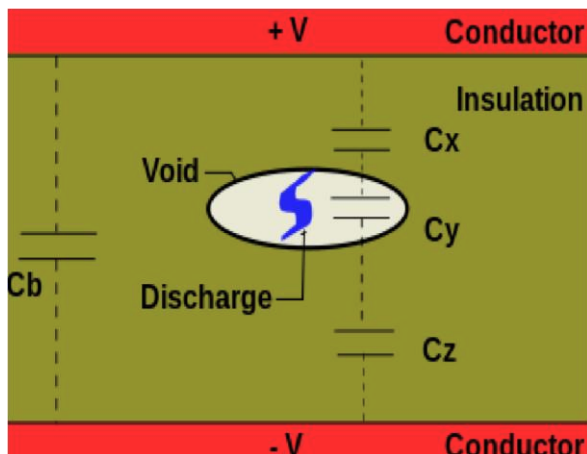
II.2-Généralités :

Les décharges partielles sont en général un résultat de la concentration des contraintes électriques locales dans l'isolation ou sur la surface d'isolation. DP dans un matériau isolant est habituellement initié dans les vides remplis de gaz dans le diélectrique. Puisque la constante diélectrique du vide est considérablement inférieure à diélectrique environnante, le champ électrique à travers le vide est significativement plus élevé que celui à une distance équivalente du diélectrique [20]. Si la contrainte de tension à travers le vide est augmentée au-dessus de la tension de démarrage de la couronne pour le gaz dans le vide, l'activité DP commencera dans le lorsque DP est présent dans les gaz, il est appelé comme une décharge corona. Il y a quelques similitudes entre la couronne et DP. Ils sont tous deux précurseurs de la panne totale, ils ont lieu où le gradient de tension est plus élevé et le courant de décharge est très faible par rapport à la finale courant de rupture [21]. Les différences sont également là, décharge Corona a lieu dans le l'air environnant et il ne cause aucun dommage permanent. Lorsque la tension est supprimée, l'air redevient normal. DP provoque des dommages permanents. La décharge Corona est visible et audible mais DP n'est pas. DP peut se produire dans les deux alimentations AC et DC. Il est différent de complètement décharge à cause de cet équipement n'est pas définitivement dommage. DP est partiellement dommage, il est juste un début de défaillance

dans les équipements à haute tension, et par conséquent, il est appelé DP. En général la durée de l'impulsion DP est beaucoup moins de $1\mu s$. L'activité DP est généralement observée en haute tension équipements de puissance de tension comme des transformateurs de puissance, des machines, des appareillages de commutation, souterrains câbles, etc. [22].

II.3-Définition :

La norme IEC 60270 de la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) a défini décharge comme une décharge électrique localisée qui ne fait que partiellement passer l'isolation entre conducteurs et qui peuvent ou ne peuvent pas se produire à proximité d'un conducteur. Les décharges partielles sont en général une conséquence de la concentration des contraintes électriques locales de l'isolant ou sur la surface de l'isolation. Généralement, ces décharges apparaissent comme des impulsions ayant une durée très inférieure à $1\mu s$ ". Le phénomène de la décharge partielle, en général, est observée en haute tension sur l'équipement d'alimentation comme les transformateurs, les bagues et bien d'autres [20].



Figure(II.1) : Une décharge partielle dans l'isolation solide.

Figure(II.2) : Une décharge partielle dans un diélectrique.

II.4-Classification de la décharge partielle :

La classification des décharges partielles varie suivant le critère de sélection utilisé ; la décharge partielle est principalement divisée en deux parties :

II.4.1-Décharge partielle externe :

La décharge partielle externe a lieu à l'extérieur des équipements de puissance. Ces types des décharges se produisent dans les lignes aériennes et l'armature etc.

II.4.2-Décharge partielle interne :

Ces décharges apparaissent à l'intérieur des équipements de puissance, aux endroits où la rigidité diélectrique est faible, par exemple dans une cavité dans un solide ou une bulle dans un liquide.

Les décharges partielles peuvent provenir directement de l'une des électrodes ou se produire dans une cavité dans le diélectrique certains décharges partielles typiques sont [23, 24] :

II.4.3-Décharge Corona :

Elles se manifestent au niveau des pointes où le champ électrique est renforcé. La décharge est restreinte à une zone très réduite entourant la pointe. Cet effet apparaît lorsque la valeur la plus élevée du champ électrique atteint celle du champ disruptif du gaz (air) entourant le conducteur. Il se manifeste sur toute la gamme de fréquence de la tension. Ce type de décharge apparaît pendant une longue durée autour d'un conducteur nu.

II.4.4-Décharge de surface :

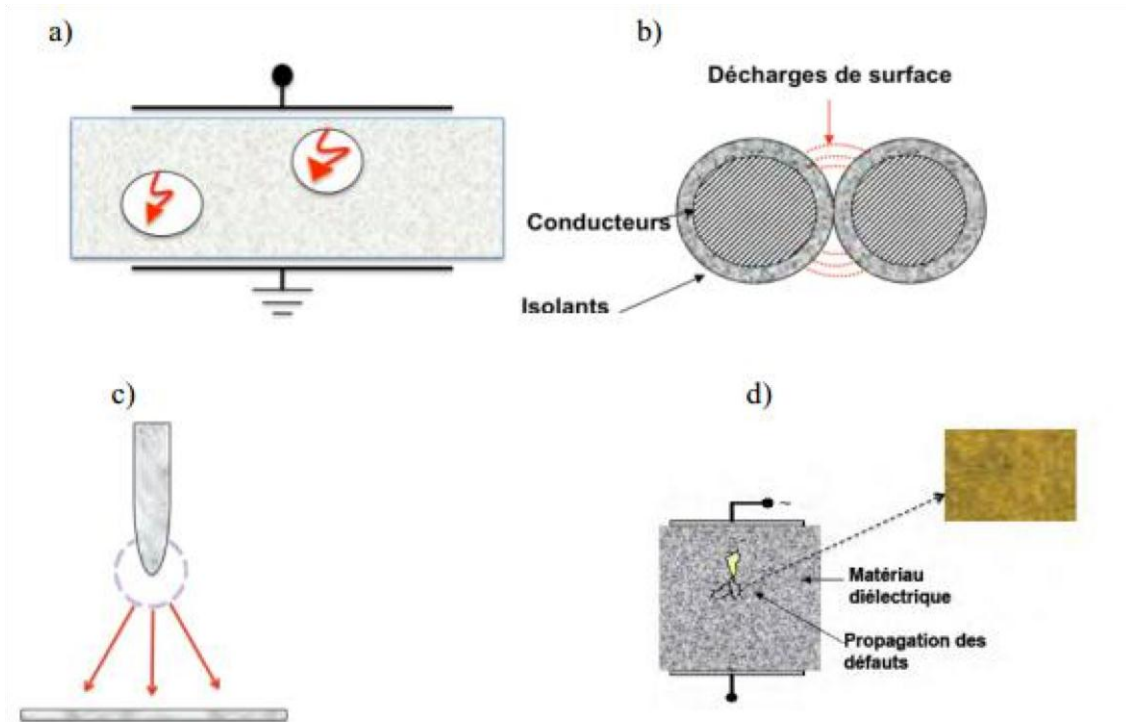
Elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe sur la surface d'un diélectrique.

II.4.5- Décharges en arborescence :

Les champs de forte intensité sont produits dans un matériau isolant à ses bornes pointes et ils détériorent le matériau isolant. Cela est responsable de production de DP continue, appelée canal d'arborescence.

II.4.6- Décharge de cavité :

Les cavités sont généralement formées dans des matériaux isolants solide ou liquide. La cavité est généralement remplie de gaz ou d'air. Lorsque le gaz dans la cavité est terminé, ces décharges se produisent.



Figure(II.3) : Différents types de décharges : a) interne, b) surface, c) couronne et d) en arborescence.

II.5-Mécanisme de décharge :

La décharge partielle commence habituellement à l'intérieur des vides, des fissures ou des inclusions dans un diélectrique solide, à des interfaces conducteur-diélectrique dans des diélectriques solides ou liquides, ou dans des bulles à l'intérieur des diélectriques liquides.

Puisque les DP sont limités à seulement une partie de l'isolation, les décharges ne font que partiellement combler la distance entre les électrodes. DP peut également se produire le long de la frontière entre différents matériaux isolants.

Les décharges partielles à l'intérieur d'un matériau isolant sont habituellement initiées dans des vides remplis de gaz à l'intérieur du diélectrique. Parce que la constante diélectrique du vide est considérablement inférieure à celle du diélectrique environnant, le champ électrique à travers le vide est significativement plus élevé que sur une distance équivalente du diélectrique. Si la tension de tension à travers le vide est augmentée au-dessus de la tension de création de couronne (CIV) pour le gaz à l'intérieur du vide, alors l'activité DP commencera dans le vide.

La décharge partielle peut également se produire le long de la surface de matériaux isolants solides si le champ électrique tangentiel de surface est suffisamment élevé pour

provoquer une rupture le long de la surface de l'isolant. Ce phénomène se manifeste généralement sur les isolateurs de ligne aérienne, en particulier sur les isolants contaminés pendant les jours de forte humidité. Les isolateurs de lignes aériennes utilisent l'air comme moyen d'isolation [25].

II.6-Causes de la décharge partielle [26] :

Une décharge partielle peut être provoquée par différentes sources :

II.6.1- DP causé par des vides :

Les occurrences partielles de décharge dans un matériau isolant sont toujours déclenchées à l'intérieur des vides remplis de gaz dans le diélectrique. Parce que le diélectrique environnant a permittivité supérieure au vide, le champ électrique à travers les distances diélectriques est moins que le champ électrique à travers le vide. Si la contrainte électrique à travers ce vide augmente au-delà du champ de création de la couronne pour le gaz dans le vide, une décharge partielle l'occurrence dans le vide est initiée.

L'apparition de DP pourrait également être le long de la surface des isolants solides. Cela arrive si le champ électrique de surface devient élevé dans la mesure où il peut provoquer une panne sur la surface de l'isolateur. Ceci est généralement observé sur les isolateurs de lignes aériennes, en particulier les moments où l'humidité est très élevée qui cause l'isolation contamination.

II.6.2- Surfaces irrégulières sur le matériau isolant :

Les points et les bords pointus provoquent généralement une concentration de l'intensité du champ électrique et si un matériau isolant arrive à avoir de telles irrégularités, cela provoquera une augmentation de champ électrique à ces points non-homogènes. Cela peut conduire à une décharge partielle si elle dépasse la résistance à la traction du matériau isolant qui pourrait être abouti finalement à une panne totale.

II.6.3-Bulles dans l'isolation liquide :

Les bulles peuvent déclencher un champ électrique élevé dans une isolation liquide et provoquer ainsi une décharge partielle. Par exemple dans l'huile de transformateur, telle prolongée et incessante décharge partielle pourrait conduire à la rupture finale du vide.

II.6.4- décharges coronales :

Les décharges coronales se produisent à la suite de l'ionisation du fluide entourant un conducteur électrique sous tension. La décharge apparaît dans une lueur bleue autour des bords extrêmes d'un conducteur porteur de haute tension.

II.6.5- L'inefficacité de la fabrication :

Le matériau d'isolation peut subir des dommages ou des défauts avec le temps en raison du vieillissement ou une tierce partie. Cela pourrait entraîner une décharge partielle. Également au cours du processus de fabrication en raison de l'inefficacité ou des erreurs, il pourrait présenter de bulles d'air ou de gaz dans le matériau isolant, qui est l'une des raisons de l'imperfection dans le matériau d'isolation. Cette imperfection due à la présence de la bulle (gazeuse ou aérienne) peut prendre plusieurs formes géométriques. Par exemple, il pourrait s'agir de formes rectangulaires, de formes sphériques, de formes cylindriques, etc. Indépendamment de la forme de l'événement, ce défaut de fabrication sert d'impureté dans le matériau isolant et à son tour crée une faiblesse dans les matériaux isolants ; cette faiblesse est l'une des principales raisons de la haute tension occurrences de DP dans l'équipement. La décharge partielle est initiée lorsque le champ électrique l'intensité dépasse la force de rupture du gaz situé dans le vide. Des conditions telles que l'humidité, la pression et la température pourraient également déclencher une DP

II.7-Effets de la décharge partielle :

Les activités de DP entraînent une détérioration de la matière isolante, qui peut éventuellement provoquer une panne électrique.

Le danger peut provenir du fait que si la tension est augmentée, la décharge peut franchir l'espace la séparant de la terre et donc se transformer en claquage.

De manière générale, les décharges partielles se manifestent des façons suivantes :

- Impulsion de courant
- Perte diélectrique
- Radiation (lumière)
- Bruit
- Augmentation de la pression du gaz
- Réaction chimique

Les matériaux solides, à la différence des matériaux liquides, ne se régénèrent en général pas après une décharge, elles vont donc progressivement détériorer l'isolant par érosion, d'abord à la surface de la cavité, puis plus en profondeur, pouvant conduire finalement à un claquage aux bornes du diélectrique et à la destruction de l'installation. Dans les liquides c'est le phénomène d'oxydation qui est prépondérant. Dans le liquide isolant le plus courant : l'huile pour transformateur, les décharges partielles conduisent à la formation de dihydrogène. La présence de décharges partielles réduit ainsi drastiquement la durée de vie d'un appareil électrique [27].

II.8-Effet de DP dans l'enroulement de transformateur :

La DP est la principale raison de la dégradation du matériau isolant et responsable de la dégradation de l'isolation de l'enroulement. L'occurrence du taux de redoublement de décharge est la raison de dégradation mécanique et chimique de l'enroulement du transformateur. La propriété de conductivité du matériau isolant augmente en raison du changement chimique dans le diélectrique. La DP génère de l'énergie sous forme de chaleur. L'énergie thermique est la principale raison de la dégradation de l'isolation, cet effet est appelé effet thermique pour transformateur de puissance haute tension. La détérioration de l'isolation de peut être connue en surveillant l'activité DP et il devrait être surveillé de temps en temps par l'ingénieur de puissance.

La DP peut généralement être évité grâce à une conception soignée et la sélection des matériaux. Dans un équipement à haute tension critique, l'intégrité de l'isolant est confirmée au moyen d'un équipement de détection de DP pendant la phase de fabrication ainsi que périodiquement pendant la durée de vie de l'équipement. La prévention et la détection DP est essentielle pour assurer un fonctionnement fiable et à long terme des équipements haute tension utilisés par les compagnies d'électricité [28].

II.9-Nécessité de la détection de la décharge partielle en transformateur :

Le processus de fabrication de la structure d'isolation des enroulements de transformateur implique plusieurs étapes à partir de la sélection et la préparation de la matière première, ou traitement de la matière première, du traitement thermique ou chimique si nécessaire etc.

L'ensemble du processus de fourniture d'isolation électrique dans un enroulement implique l'homme, le matériel, les machines et les différentes conditions environnementales.

Il est donc très difficile de réaliser une isolation électrique parfaite sans défauts car ils peuvent être contaminés pendant le processus de fabrication.

L'influence des contraintes thermiques, électriques, mécaniques et environnementales environnantes peut également provoquer des défauts d'isolation électrique pendant son fonctionnement. Donc, une certaine impureté est due à la présence des bulles d'air dans l'enroulement. Cela diminue la zone d'isolation est responsable de l'apparition de DP. Le constant diélectrique du vide est inférieur à celle de l'isolant, ce qui provoque une défaillance d'isolation dans l'enroulement du transformateur de puissance.

Pour cette raison la détection de la DP et sa mesure est nécessaire pour prédire la durée de vie de l'isolation de l'enroulement du transformateur de puissance [28].

II.10-Le modèle d'une décharge partielle :

Le comportement des décharges partielles dans un isolant solide est décrit par un circuit bien connu. L'ensemble isolant-défaut peut être modélisé par deux branches en parallèle. Le défaut est représenté par une capacité C_c en parallèle avec un éclateur. L'éclateur est caractérisé par la tension de rupture du gaz occlus dans la cavité. La résistance R_c permet de modéliser le processus transitoire de formation des charges d'espace. Les deux colonnes de diélectrique entre le défaut et les électrodes sont représentées par un réseau (C_b, R_b). La partie saine d'isolant en parallèle avec le défaut est représentée par le réseau (C_a, R_a) [29].

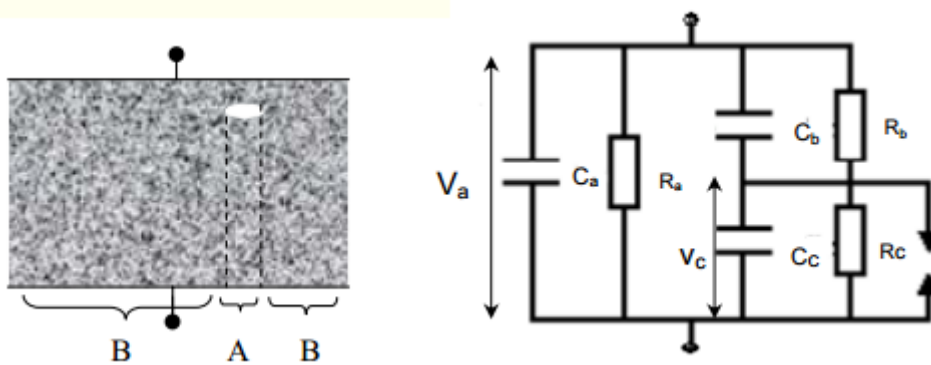


Figure (II.4) : Représentation schématique et représentation équivalente d'une décharge dans un isolant solide.

La capacité C_a est calculée par l'expression donnée dans l'équation (1) :

$$C_a = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \tag{II.1}$$

Où :

$-\varepsilon_0$: permittivité de l'espace libre (= 8.854×10^{-12} F / m).

$-\varepsilon_r$: permittivité de l'isolant solide matériau.

$-A$: zone entre les électrodes.

$-d$: distance entre les électrodes.

La permittivité relative du gaz est 1, donc la capacitance du vide est donnée par l'équation (2)

et la capacité de l'isolation en série avec C_c en utilisant l'équation (3) :

$$C_c = \frac{\varepsilon_0 A}{t} \quad (\text{II.2})$$

$$C_b = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d - t} \quad (\text{II.3})$$

Où :

$-t$: épaisseur du vide.

La tension à travers la cavité peut être exprimée par l'équation (4) :

$$V_a = \frac{C_b}{C_c + C_b} V_a \quad (\text{II.4})$$

Où :

$-V_a$: tension à travers la capacité C_a .

La substitution de (2) et (3) dans (4) donne l'équation (5) :

$$V_c = \frac{V_a}{1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \left(\frac{d}{t} - 1 \right)} \quad (\text{II.5})$$

La charge apparente d'une décharge est donnée par l'équation (6) :

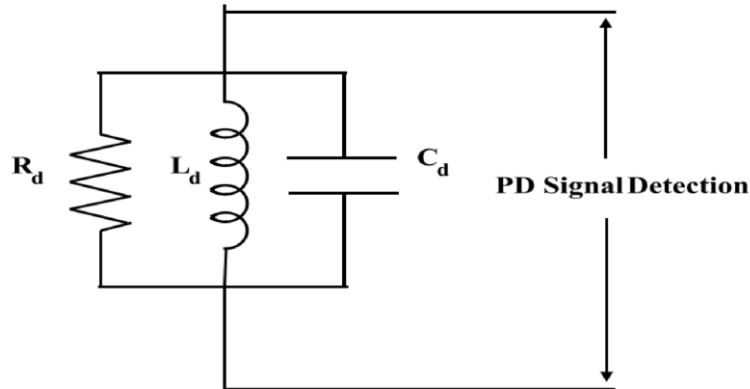
$$q_a = C_b \Delta V_c \quad (\text{II.6})$$

Où :

ΔV : est la tension à travers le vide.

II.11-Circuit de détection de signal de DP en enroulement isolation :

Comme le vide est créé à l'intérieur de l'enroulement du transformateur, un circuit de détection est fixé à l'extérieur l'enroulement en série avec le vide utilisé pour mesurer le signal DP. L'impédance de détection peut soit un type résistif-capacitif (RC) ou résistif-capacitif-inductif (RCL). Le RC type donne une sortie unidirectionnelle-impulsion, tandis que la sortie pour le type RLC est un amortissement oscillation [30].



Figure(II.5) : circuit de détection de signal DP de type RLC.

II.12-Techniques de détection et de mesure des décharges partielles [30] :

Le phénomène de DP peut être limité lors de la fabrication de l'équipement par sa conception et par la qualité des matériaux utilisés. L'absence de décharges partielles peut être vérifiée par des méthodes de détection, aussi bien pendant la fabrication que pendant la durée de vie de l'installation. La prévention des décharges partielles constitue donc un enjeu capital pour les industries électriques en vue d'assurer un service de qualité sur le long terme. L'objectif de la détection des décharges partielles est de déceler d'éventuels défauts dans un appareil afin d'évaluer sa durée de vie.

Les méthodes qui ont été communément connues pour la mesure des DP est :

- ✓ Méthode de détection optique.
- ✓ Méthode de détection acoustique.
- ✓ Méthode de détection électrique.

La principale technique est celle qui consiste à mesurer le courant ou la charge d'une décharge partielle : c'est la méthode électrique.

II.12.1-Méthode de détection optique :

Cette méthode de détection n'est applicable que pour les décharges près de la surface ou les décharges couronne. La lumière émise due à la décharge se situe généralement dans le domaine UV-visible. Si le milieu est transparent, la localisation de décharges est possible à l'aide d'une caméra ultra-sensible. Dans certains cas, l'intensité de la lumière émise mesurée avec un photomultiplicateur est proportionnelle à l'amplitude de la décharge.

II.12.2-Méthode de détection acoustique :

Les DP dans l'air, comme la décharge de surface et la décharge couronne produisent souvent des ondes acoustiques (sonores et ultrasonores) perceptibles au voisinage de l'endroit où il y a la décharge. La méthode acoustique consiste à mesurer les émissions acoustiques des décharges partielles par voie aérienne ou par voie solide dans le domaine ultrasonore. Cette méthode a l'avantage d'éviter la mise hors tension du transformateur, et d'être non intrusive.

La limitation de cette méthode de détection est la nature de la propagation de l'onde acoustique compliquée en raison de l'utilisation d'un dispositif non homogène comme un transformateur de puissance.

II.12.3-Méthode de détection électrique :

La détection des décharges partielles par mesure électrique repose sur la mesure de la charge apparente. La charge apparente d'une décharge partielle est la charge qui, si elle était injectée instantanément entre les bornes de l'objet en essais, changerait momentanément la tension entre ses bornes de la même quantité que la décharge elle-même. La valeur absolue de la charge apparente peut être appelée amplitude de décharge.

Cette méthode consiste à mesurer une charge globale qui circule dans le circuit et qui est due aux décharges partielles. Cela nécessite le branchement d'un appareil de mesure sur le circuit électrique du transformateur sous test. Cette intervention nécessite également la mise hors tension de ce dernier. Ces mesures sont très délicates et doivent se faire en laboratoire. Cependant, c'est la seule méthode connue qui donne un diagnostic sûr et précis.

II.13- Analyse de la réponse en fréquence (FRA) :

II.13.1-Généralités :

Depuis l'introduction de la norme CEI 60076-18, cette méthode est devenue l'un des tests électriques les plus courants et son adoption par le marché a augmenté en conséquence. L'analyse de la réponse en fréquence (souvent appelée technique FRA ou SFRA) est une méthode efficace et sensible pour tester l'intégrité mécanique des circuits magnétiques, des enroulements et des supports à l'intérieur des transformateurs de puissance.

Chaque réseau électrique possède sa propre réponse en fréquence, appelée "empreinte". La présence de défauts ou de vibrations sur le réseau peut provoquer des variations de cette réponse en fréquence.

S'il y a des changements mécaniques dans le transformateur, par exemple si les enroulements sont déplacés ou déformés, son empreinte sera également modifiée, donc, théoriquement, des changements mécaniques dans le transformateur peuvent être détectés avec FRA. Un problème avec FRA est le fait qu'il n'y a pas accord général sur la façon d'interpréter les résultats de mesure pour la détection de l'enroulement défectueux. Par exemple, l'interprétation des résultats de mesure n'a toujours pas été standardisée.

Le premier travail technique décrivant la possibilité d'utiliser la technique FRA pour le diagnostic des défauts mécaniques à l'intérieur des transformateurs de puissance a été publié par Dick et Erven en 1978 [31].

II.13.2-Principe de fonctionnement [32] :

La réponse en fréquence est généralement caractérisée par l'amplitude de la réponse du système, mesurée en décibels, et la phase, mesurée en degrés (ou en radians) en fonction de la fréquence.

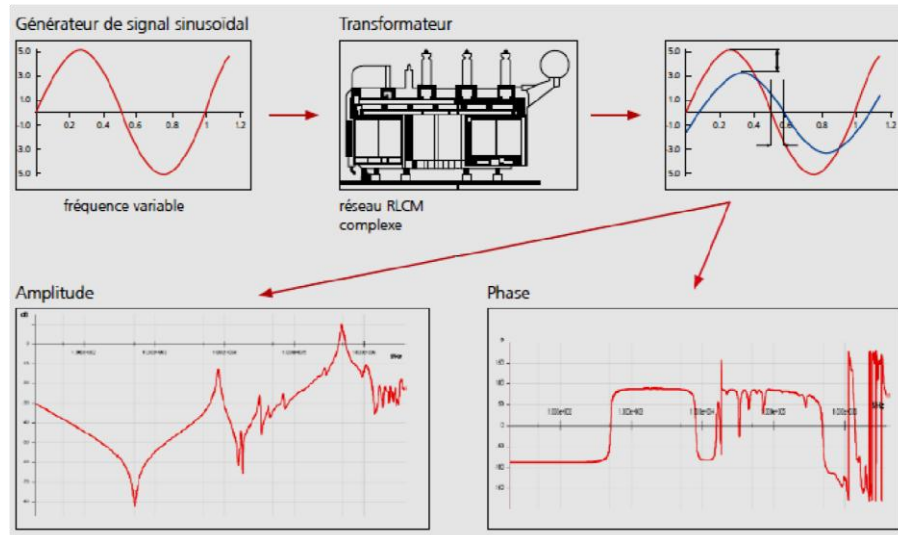
La gamme de fréquence pour FRA est généralement de 10 Hz jusqu'à 2 MHz et l'évaluation est basée sur le fait que la réponse en fréquence d'un transformateur est définie par sa capacité et les distributions d'inductance, qui sont déterminées par la construction géométrique du transformateur et caractéristiques des matériaux utilisés.

Par conséquent, les déformations mécaniques changent les paramètres capacitifs et inductifs, donnant des écarts dans le spectre FRA. Ça signifie que FRA est fondamentalement une méthode comparative, dans laquelle une mesure d'empreinte digitale prise à un stade antérieur est comparée à une mesure prise ultérieurement, peut-être après une réinstallation lors d'une opération de maintenance. Ensuite, les changements dans les caractéristiques de la réponse sont analysés pour détecter les changements mécaniques à l'intérieur du transformateur.

Le principe est d'injecter une tension d'excitation sinusoïdale, dont la fréquence augmente en continu, à une extrémité de l'enroulement du transformateur, puis mesurer le signal provenant de l'autre extrémité. Grâce à une mesure directe dans le domaine fréquentiel, aucun traitement des données supplémentaires n'est requis.

La comparaison des signaux d'entrée et de sortie génère une réponse en fréquence unique qui peut être comparée aux données de référence. Ainsi, les écarts peuvent indiquer des changements au niveau des composants internes. Ces écarts peuvent être directement liés aux différentes sections de la plage de fréquences et l'on peut généralement les distinguer les uns des autres.

Les changements, le déplacement ou la déformation des composants internes entraînent des changements dans cette fonction de transfert. Une comparaison des graphiques permet de les identifier.



Figure(II.6) : Principe de la FRA

II.13.3-Les méthodes d'analyse de la réponse en fréquence [31] :

La réponse en fréquence peut être mesurée directement en balayant la fréquence (balayage méthode de fréquence) ou être estimée à partir de mesures de réponse impulsionnelle.

II.13.3.1-Impulsion :

Dans la méthode de réponse impulsionnelle, une tension d'impulsion ayant une fréquence suffisante est appliquée à l'objet de test et à la fois la tension appliquée et une certaine tension de réponse résultant ou le courant est mesuré simultanément. Cette méthode est basée sur la définition du transfert fonction qui dit que la fonction de transfert ne dépend pas du signal appliqué lorsque le système est linéaire et invariant dans le temps. Alors les deux signaux mesurés sont numériquement transformé dans le domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). Le rapport entre la FFT du signal de réponse et le signal appliqué est la réponse en fréquence de la fonction de transfert correspondante. Cette méthode a été utilisée par de nombreux chercheurs pour diagnostiquer les défauts mécaniques en puissance transformateurs.

Limitation de la source d'excitation qui peut produire suffisamment d'énergie dans la bande d'intérêt entière, niveau d'énergie réduit de l'impulsion injectée à un niveau plus élevé

fréquences limitant la limite supérieure de la réponse en fréquence calculée, et la nécessité de bonnes techniques de prévention du bruit sont certains des inconvénients de la réponse impulsionnelle méthode.

II.13.3.2-Balayage :

Dans cette méthode, une tension d'excitation sinusoïdale est appliquée et l'amplitude et la phase de la tension ou le courant de réponse sont mesurés à différentes fréquences. Cela signifie que c'est une méthode directe pour déterminer la réponse en fréquence, puisque le résultat final est déjà disponible après avoir balayé la plage de fréquences prédéfinie. C'est la méthode qui a été utilisée dans cette thèse.

Les deux méthodes ont avantages et inconvénients. Par exemple, la méthode de réponse impulsionnelle nécessite moins mesure du temps, mais il est très sensible au bruit. D'autre part, la méthode de balayage de fréquence prend un peu plus de temps pour les mesures, mais il n'est pas si sensible au bruit.

II.13.4- Détection de défaut par FRA [17] :

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

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

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

Cependant, La mesure par FRA est souvent la seule méthode qui peut détecter les mouvements axiaux d'enroulements.

Elle détecte également les mouvements radiaux, qui peuvent être aussi vérifiés par les essais de réactance de fuite. Il est utile de mettre en corrélation les deux méthodes pour

augmenter la précision du résultat. Cela est également vrai pour les autres défauts, notamment mécanique.

II.13.5- Objectifs des mesures par FRA :

Les défauts dans les enroulements peuvent provenir des forces électromagnétiques très importantes, ces forces provoquent une détérioration complète du transformateur. Le principal intérêt des mesures de la technique FRA sur les transformateurs est de remédier à ces types de problèmes. L'intérêt préventif porte sur la détection avant l'apparition des pannes dans un cadre d'inspection programmée qui nous permettront d'apprécier la fiabilité escomptée des transformateurs [17].

II.14-Conclusion :

La principale motivation de ce chapitre est de comprendre le processus physique en ce qui concerne le mécanisme de décharge partielle et améliorer les modèles des DP existants afin de reproduire et estimer les transitoires générés, parcourus et atténués par la DP le long du transformateur de puissance. Pour cette raison, la physique pertinente, les mathématiques et la théorie des circuits associés liés à la modélisation de la DP ont été utilisés.

Pour connaître l'activité de la DP à l'intérieur d'un isolant solide, un modèle sur MATLAB Simulink a été utilisé. La décharge partielle est le problème principal dans le système d'équipement de puissance à haute tension. Par conséquent, la découverte et la mesure de la décharge partielle est nécessaire pour maintenir les équipements de puissance en bon état pendant leur fonctionnement.

Un état de l'art sur la modélisation des transformateurs de puissance, afin de mettre en évidence les modèles existants dans la littérature, dans l'objectif de choisir le modèle le plus adéquat à notre étude fera l'objet du troisième chapitre.

III.1- Introduction :

Le transformateur de puissance comporte des bobines sous forme de galettes enroulées autour d'un noyau de fer et placées dans un liquide diélectrique. La tâche principale des constructeurs de ces transformateurs de puissance consiste à placer dans un volume le plus réduit possible des enroulements capables de supporter sans défaillance les surtensions dues aux ondes de chocs rapides ou aux oscillations internes entretenues. Ainsi un transformateur relié à un réseau très haute tension est soumis à différents types de tension dont la connaissance est importante pour établir les contraintes auxquelles sont soumis les diélectriques. D'où l'importance d'avoir un modèle qui simule le plus fidèlement possible le comportement du transformateur en régime transitoire.

Nous présentons dans ce chapitre les principaux modèles de transformateurs de puissance qui existent dans la littérature, dans le but de choisir le modèle le mieux adapté à notre étude et nous allons évoquer un aperçu général sur les études précédentes faites dans domaine de la modélisation des enroulements du transformateur en régime transitoire.

III.2 - Principaux modèles des transformateurs de puissance :

La précision des résultats et le coût de la modélisation sont liés au modèle choisi, ainsi qu'au degré de raffinement du schéma équivalent.

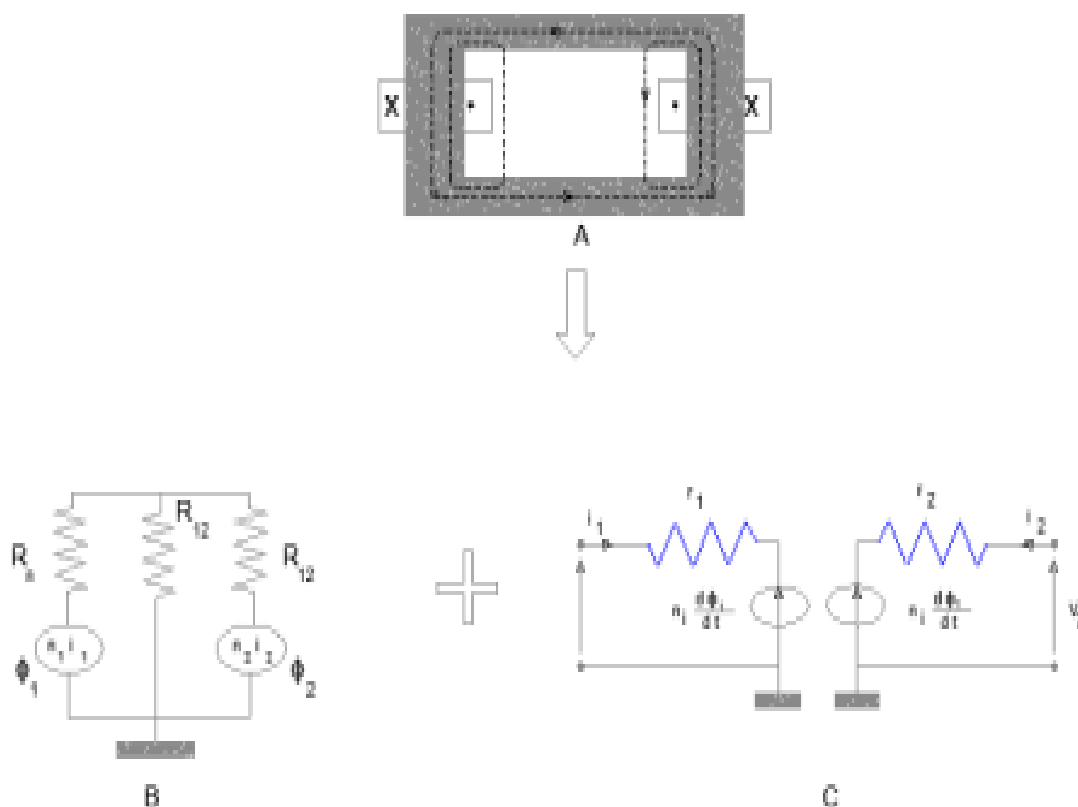
Ce chapitre décrit les différents types de modèles mathématiques existants dans la littérature.

III.2.1-Le modèle RESEL [32] :

RESEL est un code de calcul développé par des Ingénieurs d'Etude et de Recherche de l'Electricité de France (EDF), et a comme but principal d'étudier les phénomènes transitoires dans les réseaux électriques, en particulier dans les transformateurs, dans le domaine temporel. Son utilisation, pour modéliser un transformateur nécessite deux types de schémas, couplés entres eux :

- un schéma (Figure III.1b) qui traduit le comportement électrique du transformateur, composé de forces électromotrices : $n_1 \frac{d\phi_1}{dt}$ et $n_2 \frac{d\phi_2}{dt}$ et de plusieurs cellules RL : r_1 résistance du primaire, et r_2 résistance du secondaire (l'association de ces cellules dépend des techniques de bobinage du transformateurs),
- un schéma (Figure III.1c) qui traduit son comportement magnétique, composé d'un réseau de réluctances (R_{f1} et R_{f2} : réluctances de fuites, et R_{12} : réluctance principale) et de forces magnétomotrices ($n_1 i_1$ et $n_2 i_2$).

Le couplage entre ces deux schémas se fait de la manière suivante : les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique, et les sources du circuit magnétique liées aux courants dans les enroulements.



Figure(III.1): Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL

A) Coupe transversale d'un transformateur à 2 enroulements

B) Le circuit électrique correspondant

C) Le circuit magnétique correspondant

III.2.2-Le modèle universel EMTP [33] :

Le code de calcul universel EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) est utilisé pour étudier les comportements des réseaux électriques, en régime transitoire. Il est utilisé comme un standard dans les études temporelles et fréquentielles. L'utilisation de ce code de calcul, pour modéliser un transformateur consiste à représenter ce dernier par un schéma électrique équivalent, comprenant :

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

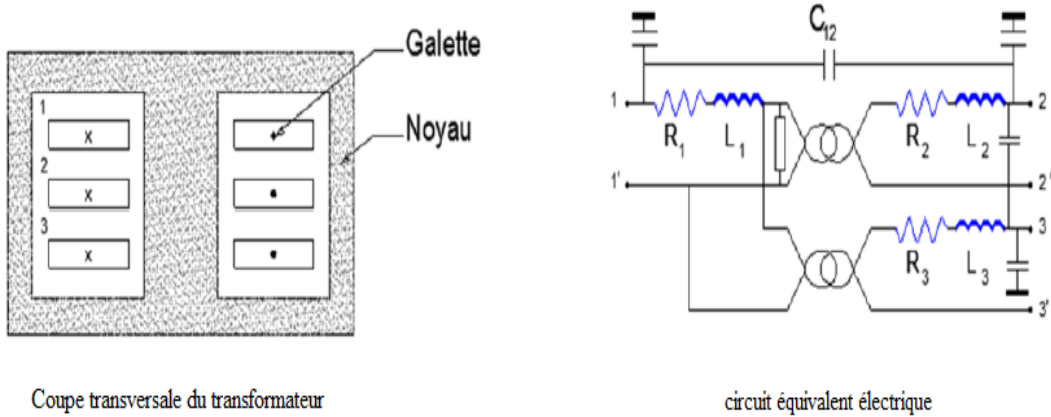


Figure (III.2) : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP

Les différents paramètres du schéma équivalent représenté sur la Figure (III.2) (R résistance de la galette 1,...) sont déterminés, soit par calcul numérique ou analytique, à partir de la géométrie du transformateur, et en faisant des hypothèses simplificatrices (symétrie, perméabilité du noyau magnétique constante,...), soit par mesure (essais à vide, essais en court-circuit,...).

III.2.3-Modèle de Leon [35] :

Dans leurs travaux, LEON et SEMLYEH, ont présenté le développement d'un modèle du transformateur de puissance en haute fréquence. Ce modèle permet de modéliser en détail les enroulements et le noyau. Pour les enroulements, les éléments suivants sont calculés :

- Une matrice d'inductances de fuite entre les paires de spires (ou sections/galettes).
- Une matrice de capacités entre spires (ou sections/galettes) et entre les spires et les masses.

Une matrice de résistance, qui dépend de la fréquence et qui tient compte de courants de Foucault.

Pour chaque colonne du circuit magnétique du transformateur, un système de trois matrices est calculé et puis transformé sous forme d'une équation d'état. Ensuite un circuit de Foster en série figure (III.3) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne.

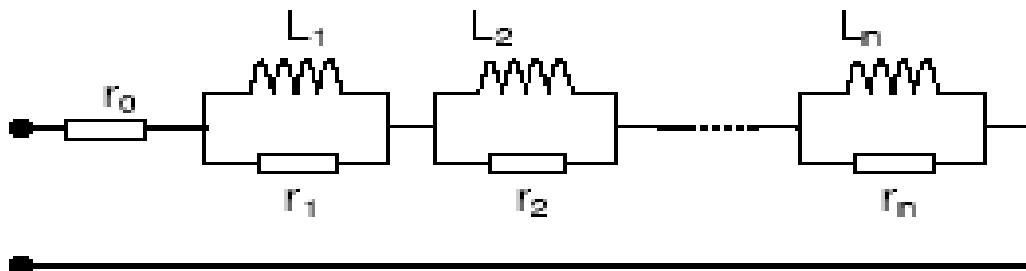
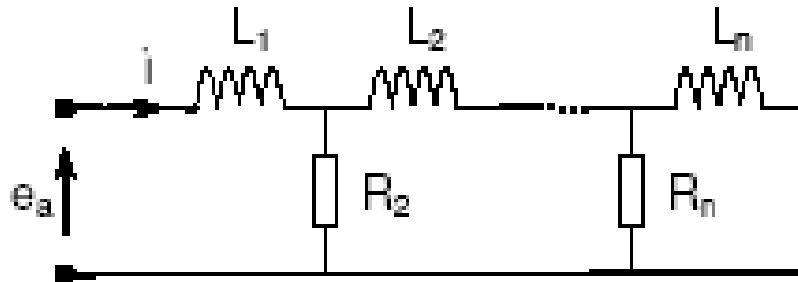


Figure (III.3) : Circuit de FOSTER en série

Pour le noyau, l'effet des courants de Foucault est modélisé par un circuit de CAUER, figure (III.4)



Figure(III.4) : Modèle de CAUER pour le noyau de fer.

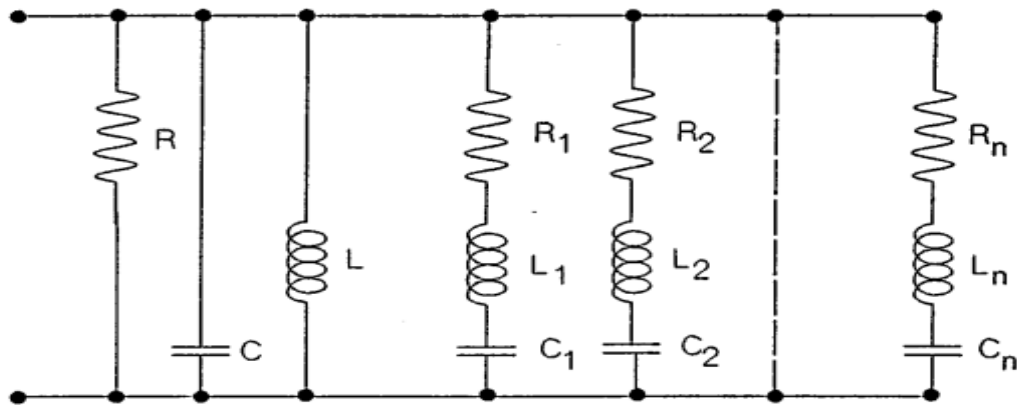
Ce modèle, qui ne tient pas compte de l'inductance mutuelle dans l'air entre les enroulements, permet quand même de modéliser le transformateur par un circuit équivalent. Pourtant, il est encore assez compliqué en raison des calculs analytiques et des transformations en circuit équivalent.

III.2.4- Modélisation par l'analyse modale :

Dans le cas des études où nous nous intéressons aux formes d'onde aux extrémités du transformateur (entrée, sortie), nous pouvons considérer ce dernier comme une boîte noire.

Le signal de sortie est lié au signal d'entrée par la fonction de transfert. Lorsqu'une tension excitatrice (coups de foudre, ou des manœuvres) contient une des fréquences propres du transformateur, il en résulte une excitation à la résonance et le transformateur devient le siège d'oscillations. L'analyse modale est une méthode utilisée pour décrire un système pouvant osciller par des paramètres modaux, à partir des mesures. Le circuit équivalent modal du transformateur est composé des circuits oscillants simples RLC et des éléments R, L et C, figure III.5. A partir des mesures sur l'admittance d'entrée, rapport entre le courant d'entrée et la tension d'entrée, nous déterminons les éléments du circuit équivalent et les fréquences propres de résonance du transformateur.

A l'aide de l'analyse modale, une étude approfondie du comportement oscillatoire de transformateurs de grande puissance a été réalisée. Des modèles plus développés pour le calcul des tensions transmises, montrent l'intérêt de la méthode pour les études de réseaux et que le calcul de surtensions transmises, par le modèle, reste un problème délicat aux niveaux de leurs amplitudes. Le modèle permet d'une part le calcul de fréquences de résonance avec une bonne précision et d'autre part il sert de schéma équivalent pour la prise en compte de la réaction sur le réseau d'un transformateur lors de calcul de réseaux [34].



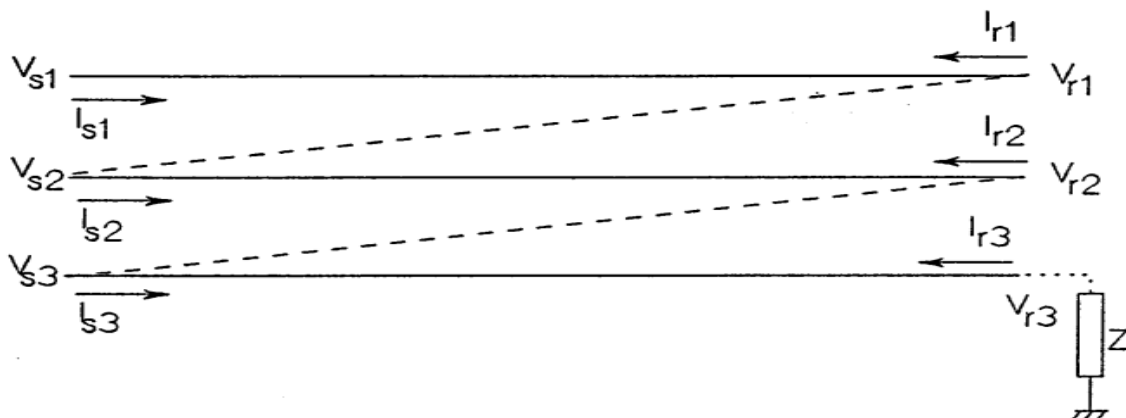
Figure(III.5) : Schéma équivalent modal.

III.2.5- Modélisation par la théorie de lignes [35] :

Des modèles sont basés sur la théorie et l'analyse modale de lignes de transmission, figure (III.6). L'enroulement est décomposé en spires en considérant que le flux magnétique ne pénètre pas dans le noyau magnétique et que la vitesse de la propagation est constante dans l'enroulement. Nous avons donc, une relation linéaire entre la matrice d'inductance et la matrice de capacité. Les résistances sont directement calculées par une formule en tenant compte de l'effet de peau. Les résultats de la simulation ne sont valables que pendant plusieurs centaines de nanosecondes.

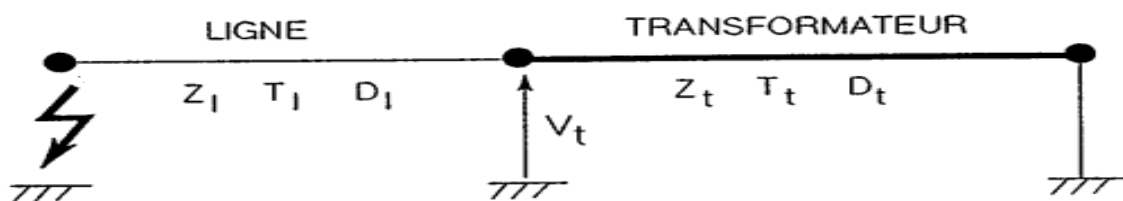
L'application de cette méthode donne de bons résultats avec la mesure dans le cas d'un enroulement ayant un nombre limité de spires (< 12) en utilisant un algorithme d'inversion de Fourier, mais la mise en œuvre de la méthode dans le cas de transformateur de puissance n'a pas encore été abordée. Une extension de la méthode, pour N enroulements, est développée sans validation afin de tenir compte du noyau magnétique sur le calcul des impédances.

Les enroulements sont considérés avec des épaisseurs suffisamment fines et la précision de la méthode est liée au degré de la discrétisation du transformateur.



Figure(III.6) : Schéma équivalent d'un enroulement.

Une autre étude ayant comme but la compréhension des résonances internes du transformateur dans le cas d'un court-circuit de la ligne, connectée au transformateur, à la terre, a utilisé le concept de la ligne. L'ensemble du système est répercuté par un circuit résonnant série dont le transformateur est modélisé par un circuit R, L, C à la fréquence de résonance et la ligne (des bornes du transformateur au défaut) par son impédance caractéristique. Par suite, les auteurs étudient les réflexions des ondes au point d'interconnexion, transformateur et ligne, en considérant le transformateur comme une ligne de transmission, figure (III.7). La détermination des paramètres n'est pas simple, et l'application de la méthode reste limitée pour les études d'interaction transformatrice ligne.

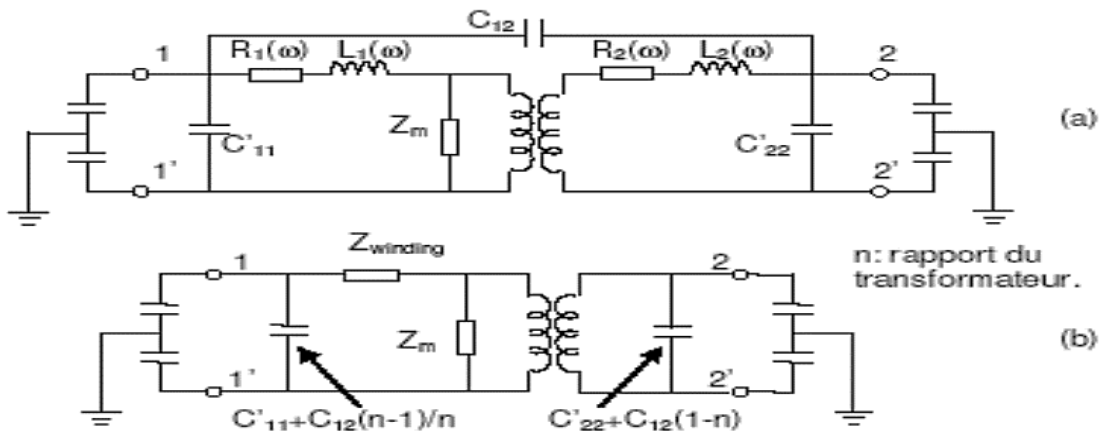


Figure(III.7) : Modélisation du transformateur par une ligne

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

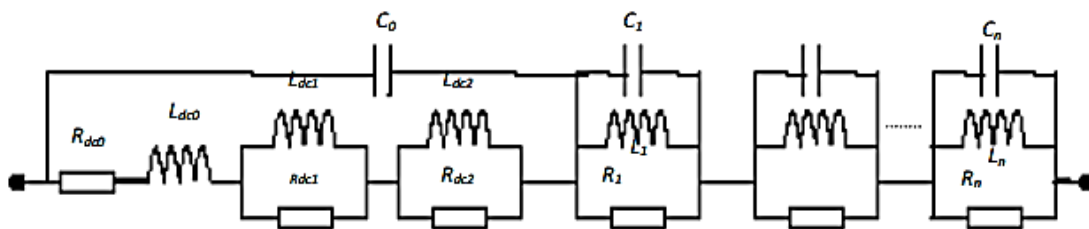
III.2.6- Modèle de Chimklai [36] :

Dans ce modèle, les auteurs ont proposé une méthode simple pour modéliser un transformateur de puissance. Ce modèle Fig. (III.8) se base sur le modèle classique (à 50Hz) du transformateur. Ensuite pour modéliser le transformateur en HF, les capacités et les circuits R, L, C, sont synthétisés par les mesures et ajoutés dans le circuit du modèle classique. En effet, chaque circuit rajouté représente un phénomène qui se produit en HF. Les capacités représentent les phénomènes électrostatiques de l'enroulement, les circuits R, L, C, représentent les phénomènes magnétiques dans le noyau de fer...etc. Cette idée est la base pour établir plusieurs modèles qui sont développés par la suite. Cette méthode de modélisation d'un transformateur est à la fois très simple et efficace.



Figure(III.8) : Modèle du transformateur de Chimklai :a)- circuit d'origine. b)- circuit simplifié.

Dans ce cas l'auteur se base sur un modèle classique à 50Hz, qui comporte un transformateur idéal, la résistance et l'inductance de l'enroulement, et l'impédance magnétisante. L'extension à un modèle HF se réalise par : La considération de la dépendance en fréquence de la résistance et de l'inductance de l'enroulement, dite l'impédance de l'enroulement ($Z_{winding}$) comme dans la Figure. (III.9). Cette impédance est synthétisée par une méthode d'approximation non linéaire pour un circuit RLC.



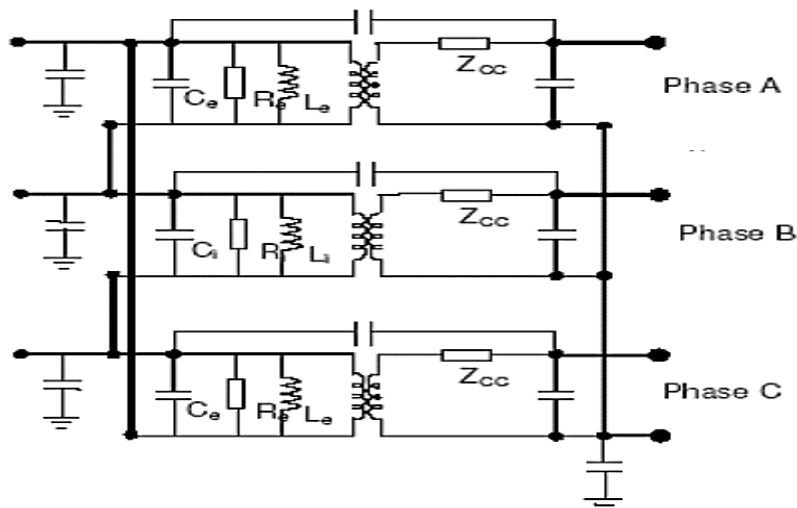
Figure(III.9) : Impédance de l'enroulement ($Z_{winding}$).

Le rajout d'un système de capacités dont les capacités entre enroulements, les capacités entre enroulement et la masse, et celles entre les spires d'un enroulement. Elles sont toutes supposées constantes dans la gamme de fréquence étudiée. Toutes ces capacités sauf la capacité entre les spires d'un enroulement, peuvent être divisées en deux et dont chaque partie est connectée à une extrémité de l'enroulement. L'étude constitue une bonne base pour développer la modélisation du transformateur. Pourtant, elle présente encore des limites : les phases sont symétriques et la fréquence jusqu'à laquelle le modèle reste valable étant de 100 kHz.

III.2.7- Modèle d'Andrieu [37] :

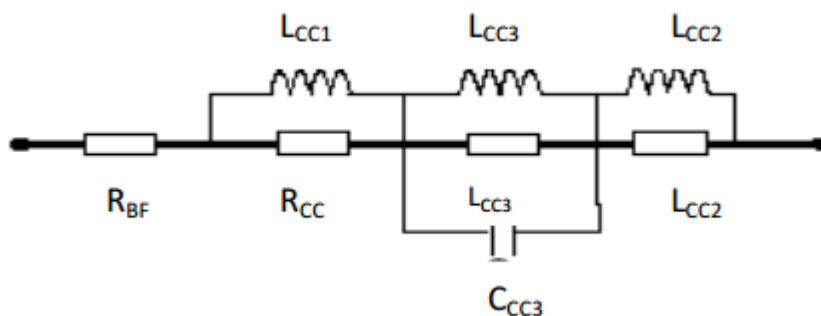
Andrieu et al ont développé un modèle de transformateur de distribution triphasée à deux enroulements par des principes comme dans le modèle de Chimklai Figure. (III.10) Pour modéliser un transformateur en HF, les phénomènes suivants sont pris en compte :

- Les capacités.
- Les résonances dans l'enroulement HT.
- L'impédance de l'enroulement de BT, dépendant de la fréquence (Z_{cc}).



Figure(III.10) : Modèle d'Andrieu.

Les auteurs ont également proposé une procédure, dans laquelle les mesures nécessaires sont fixées pour développer un modèle en HF. Ces mesures sont les mesures des capacités, les mesures des grandeurs électriques en court-circuit et en circuit ouvert. Mais la fréquence limite dans laquelle le modèle est valable reste inférieure à 1MHz. Pour une fréquence plus haute on constate des désaccords entre le résultat de la simulation et la mesure. Le circuit équivalent de l'impédance Z_{cc} est montré dans la figure (III.11).

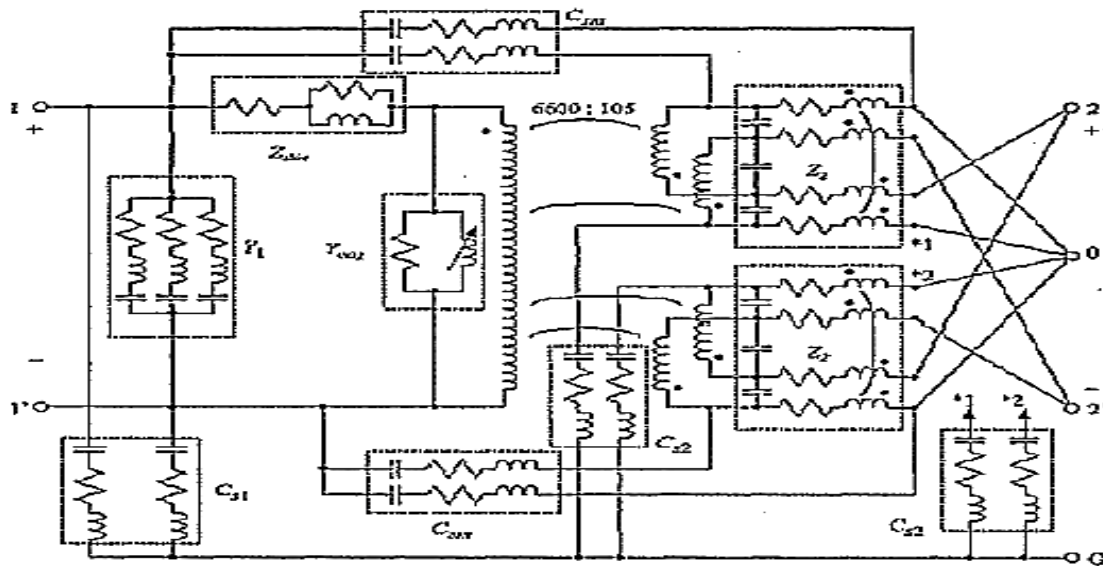


Figure(III.11) : Circuit équivalent de Z_{cc} .

III.2.8- Modèle de Noda [38] :

Noda a montré le développement d'un modèle de transformateur de puissance en HF. Ce modèle suit le même principe que celui de Chimklai. Donc à partir du modèle à 50Hz, en HF il tient compte :

- Des capacités entre les enroulements et entre les enroulements et la masse (C_{s1} , C_{s2} , C_{sm}).
- De l'effet de peau du conducteur et du noyau (Z_{skin}).
- Des résonances créées par les inductances de l'enroulement et capacités entre les spires (Y_1 , Z_1). Chaque phénomène sera représenté par un circuit équivalent. Le modèle complet est montré dans la Figure. (III.12).



Figure(III.12) : Modèle de Noda.

Ce travail a donné un bon résultat sur la modélisation du transformateur en HF. Il a mis en œuvre des méthodes simples pour synthétiser les circuits équivalents représentant les phénomènes comme les résonances, ou les transit par voie de capacités. Mais en raison de la structure particulière monophasée, la disposition particulière de l'enroulement BT (divisé en quatre), le modèle reste encore difficile à appliquer.

III.2.9-Modèles basés sur les inductances propres et mutuelles [38] :

Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent de résistances, inductances et capacités. Le coût et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement atteint dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques de simulations mises en œuvre.

Le transformateur est discrétisé par spires, par galette, ou encore par groupement de spires, que l'on appellera éléments ou spires équivalentes (Figure III.13).

Au point de vue inductif, chaque élément est représenté par son inductance propre.

Cette dernière est couplée à toutes les autres inductances, par des inductances mutuelles. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages, et pour chaque élément, une capacité par rapport à la masse.

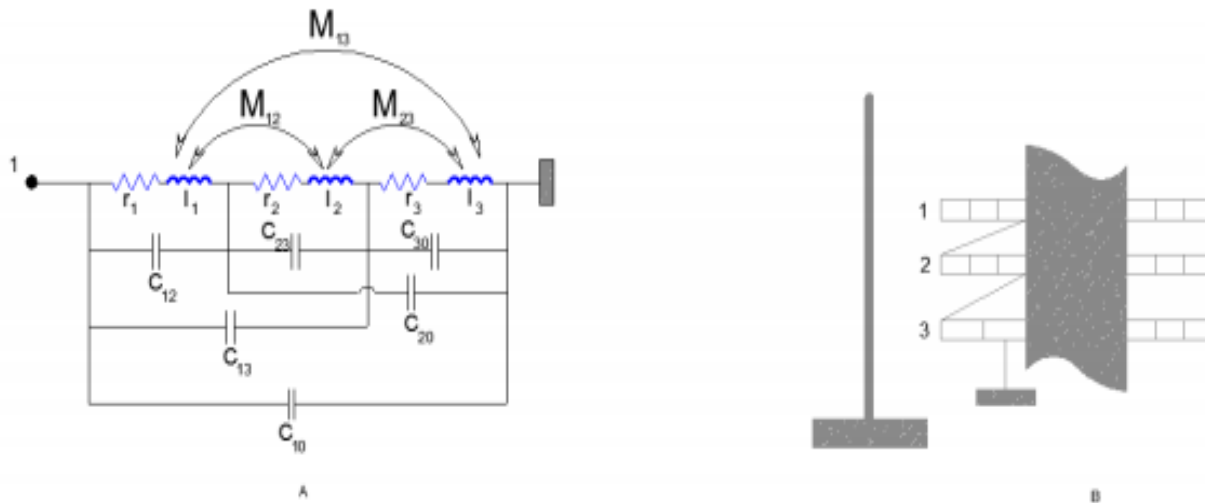


Figure (III.13) : Schéma de principe de la modélisation par inductances propres et mutuelles

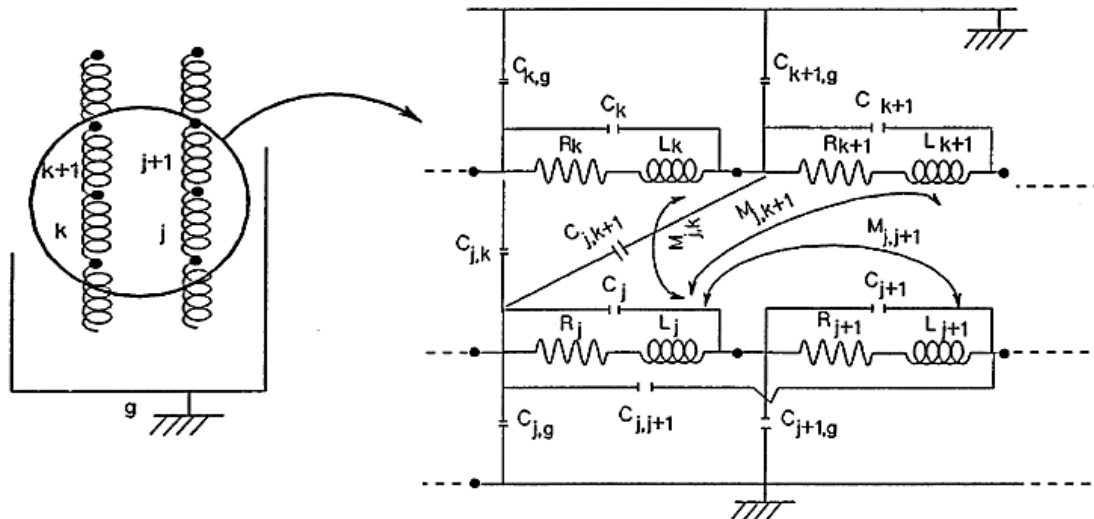
A) circuit électrique B) circuit magnétique

Quel que soit le type de représentation, les paramètres correspondant à chaque élément sont calculés en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques de bobinage ainsi que des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau.

Ce modèle est le plus répandu et utilisé à l'heure actuelle. Cependant le nombre de paramètres à calculer est important. Le schéma est modifié, plus au moins, selon l'intérêt de chaque étude dont les paramètres sont déterminés, soit par la mesure, soit par des calculs analytiques directs de la géométrie.

Un autre modèle assez simple est basé sur un circuit essentiellement composé d'inductances, de capacités et de résistances en parallèles qui représentent les pertes. Les résistances sont omises. A travers l'analyse du fonctionnement de plusieurs transformateurs, les auteurs ont pu estimer les pertes par courant de Foucault par des résistances en parallèles avec les inductances de fuites et empiriques dépendant de la configuration du transformateur choisie.

La configuration du transformateur choisie est représentée par la figure (III.14).



Figure(III.14) : Couplage de l'élément j avec les autres éléments.

III.3- Modèle adopté pour l'enroulement de transformateur [39] :

Heller et Veverka, ont assimilé le comportement d'un enroulement de transformateur soumis à une onde de choc à celui d'un système de condensateurs et d'inductances. Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent de résistances, d'inductances et de capacités. Le coût et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques de simulation mises en œuvre.

On discrétise l'enroulement par un ensemble fini de spires ou galettes ou par des bobinages que l'on appellera éléments. Chaque élément est représenté par sa résistance et son inductance propre qui est couplée mutuellement avec les autres inductances.

Comme on l'a montré sur La Figure (III.15) représente le schéma équivalent à un enroulement de transformateur.

Quel que soit le type de représentation, les éléments sont calculés en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage ainsi que des caractéristiques géométriques du noyau magnétique.

En HF, même si nous négligeons l'effet non linéaire du noyau, la modélisation du transformateur reste plus complexe par rapport à celle à 50 Hz. De nombreux travaux ont été réalisés pour essayer de trouver un modèle unique du transformateur, mais cet objectif est loin d'être atteint en raison de plusieurs phénomènes à savoir :

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

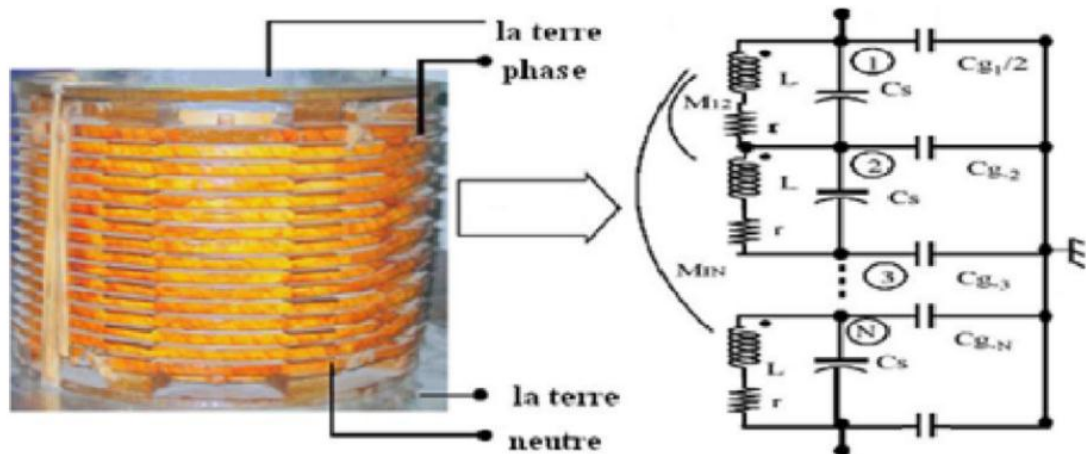


Figure (III.15) : Schéma équivalent d'un enroulement de transformateur

Avec :

c_s : Capacité série.

c_g : Capacité shunt.

r : résistance.

L : l'inductance propre.

M_{IN} : représenté les inductances mutuelles.

III.3.1- Equations du schéma équivalent adopté :

L'application des lois de Kirchhoff au circuit représenté sur la figure 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 5 éléments et le raisonnement serait le même pour une discrétisation en n éléments, cependant le choix est limité à 5 puisque après ce nombre la précision de calcul reste sensiblement constante [40].

III.3.1.1-Equations des tensions :

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

$$u_0(t) = U_{\max} \sin \omega t = r_g i_0 \quad (\text{III.1})$$

Avec :

r_g : La résistance interne de générateur.

Les équations différentielles des tensions pour l'enroulement du transformateur subdivisé en 5 éléments, sont :

$$u_1 - u_2 - r i_1 = l_s \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} + M_{15} \frac{di_5}{dt} \quad (\text{III.2})$$

$$u_2 - u_3 - r i_2 = l_s \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} + M_{25} \frac{di_5}{dt} \quad (\text{III.3})$$

• **Généralisation :**

Pour $1 \leq k \leq N$

$$u_k - u_{k+1} - r i_k = l_s \frac{di_k}{dt} + \sum_{m=1}^N M_{km} \frac{di_m}{dt} \quad \text{avec } m \neq k \quad (\text{III.4})$$

III.3.1.2-Equations des courants :

Au nœud (1) à l'entrée du transformateur on a :

$$i_0 = i_1 + i_{cs} + i_{cg/2} \quad (\text{III.5})$$

$$i_0 - i_1 = i_{cs} + i_{cg/2} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$$i_{cs} = c_s \frac{d(v_1 - v_2)}{dt} \quad (\text{III.7})$$

$$i_{cg/2} = c_{cg/2} \frac{dv_1}{dt} \quad (\text{III.8})$$

En introduisant (III.7) et (III.8) dans (III.5) on obtient :

$$i_0 - i_1 = c_s \frac{dv_1}{dt} - c_s \frac{dv_2}{dt} + c_{g/2} \frac{dv_1}{dt} = (c_s + c_{g/2}) \frac{dv_1}{dt} - c_s \frac{dv_2}{dt} \quad (\text{III.9})$$

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

$$i_1 - i_2 = c_s \frac{dv_2}{dt} - c_s \frac{dv_1}{dt} + c_s \frac{dv_2}{dt} - c_s \frac{dv_3}{dt} + c_g \frac{dv_2}{dt} \quad (\text{III.10})$$

$$i_1 - i_2 = -c_s \frac{dv_1}{dt} + (2c_s + c_g) \frac{dv_2}{dt} - c_s \frac{dv_3}{dt} \quad (\text{III.11})$$

• **Généralisation :**

Pour $0 \leq k \leq N-1$

$$i_k - i_{k+1} = -c_s \frac{du_k}{dt} + (2c_s + c_g) \frac{du_{k+1}}{dt} - c_s \frac{du_{k+2}}{dt} \quad (\text{III.12})$$

III.3.3- 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 (III.2) et (III.6) on obtient :

-Pour l'équation des tensions :

$$\int_0^t (u_k - u_{k+1}) dt = \int_0^t (\sum_{m=1}^N L_{km} i_m + R_k \int_0^t i_k) dt \quad (\text{III.13})$$

- Pour l'équation des courants :

$$\int_0^t (i_k - i_{k+1}) dt = \int_0^t (-c_s u_k + (2c_s + c_g) u_{k+1} - c_s u_{k+2}) dt \quad (\text{III.14})$$

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

$$U = C^{-1} \int_0^t \Delta I dt \quad (\text{III.15})$$

$$I = L^{-1} \int_0^t (\Delta U - RI) dt \quad (\text{III.16})$$

Dont :

$$\Delta I = (I_k - I_{k+1}) \quad \text{et} \quad \Delta U = (U_k - U_{k+1}) \quad (\text{III.17})$$

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

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

III.4-Conclusion :

Nous avons vus dans cette étude bibliographique les divers modèles de transformateur de puissance en Haute Fréquence, existants dans la littérature. Le modèle que nous avons jugé plus convenable pour notre étude est celui 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 grande puissance et étudier leurs comportements internes (répartition de la tension le long de l'enroulement, le gradient de tension, fréquences de résonance...). Cependant, il est important de trouver 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 chapitre suivant.

IV.1-Introduction :

Actuellement, l'analyse de la réponse fréquentielle FRA est devenue un outil pertinent pour le diagnostic des transformateurs. Toutefois, les questions d'interprétation des données de la réponse en fréquence conduisant à l'identification et la localisation des défauts restent difficiles. Selon les auteurs, pour y parvenir, il faudrait un système mathématique et des formulations appropriés.

Il est évident que lorsqu'un défaut apparaît dans l'enroulement, sa réponse en fréquence change automatiquement. La technique FRA nous permet d'avoir un aperçu sur l'état de l'enroulement. Cependant, l'analyse et l'interprétation des résultats FRA est considéré comme un défi [41].

Tout changement dans la géométrie physique d'un enroulement de transformateur entraîne également un changement dans les valeurs de l'inductance et la capacité de son modèle équivalent.

Dans ce chapitre, des paramètres telles que la capacité série, la capacité avec la terre et les inductances propre et mutuelles sont identifiés à l'aide de la méthode d'optimisation par essaim de particules (PSO) pour un enroulement sain, puis l'enroulement présent une décharge partielle, l'enroulement étudié est subdivisé en 05 disques où chaque disque contient 30spires sur 03couches, à une hauteur totale de 500mm et un diamètre de 220mm la hauteur de chaque disque est 56mm.

Le but principal de calcul de ces paramètres est de réaliser une empreinte (un modèle de référence) pour l'analyse de la réponse en fréquence FRA et de les comparer à ceux des défauts effectués.

IV.2- Caractéristique de l'enroulement étudié et mesure :

Les caractéristiques de l'enroulement testé sont les suivants :

- Une hauteur totale de 500 mm
- Un diamètre intérieur et extérieur de 200 mm et 220 mm respectivement
- Une section du cuivre de 10 mm²
- 05 disques comportant 30 spires chacun

Les résultats obtenus ont été confrontés aux résultats de simulation du modèle représenté sur la figure (IV.1).

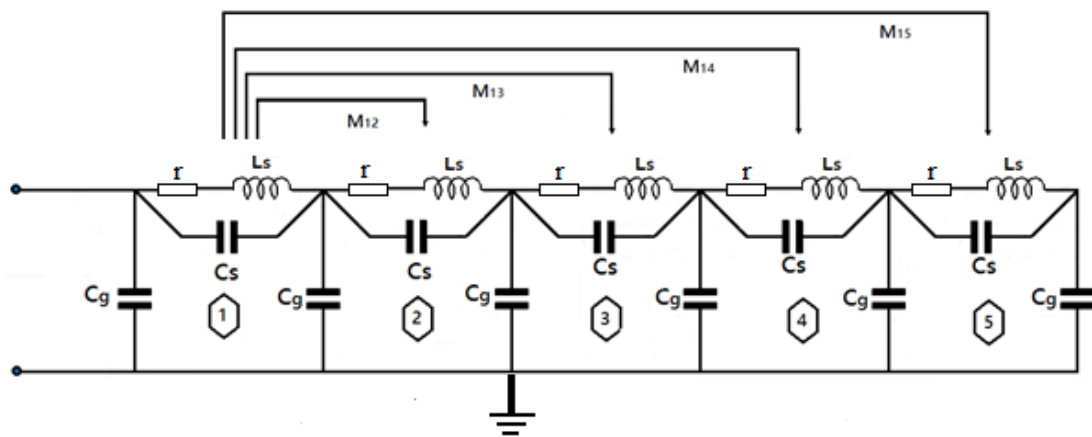


Figure (IV.1) : Schéma équivalent du bobinage

Les mesures effectuées sur l'enroulement sont données comme suit :

- $L_{eq}=1,55$ mH, $C_{geff}= 60$ pF et $R_{dc}= 0.25$ Ω .

La réponse de l'impédance en fonction de la fréquence de l'enroulement étudié est représentée sur la Figure IV.2

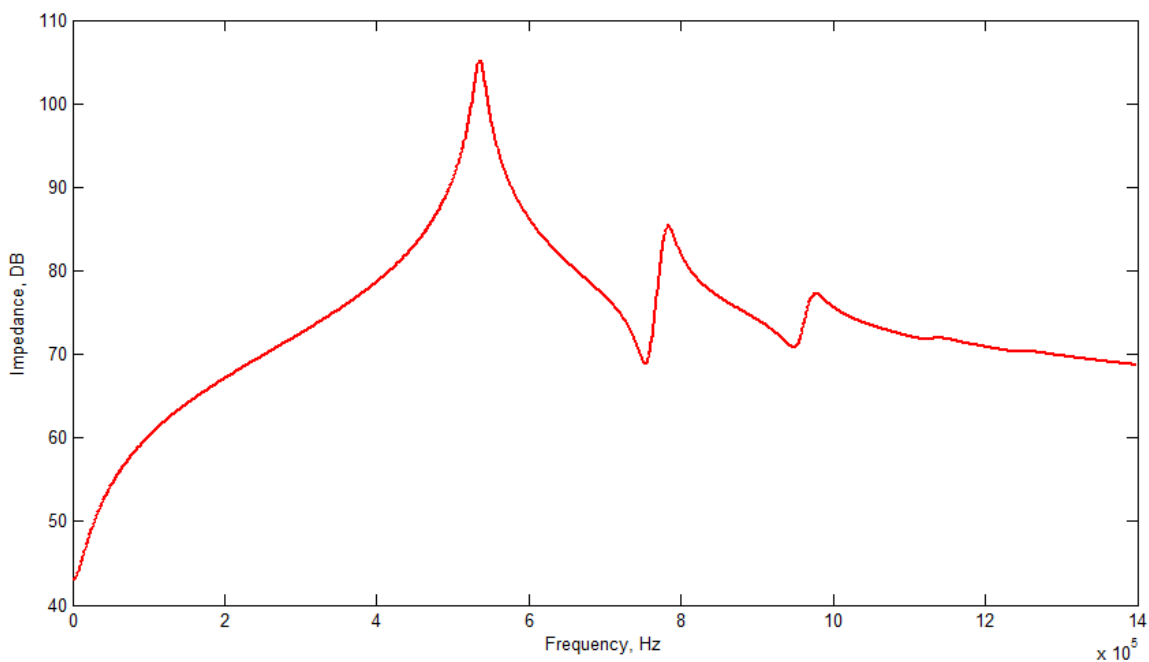


Figure (IV.2) La variation de l'impédance en fonction de la fréquence [42].

IV.3- Méthode de calcul des paramètres du modèle adopté :

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

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

$$[C]= \begin{bmatrix} c_g + c_{g1}/2 & -c_s & \dots & \dots & 0 \\ -c_s & 2c_s + c_{g2} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 2c_s + c_{gN} \end{bmatrix} \quad (IV.1)$$

$$[L]= \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1N} \\ M_{12} & L_2 & \dots & M_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{1N} & M_{2N} & \dots & L_N \end{bmatrix} \quad (IV.2)$$

L est une matrice diagonale, tous les éléments diagonaux sont les inductances propres, et les éléments non diagonaux sont les mutuelles inductances.

$$[R] = \begin{bmatrix} r & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & r \end{bmatrix} \quad (IV.3)$$

- **Calcul les inductances propres et mutuelles :**

Le calcul des inductances propres et mutuelles d'un enroulement est donné par l'équation suivant :

$$L_{eq} = NL_s + 2 \sum_{N=1}^N \sum_{i \neq j} (N - 1) M_{i,j} \quad (IV.4)$$

Avec :

N : le nombre d'élément de discrétisation (N=5).

L_s : Inductance propre.

M_{i,j} : Inductance mutuelle.

- **Calcul des capacités shunt c_g , séries c_s et la capacité équivalente C_{eq} :**

Les capacités shunt c_g et séries c_s , qui sont déterminées à partir de la valeur de la capacité au sol mesurée et les valeurs de nombre d'éléments.

$$c_g = \frac{C_{g,eff}}{N} \quad (IV.5)$$

$$c_s = \frac{NC_{g,eff}}{\alpha^2} \quad (IV.6)$$

$$C_{eq} = \frac{C_g}{2} + \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_g + \frac{1}{\frac{1}{C_s} + \dots}}} \quad (IV.7)$$

- **Calcul de la résistance r :**

Les résistances r , sont déterminées à partir de la valeur de la résistance mesurée et les valeurs de nombre d'éléments de discrétisation, et donne comme suit :

$$r = \frac{R_{dc}}{N} [\Omega] \quad (IV.8)$$

IV.4- Optimisation par les essaims de particules [44] :

Nous avons assisté ces dernières années à une croissance très rapide des travaux utilisant les PSO dans les systèmes électriques. Cela est dû à la simplicité de leurs mécanismes, la facilité de leur mise en application et leur efficacité même pour des problèmes complexes.

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est une technique d'optimisation Stochastique, elle a été développée par Dr. Kennedy et Dr. Eberhart en 1995.

Les individus dans l'algorithme sont appelés « particules » et la population est appelée « essaim ». Dans cet algorithme une particule décide de son prochain mouvement en fonction de sa propre expérience, qui est dans ce cas la mémoire de la meilleure position qu'elle a rencontrée, et en fonction de son meilleur compagnon (voisin). Les nouvelles vitesses et direction de la particule seront définies en fonction de trois tendances :

- La propension à suivre son propre chemin et sa vitesse propre (égoïste)
- La tendance à revenir vers la meilleure position atteinte (conservateur)
- La tendance d'aller vers son meilleur voisin (panurgien)

Chaque particule possède les caractéristiques suivantes :

- Sa position, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'espace de recherche.
- Sa vitesse qui permet de se déplacer.
- Son voisinage, qui représente l'ensemble de solution.

Pour chaque itération, la particule doit connaître sa meilleure position visitée, et la position du meilleur voisin.

L'algorithme PSO est initialisé par une population de solutions potentielles aléatoires, interprétées comme des particules qui se déplacent dans l'espace de recherche. Chaque particule est attirée vers sa meilleure position du passé ainsi que vers la meilleure position découverte par les particules de son voisinage. L'exploration est la capacité de tester différentes régions de

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

l'espace à la recherche de bonnes solutions candidates. L'exploitation est la capacité de concentrer la recherche autour des solutions prometteuses afin de s'approcher le plus possible de l'optimum. Le choix des paramètres reste en grande partie empirique, une analyse approfondie de l'algorithme a été faite.

IV.5- Les étapes de la méthode PSO [43] :

Les étapes de la méthode sont comme suit :

- **1ère étape** : Initialisation des paramètres de l'algorithme.
- **2ème étape** : La création de la population initiale aléatoirement et l'évaluation de la fitness de chaque particule (P_{best} , P_{gbest})
- **3ème étape** : Le calcul de la nouvelle vitesse et la nouvelle position de chaque particule par l'utilisation des formules appropriées.
- **4ème étape** : Le calcul du meilleur fitness de la population initiale et la comparer avec la précédente pour trouver la meilleure de toute les populations
- **5ème étape** : incrémentation du nombre d'itération $k = k+1$.
- **6ème étape** : Si un critère d'arrêt est satisfait alors passer à la **7ème** étape autrement, aller à la **3ème** étape.
- **7ème étape** : La position enregistrée dans P_{gbest} est la solution optimale.

IV.6- Critères d'arrêt [43] :

Parmi les avantages de l'algorithme PSO est qu'il nécessite moins de paramètres de régulation par rapport aux autres algorithmes d'optimisation, de plus, la convergence est rapide même pour les problèmes d'optimisation complexes. Il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itération ou si la fonction fitness est suffisante pour garantir une convergence vers une solution optimale globale.

Donc pour N itération :

L'algorithme s'arrête lorsque les critères de convergence suivants sont satisfaits :

$$L_{eq} (\text{estimée}) \leq L_{eq} (\text{mesurée})$$

L'algorithme a été mis en œuvre avec une population de 20 individus. Les probabilités de croisement et de mutation sont choisies à être 0,2 et 0,8 respectivement.

L'expression de l'erreur est mentionnée dans l'équation suivante :

$$\% \text{ Erreur} = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur estimée}}{\text{valeur mesurée}} \times 100 \quad (\text{IV.9})$$

IV.7- Application de la méthode PSO pour l'identification des paramètres de l'enroulement du transformateur [42] :

Le choix des paramètres joue un rôle crucial dans la convergence de l'algorithme, de nombreuses recherches ont été effectuées pour améliorer la convergence de la méthode PSO tel que l'élaboration de facteur d'inertie, le facteur de construction et le facteur d'accélération.

Dans ce mémoire, nous allons exploiter la méthode de PSO pour identifier les paramètres du modèle de l'enroulement sain du transformateur à haute fréquence. L'organigramme de la méthode utilisée est représenté par la Figure (IV.3)

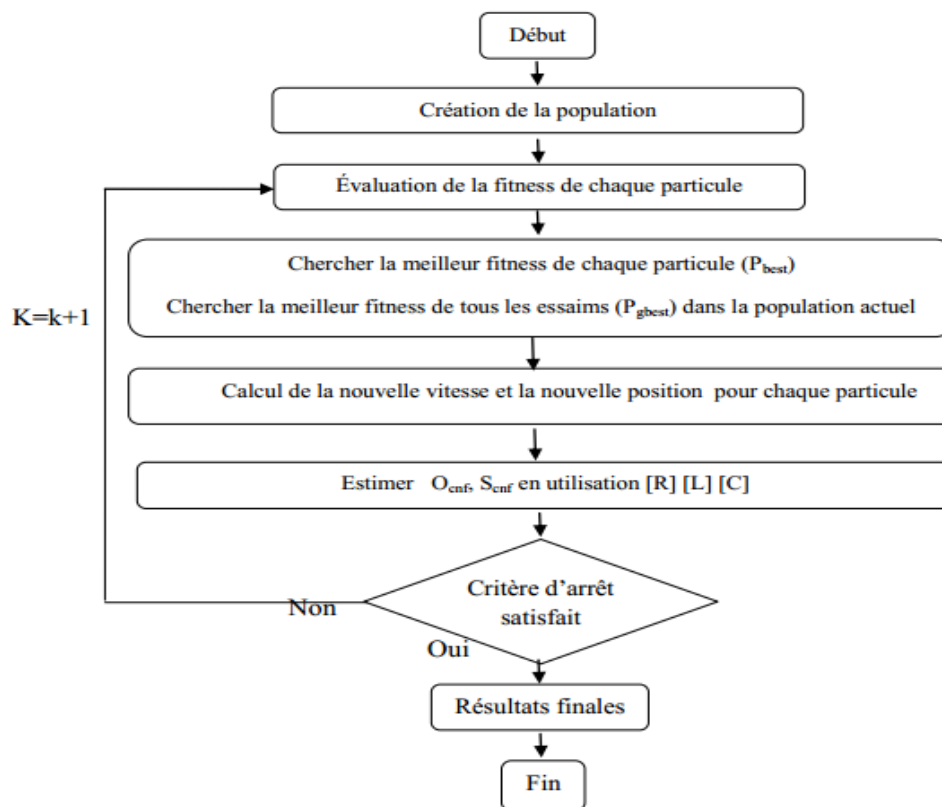


Figure (IV.3) : Organigramme de la méthode PSO.

IV.8- Identification des paramètres du l'enroulement étudié :

L'algorithme interprété par l'organigramme (Figure IV.3) est testé pour l'identification des paramètres de l'enroulement étudié.

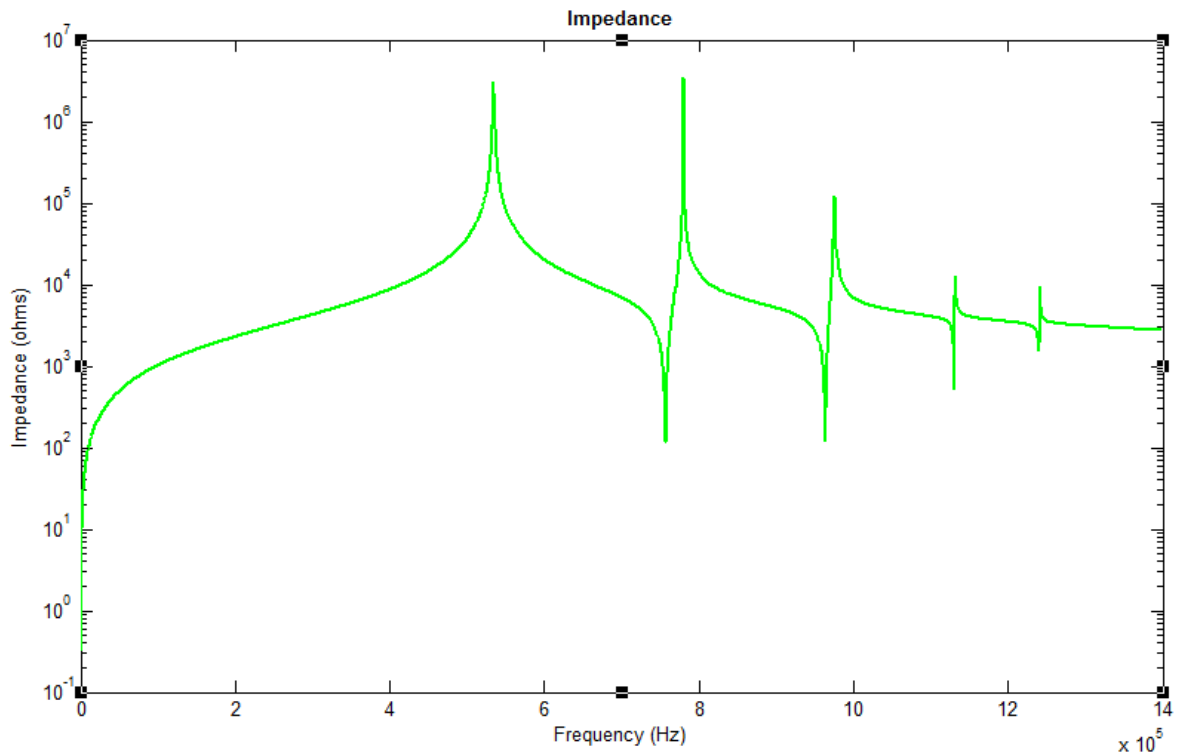
Après exécution de PSO, les paramètres du circuit équivalent de l'enroulement sont estimés en appliquant l'algorithme PSO. Le tableau suivant récapitule les résultats finaux.

| LS (mH) | M1(mH) | M2(mH) | M3(mH) | M4(mH) |
|---------|---------|--------|---------|---------|
| 0.18213 | 0.61286 | 0.022 | 0.00794 | 0.00193 |

Tableau (IV.1) : l'inductance propre et mutuelle obtenir par PSO, Les valeurs enmH.

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence obtenue par le schéma calculé par la méthode PSO est illustrée dans la figure (IV.4).



Figure(IV.4) : Réponse en fréquence obtenu par PSO.

Le tableau IV.2 illustre les fréquences mesurées et estimées, ainsi que l'écart enregistré entre ces deux grandeurs. À partir de ces résultats, nous confirmons l'efficacité de l'algorithme PSO dans ce cas d'étude.

| Les Valeurs mesurées | | Les Valeurs estimées utilisant PSO méthode | | Erreur % |
|-------------------------|------------|--|------------|----------|
| Ocnf (kHz) | Scnf (kHz) | Ocnf (kHz) | Scnf (kHz) | |
| 536 | 756 | 534 | 757 | ≤ 1% |
| 779 | 958 | 780 | 963 | |
| 970 | 1127 | 976 | 1130 | |
| 1129 | 1246 | 1132 | 1239 | |
| 1247 | - | 1241 | - | |
| L _{eq} =1.55mH | | L _{eq} =1.5686mH | | 1.2% |

Tableau (IV.2) : La comparaison des fréquences normale en circuit ouvert (Ocnf) et celles en court-circuit (Scnf) de la mesure et de PSO.

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

On remarque que d'après les comparaisons effectuées que l'erreur n'excède pas 1% par rapport à la mesure. Ce qui valide le modèle utilisée.

La comparaison entre les allures de l'impédance en fonction de la fréquence mesurée et estimée est représentée dans la figure (IV. 5)

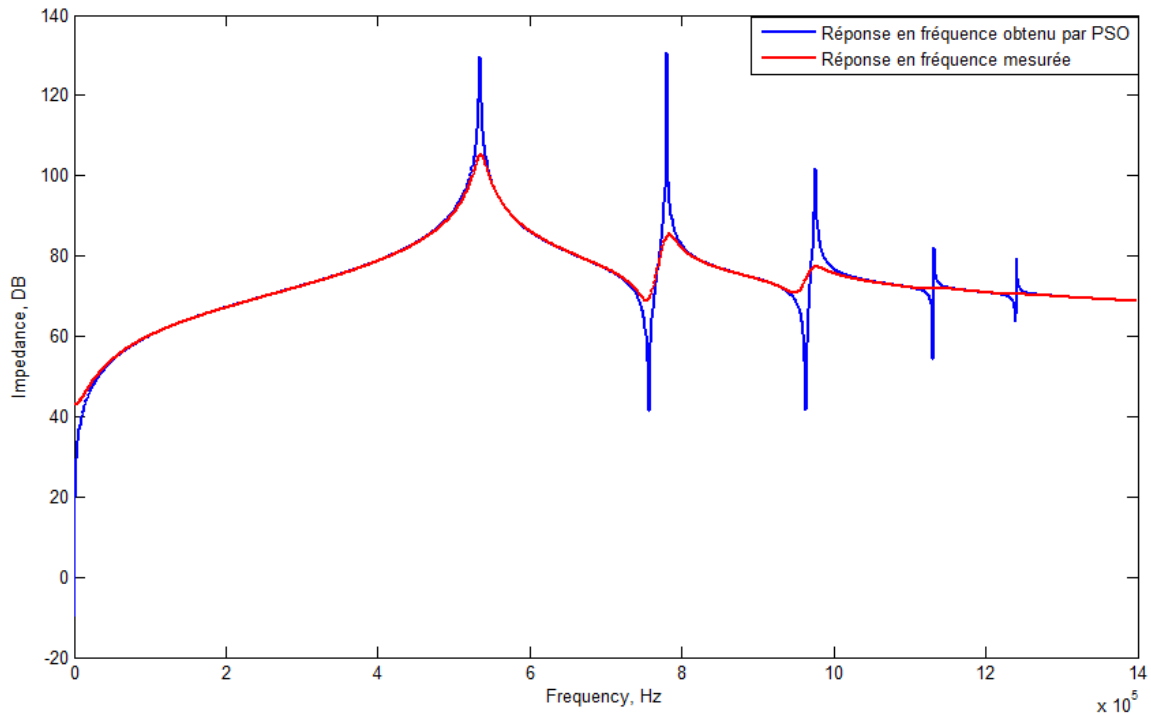


Figure. (IV.5) : Comparaison entre la mesure et l'estimation de l'impédance en fonction de la fréquence

Les résultats obtenus par l'application de l'algorithme PSO montrent que l'écart entre les valeurs mesurées et estimées est de l'ordre 1%.

Le bon choix des paramètres joue un rôle très important dans la convergence, de l'algorithme. Avec la méthode PSO repose sur l'initialisation aléatoire, ce qui a simplifié beaucoup plus la façon de traitement des données. On peut observer à partir de figure et de tableau que les paramètres identifiés par la méthode PSO est très proche à celle de référence.

IV.9- Diagnostic des défauts dans l'enroulement du transformateur :

L'objectif de cette étude est de détecter et localiser le défaut à l'intérieure de l'enroulement.

La réponse en fréquence d'un transformateur est très sensible à la géométrie de l'enroulement, la distribution des capacités et des inductances d'enroulement.

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

Tout changement physique de l'enroulement ou une partie de ce dernier induit une modification de sa réponse en fréquence. La détection de tout écart ou décalage vers la gauche ou vers la droite des fréquences de coupures comparativement à la signature d'un enroulement sain, implique une apparition d'un défaut dans l'enroulement.

Après avoir validé le modèle adopté, nous allons l'exploiter pour une étude de diagnostic de l'enroulement de transformateur afin d'étudier les différentes défaillances avec la technique d'analyse fréquentielle.

Les défauts simulés sont les suivants :

- Décharge partielle dans l'enroulement.
- Court-circuit entre les spires ou élément.
- Ouverture d'une partie de l'enroulement.

IV.10- Simulation des différents défauts étudiés :

IV.10.1- Défauts de décharge partielle dans l'enroulement :

La présence d'un tel défaut dans l'enroulement du transformateur de puissance provoque une variation de sa réponse en fréquence, et par voie de conséquence une variation dans les éléments du circuit équivalent, comme le montre la figure suivante :

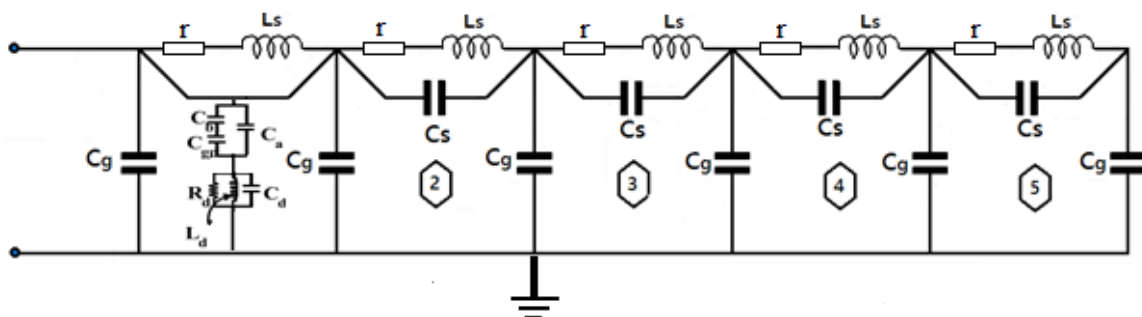
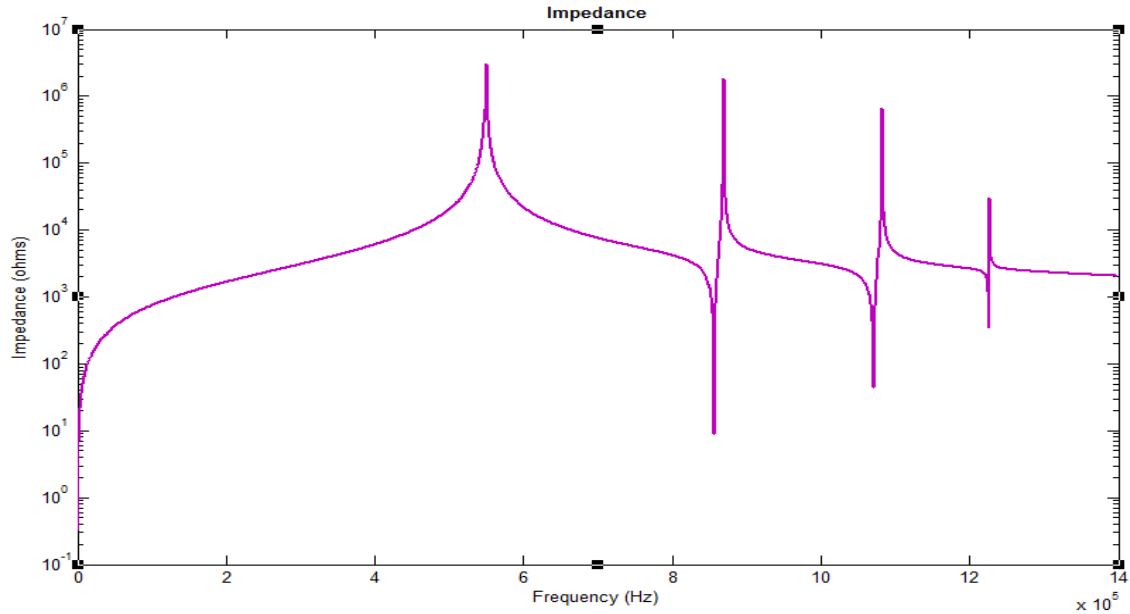


Figure (IV.6) : Schéma équivalent du bobinage avec décharge partielle.

Dans le but de localiser le point de défaut de décharge partielle dans les différents éléments de la bobine, nous avons simulé le déplacement de ce point.

IV.10.1.1- Décharge partielle dans la 1^{ère} cellule :

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence avec décharge partielle injectée dans la 1^{ère} cellule est illustrée dans la figure. (IV.7).



Le tableau IV.3 illustre les fréquences de l'enroulement sain et celle avec décharge partielle, ainsi que l'écart enregistré entre ces deux grandeurs.

| Enroulement sain | | Enroulement avec décharge | | Décalage | |
|------------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 550 | 856 | 16 | 99 |
| 780 | 963 | 869 | 1071 | 89 | 108 |
| 976 | 1130 | 1082 | 1226 | 106 | 96 |
| 1132 | 1239 | 1227 | - | 95 | - |
| 1241 | - | - | - | - | - |

Tableau (IV.3) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 1^{ère} cellule et un enroulement sain

Interprétation des résultats :

A partir de la comparaison entre l'empreinte d'impédance issue d'un enroulement sain et, celle d'un enroulement présentant un défaut de décharge partielle dans la 1^{ère} cellule, nous avons observés un déplacement des fréquences (Ocnf) et de(Scnf) d'environ 16 k Hz -100k Hz respectivement.

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

On remarque également après l'application de défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau de dernière cellule observée dans le cas d'un enroulement sain.

IV.10.1.2- décharge partielle dans la 2^{ème} cellule :

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence avec décharge partielle injectée dans la 2^{ème} cellule est illustrée dans la figure. (IV.8).

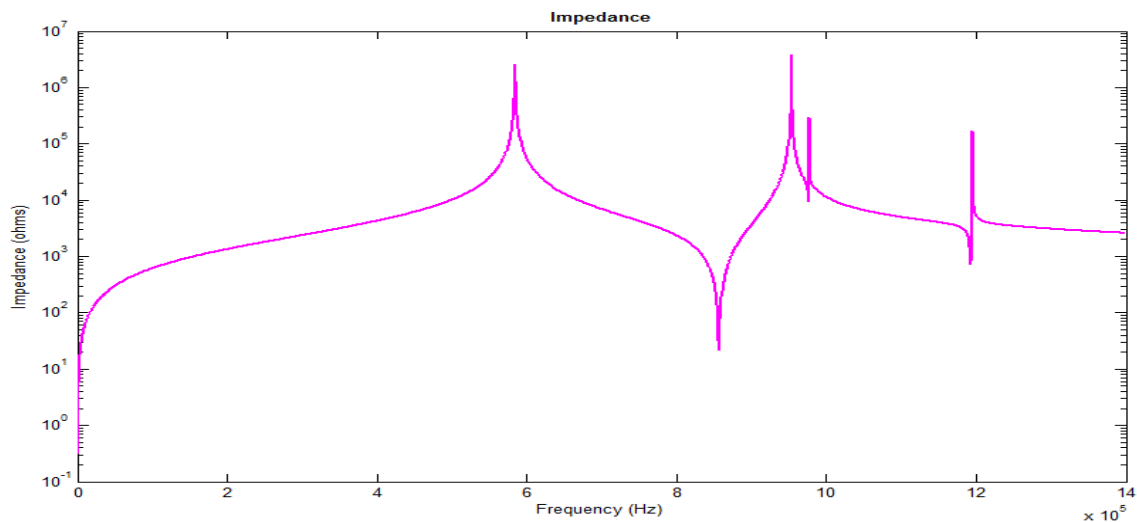


Figure (IV.8) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence.

Le tableau IV.4 illustre les fréquences de l'enroulement sain et celle avec décharge partielle, ainsi que l'écart enregistré entre ces deux grandeurs.

| Enroulement sain | | Enroulement avec décharge | | Décalage | |
|------------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 584 | 857 | 50 | 100 |
| 780 | 963 | 953 | 976 | 173 | 13 |
| 976 | 1130 | 977 | 1192 | 1 | 62 |
| 1132 | 1239 | 1195 | - | 63 | - |
| 1241 | - | - | - | - | - |

Tableau (IV.4) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 2^{ème} cellule et un enroulement sain

Interprétation des résultats :

A partir de la comparaison entre l'empreinte d'impédance issue d'un enroulement sain et, celle d'un enroulement présentant un défaut de décharge partielle dans la 2^{ème} cellule, nous

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

avons observés un déplacement des fréquences (Ocnf) et de (Scnf) d'environ 13 khz-60khz respectivement.

On remarque également après l'application de défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau de dernière cellule observée dans le cas d'un enroulement sain.

IV.10.1.3- décharge partielle dans la 3^{ème} cellule :

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence avec décharge partielle injectée dans la 3^{ème} cellule est illustrée dans la figure. (IV.9).

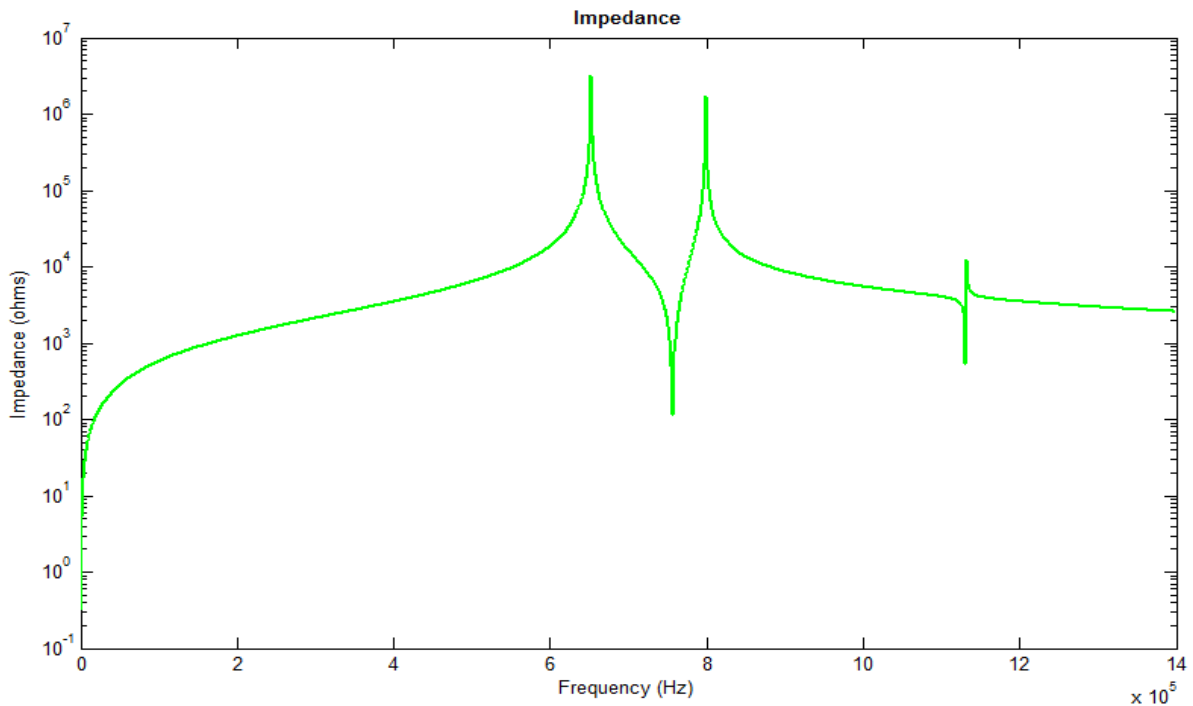


Figure (IV.9) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence.

Le tableau IV.5 illustre les fréquences de l'enroulement sain et celle avec décharge partielle, ainsi que l'écart enregistré entre ces deux grandeurs.

| Enroulement sain | | Enroulement avec décharge | | Décalage | |
|------------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 650 | 757 | 116 | 0 |
| 780 | 963 | 799 | 1130 | 19 | 167 |
| 976 | 1130 | 1132 | - | 156 | - |
| 1132 | 1239 | - | - | - | - |
| 1241 | - | - | - | - | - |

Tableau (IV.5) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 3^{ème} cellule et un enroulement sain

Interprétation des résultats :

A partir de la comparaison entre l'empreinte d'impédance issue d'un enroulement sain et, celle d'un enroulement présentant un défaut de décharge partielle dans la 3^{ème} cellule, nous avons observés un déplacement des fréquences (f_{0cnf}) et de (f_{scnf}) d'environ 20 khz-150khz respectivement.

On remarque également après l'application de défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau de deux dernières cellules observées dans le cas d'un enroulement sain.

IV.10.1.4- décharge partielle dans la 4^{ème} cellule :

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence avec décharge partielle injectée dans la 4^{ème} cellule est illustrée dans la figure. (IV.10).

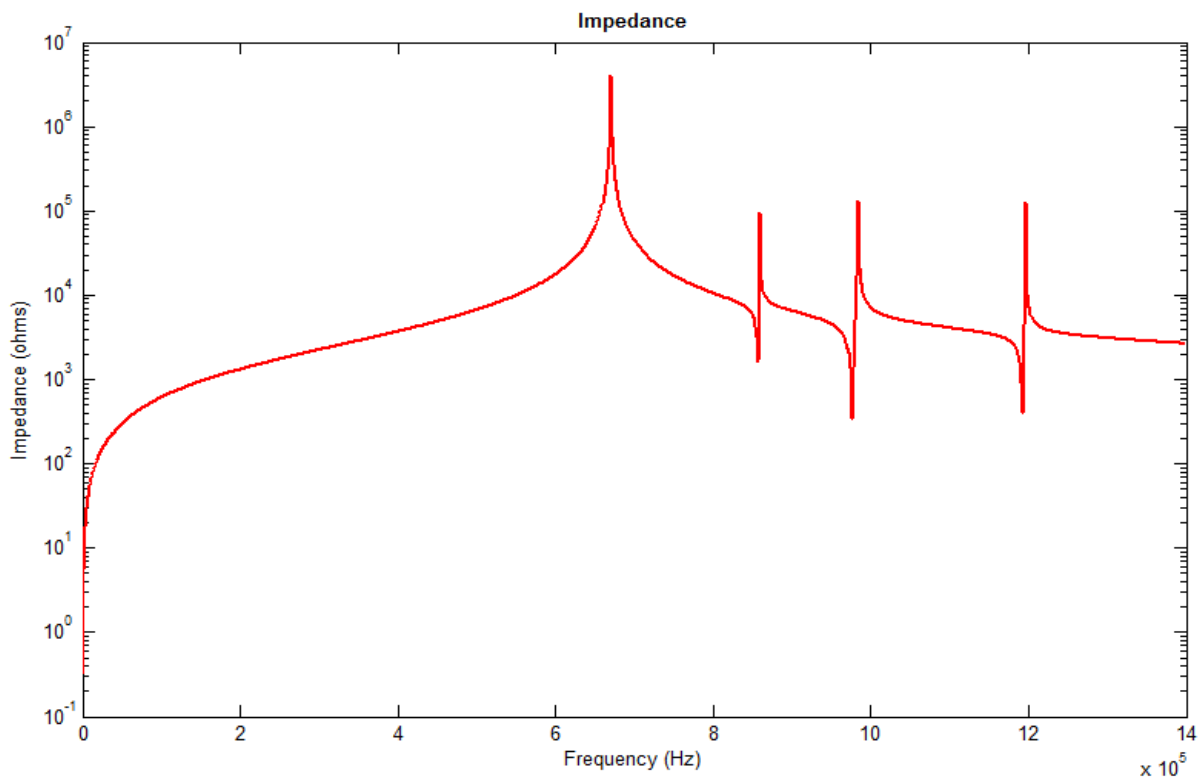


Figure (IV.10) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence.

Le tableau IV.6 illustre les fréquences de l'enroulement sain et celle avec décharge partielle, ainsi que l'écart enregistré entre ces deux grandeurs.

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

| Enroulement sain | | Enroulement avec décharge | | Décalage | |
|------------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 670 | 856 | 136 | 99 |
| 780 | 963 | 859 | 976 | 80 | 13 |
| 976 | 1130 | 984 | 1193 | 8 | 63 |
| 1132 | 1239 | 1197 | - | 65 | - |
| 1241 | - | - | - | - | - |

Tableau (IV.6) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 4^{ème} cellule et un enroulement sain

Interprétation des résultats :

A partir de la comparaison entre l'empreinte d'impédance issue d'un enroulement sain et, celle d'un enroulement présentant un défaut de décharge partielle dans la 4^{ème} cellule, nous avons observés un déplacement des fréquences(Ocnf) et de (Scnf) d'environ 8 khz -60khz respectivement.

On remarque également après l'application de défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau de dernière cellule observée dans le cas d'un enroulement sain.

IV.10.1.5- décharge partielle dans la 5^{ème} cellule :

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence du schéma de référence avec décharge partielle injectée dans la 5^{ème} cellule est illustrée dans la figure. (IV.11).

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

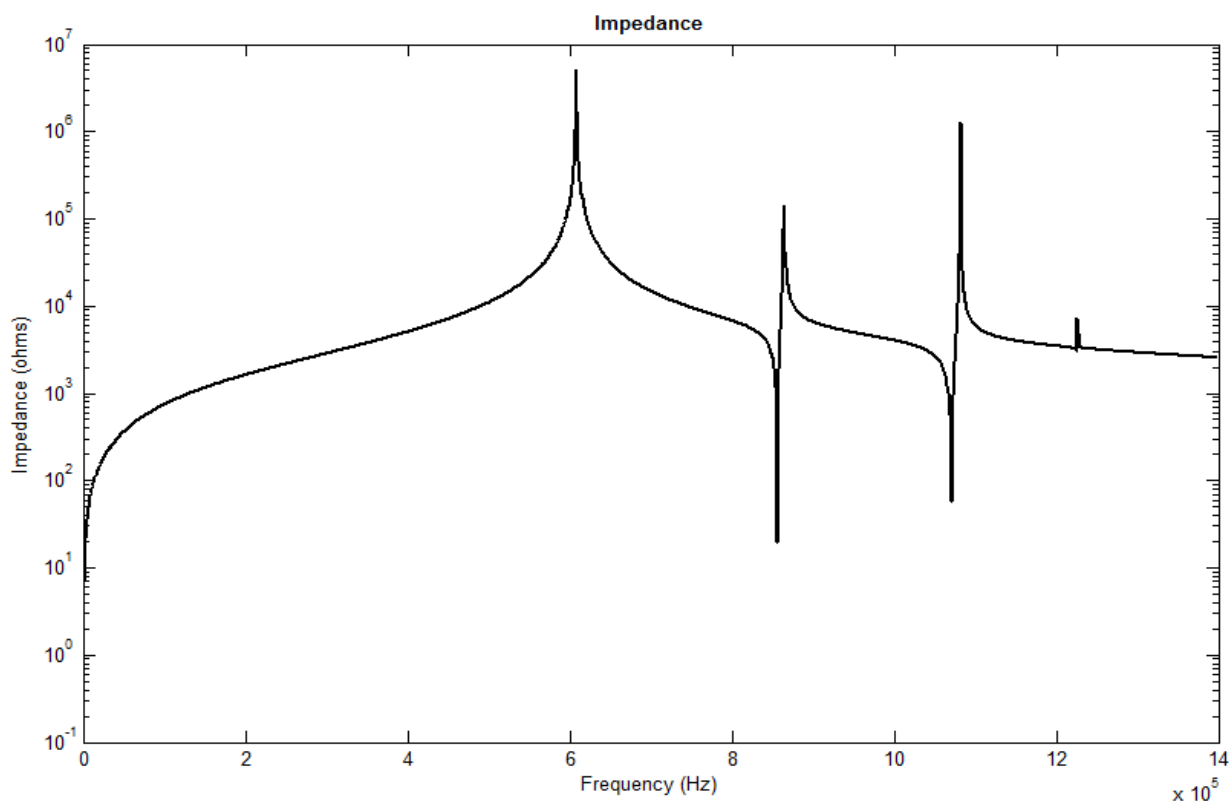


Figure (IV.11) : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence.

Le tableau IV.7 illustre les fréquences de l'enroulement sain et celle avec décharge partielle, ainsi que l'écart enregistré entre ces deux grandeurs.

| Enroulement sain | | Enroulement avec décharge | | Décalage | |
|------------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 608 | 856 | 74 | 99 |
| 780 | 963 | 865 | 1071 | 85 | 108 |
| 976 | 1130 | 1082 | 1225 | 106 | 95 |
| 1132 | 1239 | 1226 | - | 94 | - |
| 1241 | - | - | - | - | - |

Tableau (IV.7) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de décharge partielle entre la 5^{ème} cellule et un enroulement sain

Interprétation des résultats :

A partir de la comparaison entre l'empreinte d'impédance issue d'un enroulement sain et, celle d'un enroulement présentant un défaut de décharge partielle dans la 3^{ème} cellule, nous

avons observés un déplacement des fréquences (0_{cnf}) et de ($Scnf$) d'environ 70kHz -150kHz respectivement.

On remarque également après l'application de défaut, la disparition des fréquences de coupures au niveau des deux dernières cellules observées dans le cas d'un enroulement sain.

IV.10.1.6- Comparaison entre les défauts de décharge partielle et un enroulement sain :

La figure suivante représente les différentes impédances pour chacun des points de décharge partielle dans l'enroulement.

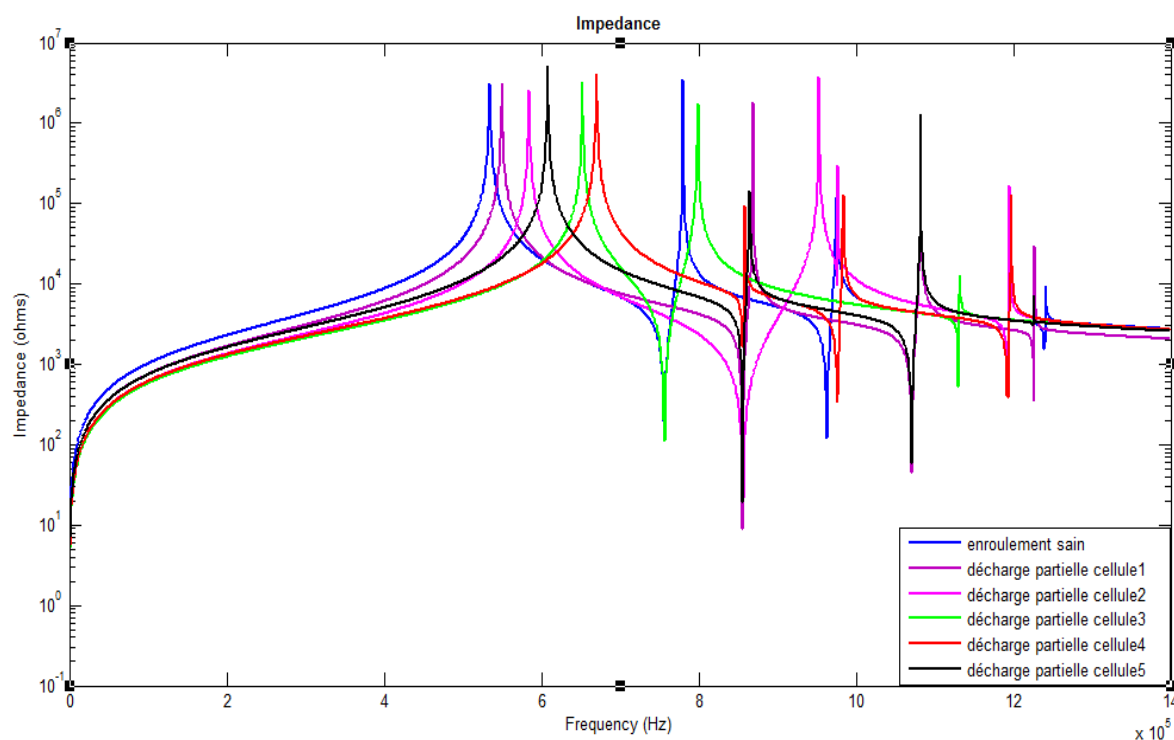


Figure (IV.12) : Les différentes impédances pour chacun des points de décharge partielle entre cellules et celle de l'enroulement sain.

La figure (IV.12) représente une comparaison entre les réponses de tous les défauts de décharge partielle et la réponse de l'enroulement à l'état sain. Nous avons constaté un déplacement du point de décharge partielle dans l'enroulement, ce qui explique le décalage vers la droite des fréquences de coupure des réponses fréquentielles de l'enroulement en défaut par rapport à la réponse de l'enroulement sain.

IV.11- Défauts de court-circuit sur l'enroulement :

Le court-circuit des spires est le défaut le plus nuisible et fréquemment rencontré au bobinage du transformateur, même si les risques d'ouverture de phase (conducteur coupé)

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

demeurent physiquement possibles, le court-circuit est le défaut le plus répandu et le plus dangereux pour une bobine d'un transformateur.

Le court-circuit entre cellules est simulé par une liaison galvanique de résistance faible entre les cellules concernées par le défaut, comme montrée sur la figure suivante :

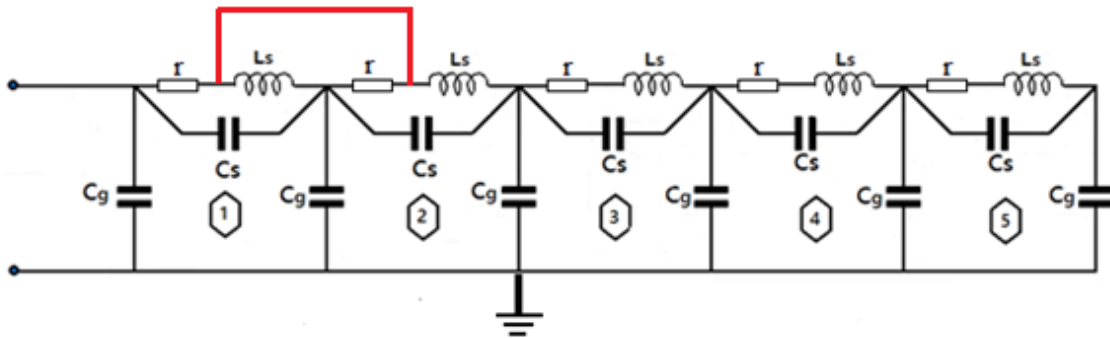
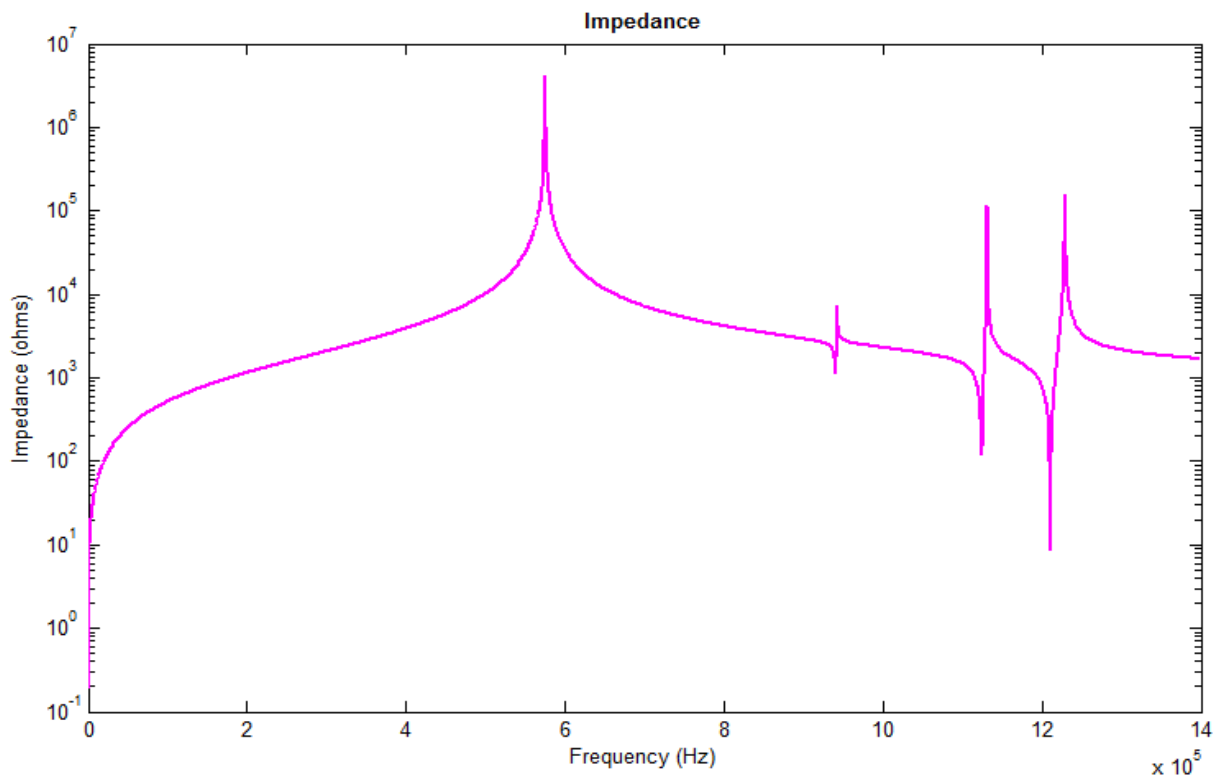


Figure (IV.13) : Schéma équivalent du bobinage avec court-circuit.

Dans le but de localiser le point de défaut de court-circuit dans les différents éléments de la bobine. Nous avons simulé le déplacement du point de court-circuit.

IV.11.1- Court-circuit entre la 1^{ère} et la 2^{ème} cellule :

La réponse $Z=f(f)$ est illustrée dans la figure. (IV.14).



Figure(IV.14) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 1^{ème} et le 2^{ème} élément et un enroulement sain.

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

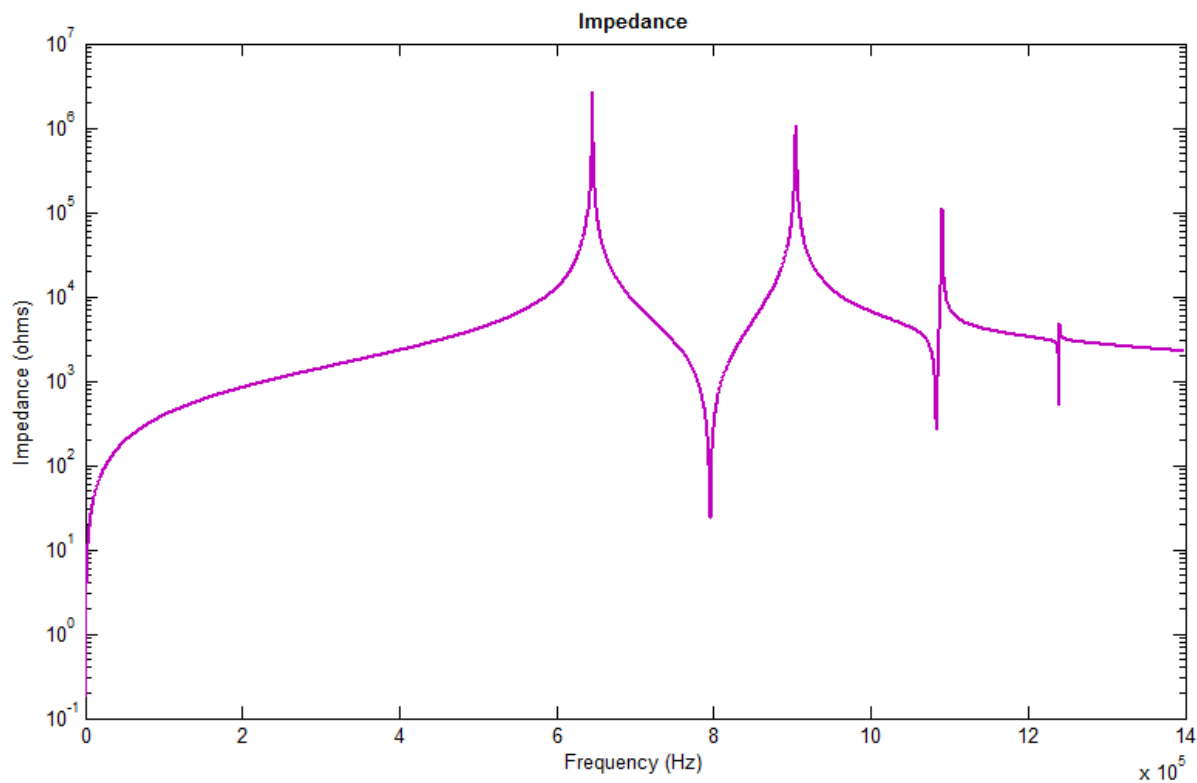
Les fréquences de coupures O_{cnf} , S_{cnf} obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le tableau (IV.8).

| Enroulement sain | | Enroulement en c-circuit entre le 1 ^{ème} et le 2 ^{ème} élément | | Décalage | |
|------------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| O_{cnf} (KHZ) | S_{cnf} (KHZ) | O_{cnf} (KHZ) | S_{cnf} (KHZ) | O_{cnf} (KHZ) | S_{cnf} (KHZ) |
| 534 | 757 | 575 | 940 | 41 | 183 |
| 780 | 963 | 942 | 1124 | 162 | 161 |
| 976 | 1130 | 1131 | 1211 | 155 | 81 |
| 1132 | 1239 | 1229 | - | 97 | - |
| 1241 | - | - | - | - | - |

Tableau (IV.8) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 1^{ème} et le 2^{ème} élément un enroulement sain.

IV.11.2- Court-circuit entre la 2^{ème} et la 3^{ème} cellule :

La réponse $Z=f(f)$ est illustrée dans la figure. (IV.15).



Figure(IV.15) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre la 2^{ème} et la 3^{ème} cellule et un enroulement sain.

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

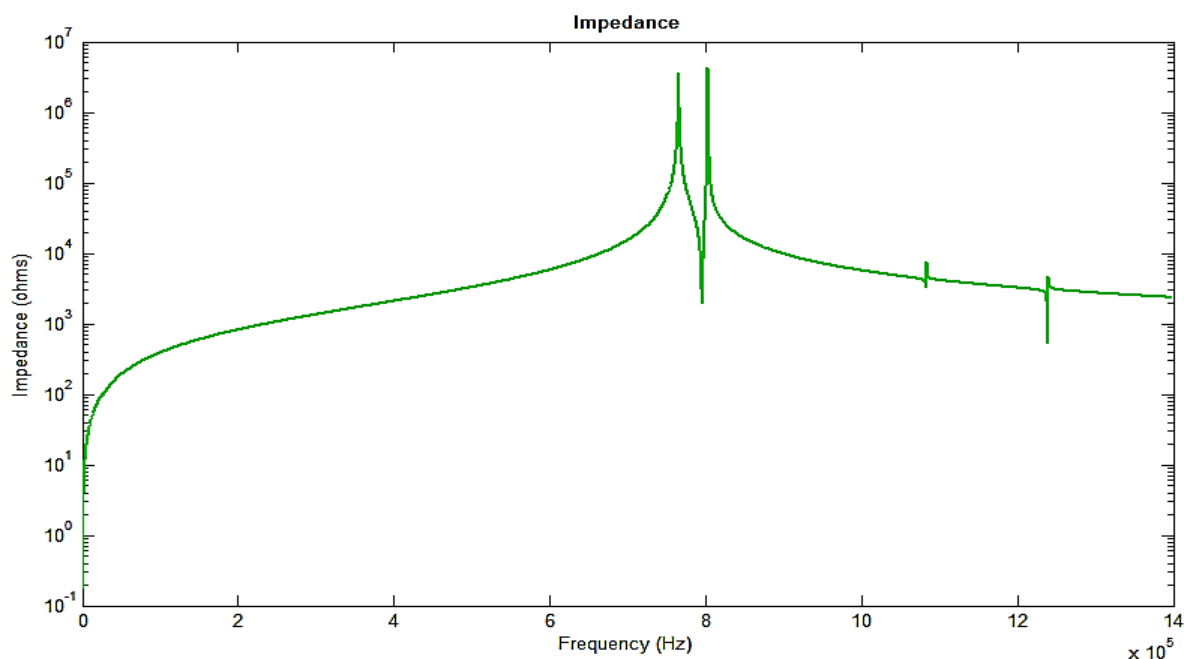
Les fréquences de coupures O_{cnf} , S_{cnf} obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.9).

| Enroulement sain | | Enroulement en c-circuit entre le 2 ^{ème} et le 3 ^{ème} élément | | Décalage | |
|------------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| O_{cnf} (KHZ) | S_{cnf} (KHZ) | O_{cnf} (KHZ) | S_{cnf} (KHZ) | O_{cnf} (KHZ) | S_{cnf} (KHZ) |
| 534 | 757 | 645 | 796 | 111 | 39 |
| 780 | 963 | 905 | 1084 | 125 | 121 |
| 976 | 1130 | 1091 | 1239 | 115 | 109 |
| 1132 | 1239 | 1240 | - | 108 | - |
| 1241 | - | - | - | - | - |

Tableau (IV.9) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 2^{ème} et le 3^{ème} élément un enroulement sain.

IV.11.3- Court-circuit entre la 3^{ème} et 4^{ème} cellule :

La réponse $Z=f(f)$ est illustrée dans la figure. (IV.16).



Figure(IV.16) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 3^{ème} et le 4^{ème} élément et un enroulement sain.

Les fréquences de coupures O_{cnf} , S_{cnf} obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.10).

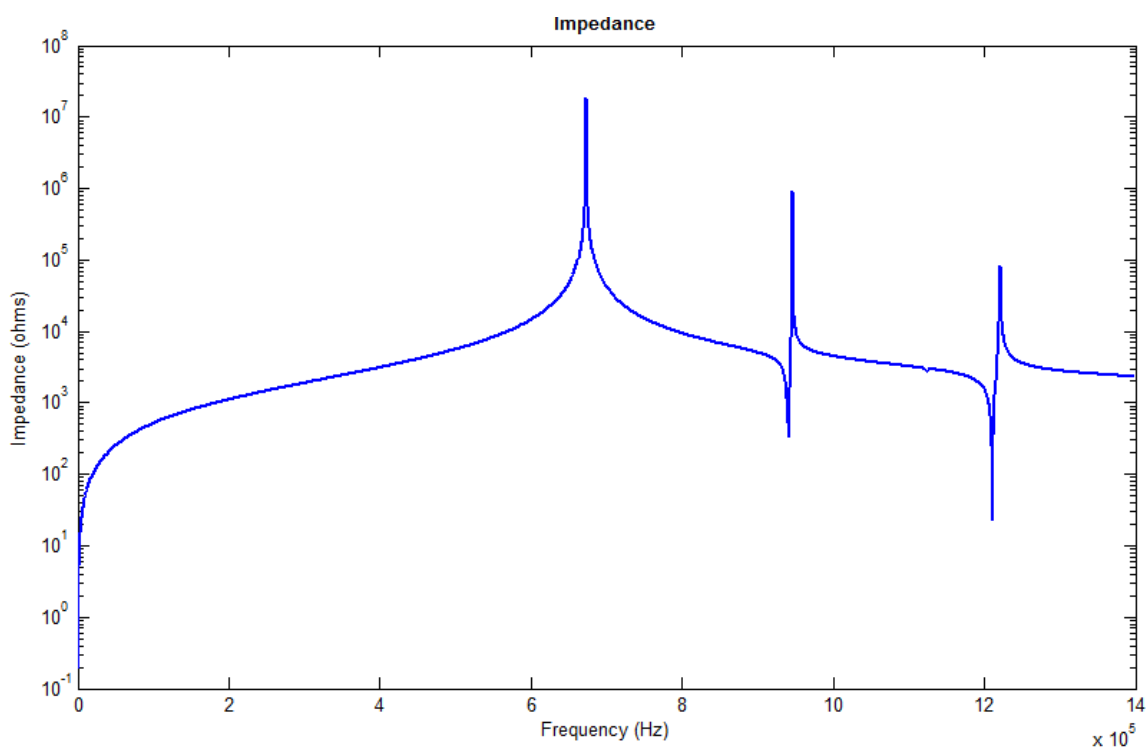
Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

| enroulement sain | | Enroulement en c-circuit entre le 3 ^{ème} et le 4 ^{ème} élément | | Décalage | |
|------------------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 765 | 796 | 231 | 39 |
| 780 | 963 | 803 | 1083 | 23 | 120 |
| 976 | 1130 | 1084 | 1239 | 108 | 108 |
| 1132 | 1239 | 1240 | - | 108 | - |
| 1241 | - | - | - | - | - |

Tableau (IV.10) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 3^{ème} et le 4^{ème} élément un enroulement sain.

IV.11.4- Court-circuit entre la 4^{ème} et la 5^{ème} cellule :

La réponse $Z=f(f)$ est illustrée dans la figure. (IV.17).



Figure(IV.17) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de court-circuit entre le 4^{ème} et le 5^{ème} élément et un enroulement sain.

Les fréquences de coupures Ocnfs, Scnfs obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.11).

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

| Enroulement sain | | Enroulement en c-circuit entre le 3 ^{ème} et le 4 ^{ème} élément | | Décalage | |
|------------------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 673 | 941 | 139 | 184 |
| 780 | 963 | 946 | 1124 | 166 | 161 |
| 976 | 1130 | 1125 | 1211 | 149 | 81 |
| 1132 | 1239 | 1221 | - | 89 | - |
| 1241 | - | - | - | - | - |

Tableau (IV.11) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court-circuit et entre le 4^{ème} et le 5^{ème} élément et un enroulement sain.

IV.11.5- Comparaison de la réponse en fréquence entre les défauts de court-circuit et l'enroulement sain :

La figure suivante représente les différentes impédances pour chacun des points de court-circuit.

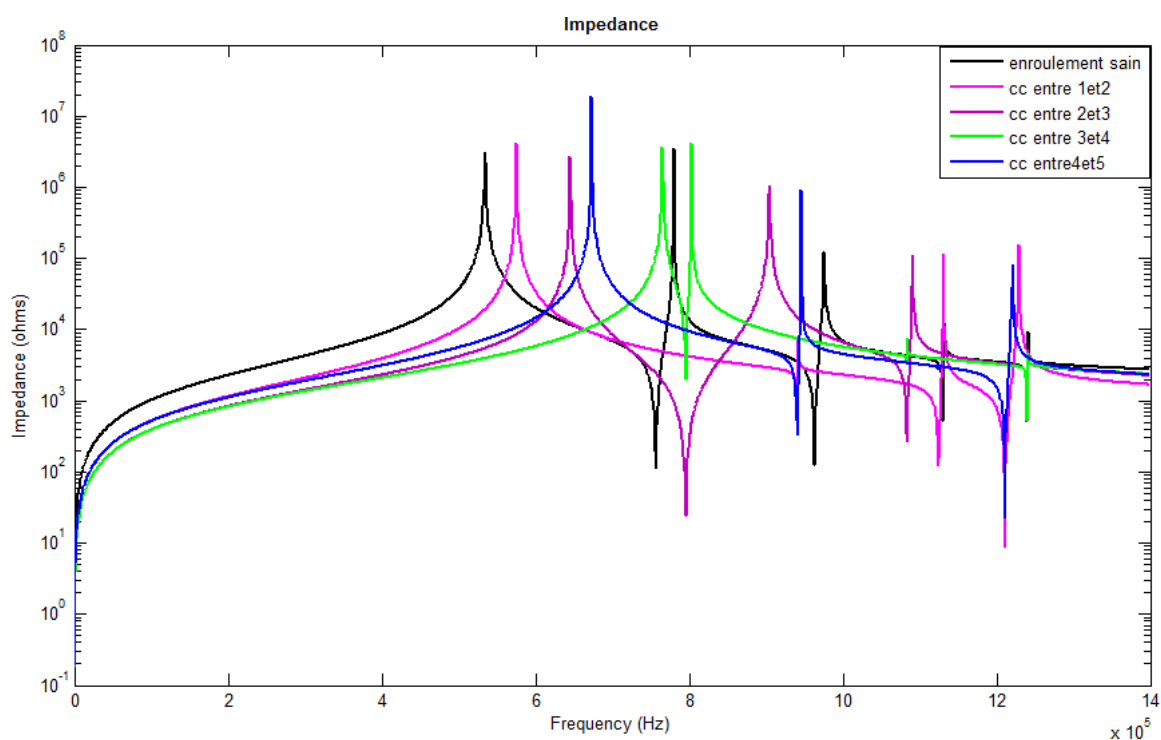


Figure (IV.18) : Les différentes impédances pour chacun des points de court-circuit entre élément et spires et celle de l'enroulement sain.

Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus, on a constaté : la présence du défaut de court-circuit sur l'enroulement, une atténuation d'impédance de l'ordre de 30% par rapport à la réponse d'un enroulement sain. Un décalage de fréquence de coupure de la première résonance vers la droite de l'ordre de 250KHz, les réponses de l'enroulement affecté par le défaut par rapport à l'enroulement sain, il a noté que ce décalage s'éloigne vers la droite avec le court-circuit s'éloigne de l'entrée vers la sortie du bobinage. La figure IV. 18 illustre les différents cas.

IV.12- Ouverture des cellules :

Dans cette partie, la résistance dans la cellule concernée est augmentée à une valeur très grande et les autres paramètres restées inchangées, comme montrée sur la figure suivante :

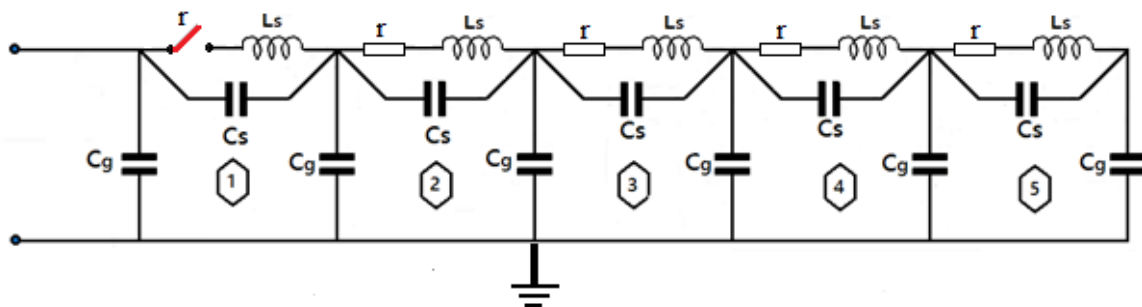


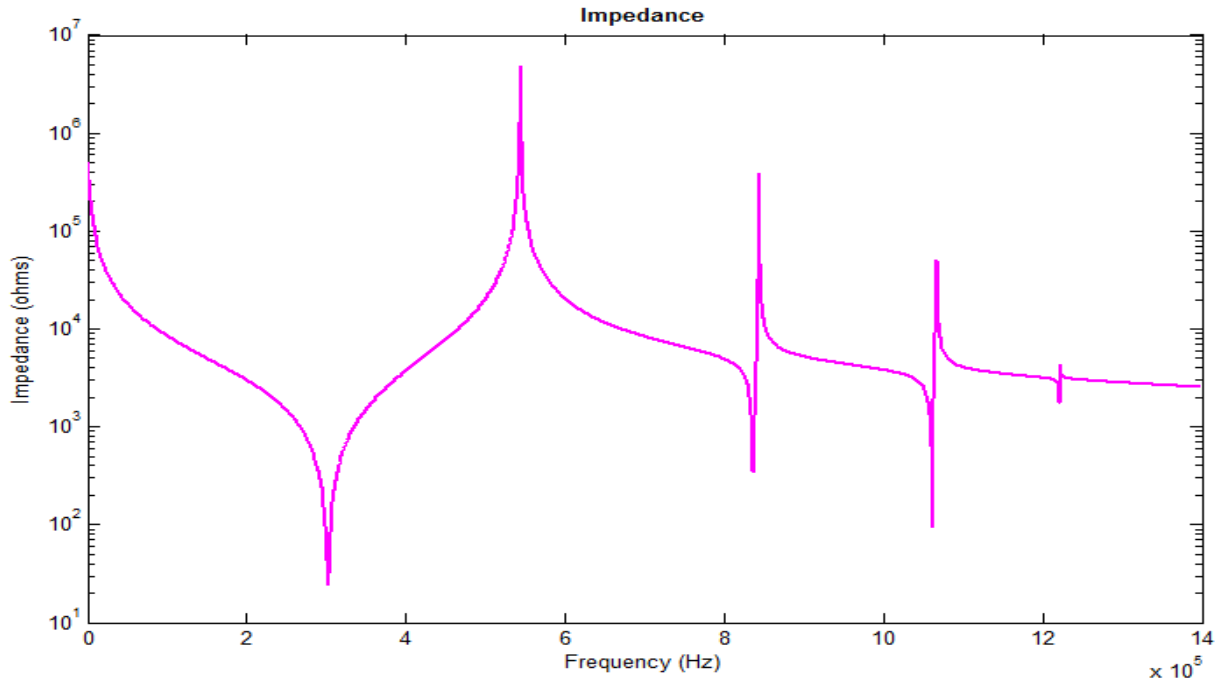
Figure (IV.19) : Schéma équivalent du bobinage avec ouverture de cellule.

Dans le but de localiser le point de défaut d'ouverture de cellule dans les différents éléments de la bobine. Nous avons simulé le déplacement du point de défaut.

IV.12.1- Ouverture de la 1^{ère} cellule :

La réponse $Z=f(f)$ est illustrée dans la figure (IV.20).

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance



Figure(IV.20) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire à la 1^{ème} cellule.

Les fréquences de coupures $Ocnfs$, $Scnfs$ obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.12).

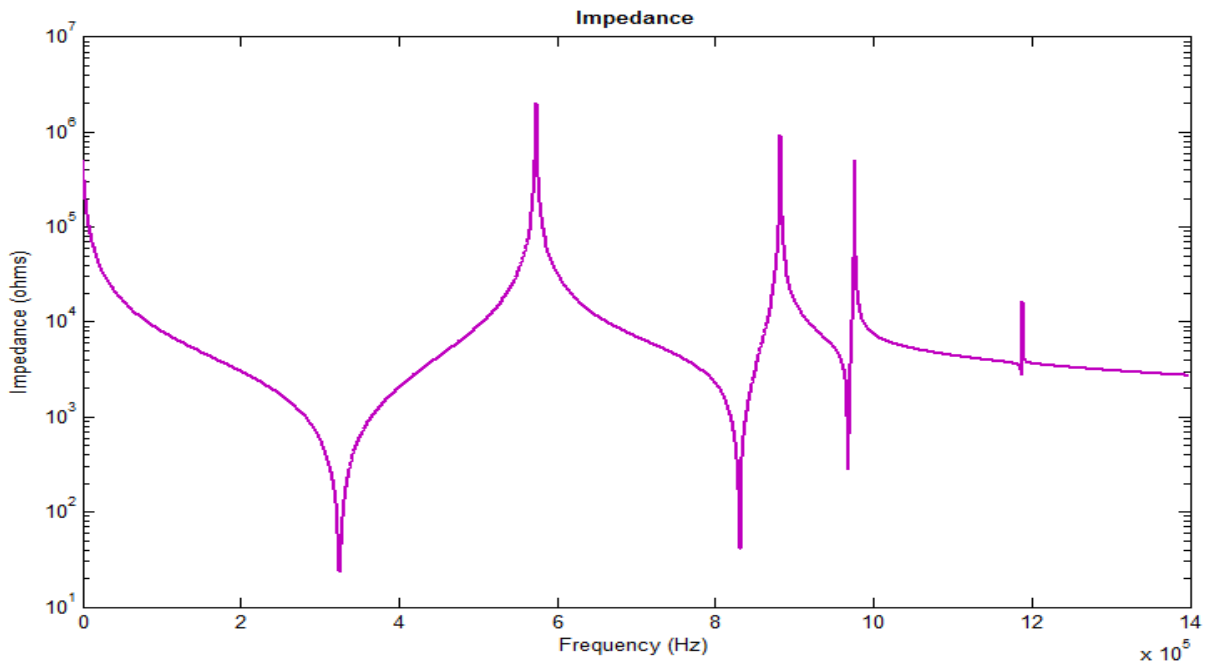
| enroulement sain | | enroulement en ouverture de spire au 1 ^{ère} cellule | | Décalage | |
|------------------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 0 | 302 | 534 | 455 |
| 780 | 963 | 544 | 836 | 236 | 127 |
| 976 | 1130 | 844 | 1061 | 132 | 69 |
| 1132 | 1239 | 1067 | 1221 | 65 | 18 |
| 1241 | - | 1122 | - | 119 | - |

Tableau (IV.12) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 1^{ème} cellule et l'enroulement sain.

IV.12.2- Ouverture de la 2^{ème} cellule :

La réponse $Z=f(f)$ est illustrée dans la figure(IV.21).

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance



Figure(IV.21) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire au 2^{ème} cellule.

Les fréquences de coupures $Ocnfs$, $Scnfs$ obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.13).

| enroulement sain | | enroulement en ouverture de spire au 2 ^{ème} cellule | | Décalage | |
|------------------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 0 | 325 | 534 | 432 |
| 780 | 963 | 574 | 831 | 206 | 132 |
| 976 | 1130 | 882 | 968 | 94 | 162 |
| 1132 | 1239 | 976 | 1187 | 156 | 52 |
| 1241 | - | 1188 | - | 53 | - |

Tableau (IV.13) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 2^{ème} cellule et l'enroulement sain.

IV.12.3- Ouverture de la 3^{ème} cellule :

La réponse $Z=f(f)$ est illustrée dans la figure(IV.22).

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

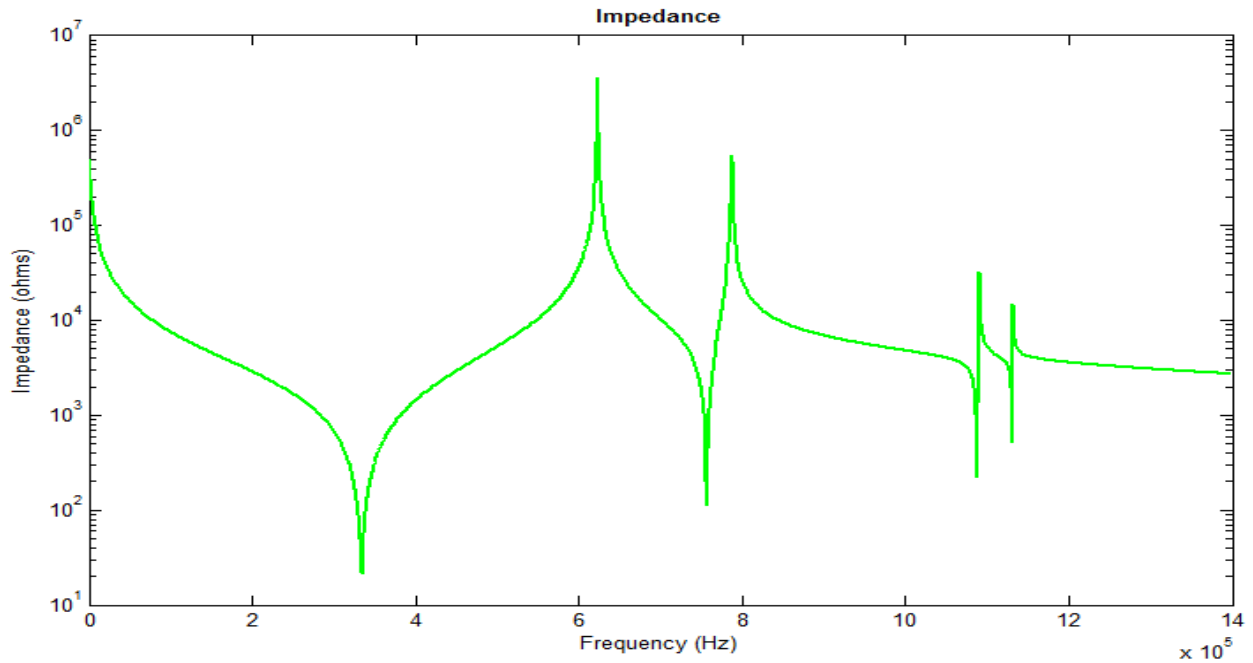


Figure (IV.22) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 3^{ème} cellule.

Les fréquences de coupures $Ocnfs, Scnfs$ obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.14)

| enroulement sain | | enroulement en ouverture de spire au 3 ^{ème} cellule | | Décalage | |
|------------------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 0 | 334 | 534 | 423 |
| 780 | 963 | 623 | 757 | 79 | 206 |
| 976 | 1130 | 787 | 1087 | 189 | 43 |
| 1132 | 1239 | 1091 | 1130 | 41 | 109 |
| 1241 | - | 1132 | - | 109 | - |

Tableau (IV.14) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 3^{ème} et l'enroulement sain.

IV.12.4- Ouverture de la 4^{ème} cellule :

La réponse $Z=f(f)$ est illustrée dans la figure(IV.23).

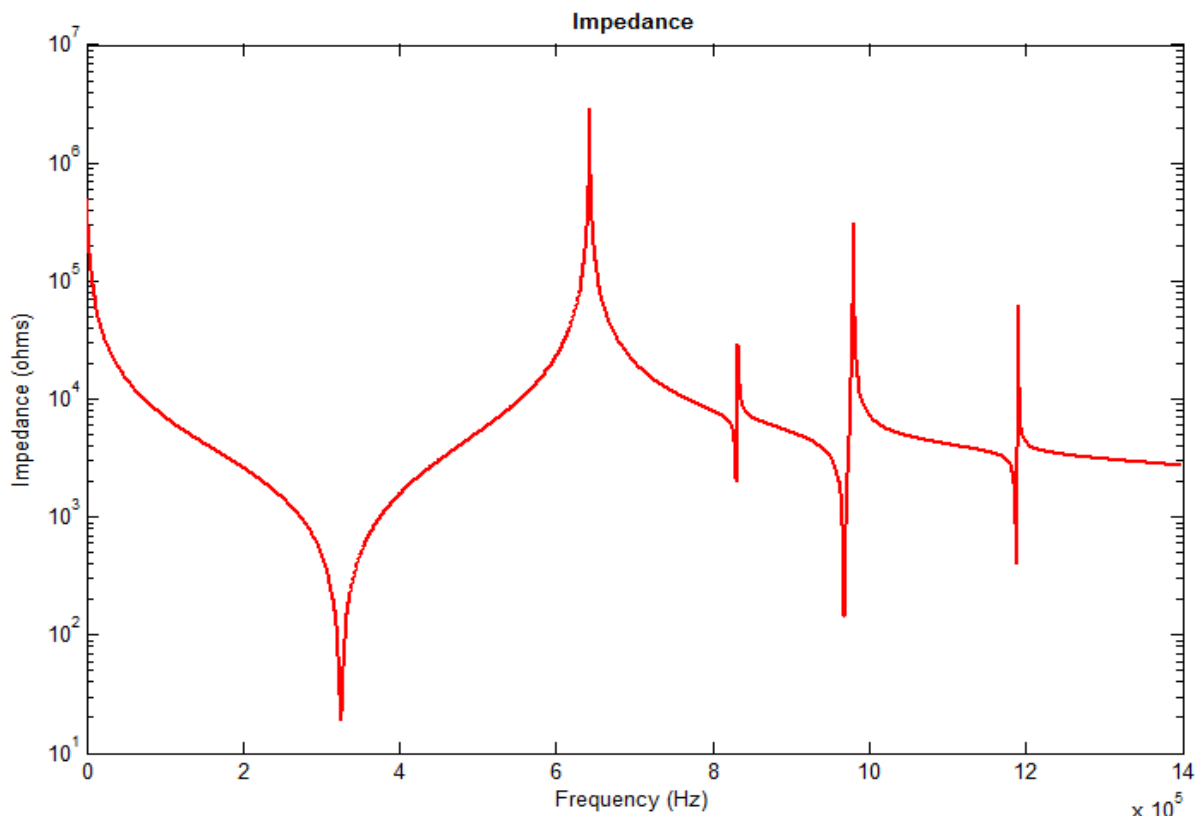


Figure (IV.23) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 4^{ème} cellule.

Les fréquences de coupures $Ocnfs, Scnfs$ obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.15).

| Enroulement sain | | Enroulement en ouverture de spire au 4 ^{ème} cellule | | Décalage | |
|------------------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) | Ocnf(KHZ) | Scnf(KHZ) |
| 534 | 757 | 0 | 325 | 534 | 432 |
| 780 | 963 | 643 | 831 | 137 | 132 |
| 976 | 1130 | 832 | 968 | 144 | 162 |
| 1132 | 1239 | 980 | 1188 | 152 | 51 |
| 1241 | - | 1190 | - | 51 | - |

Tableau (IV.15) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 4^{ème} cellule et l'enroulement sain.

IV.12.5- Ouverture de la 5^{ème} cellule :

La réponse $Z=f(f)$ est illustrée dans la figure(IV.24).

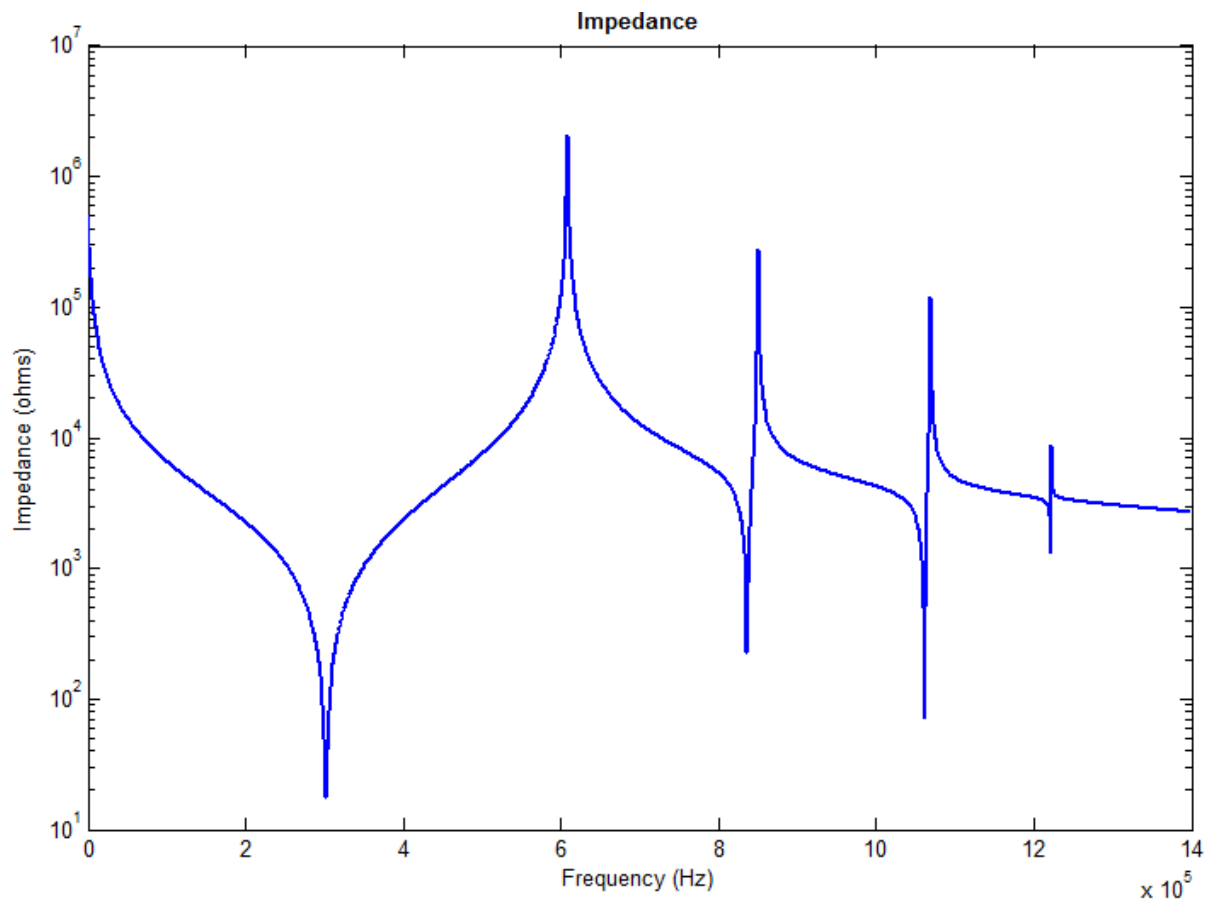


Figure (IV.24) : La réponse en fréquence d'un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au 5^{ème} cellule.

Les fréquences de coupures O_{cnfs} , S_{cnfs} obtenues dans les deux enroulements sont présentées dans le Tableau (IV.16).

| Enroulement sain | | Enroulement en ouverture de spire au 5 ^{ème} cellule | | Décalage | |
|------------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| O_{cnf} (KHZ) | S_{cnf} (KHZ) | O_{cnf} (KHZ) | S_{cnf} (KHZ) | O_{cnf} (KHZ) | S_{cnf} (KHZ) |
| 534 | 757 | 0 | 302 | 534 | 455 |
| 780 | 963 | 609 | 836 | 171 | 127 |
| 976 | 1130 | 851 | 1061 | 125 | 69 |
| 1132 | 1239 | 1069 | 1221 | 63 | 18 |
| 1241 | - | 1222 | - | 19 | - |

Tableau (IV.16) : Comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de l'ouverture de spire au le 5^{ème} cellule et l'enroulement sain.

IV.12.6- Comparaison de la réponse en fréquence entre les défauts d'ouverture des cellules et un enroulement sain :

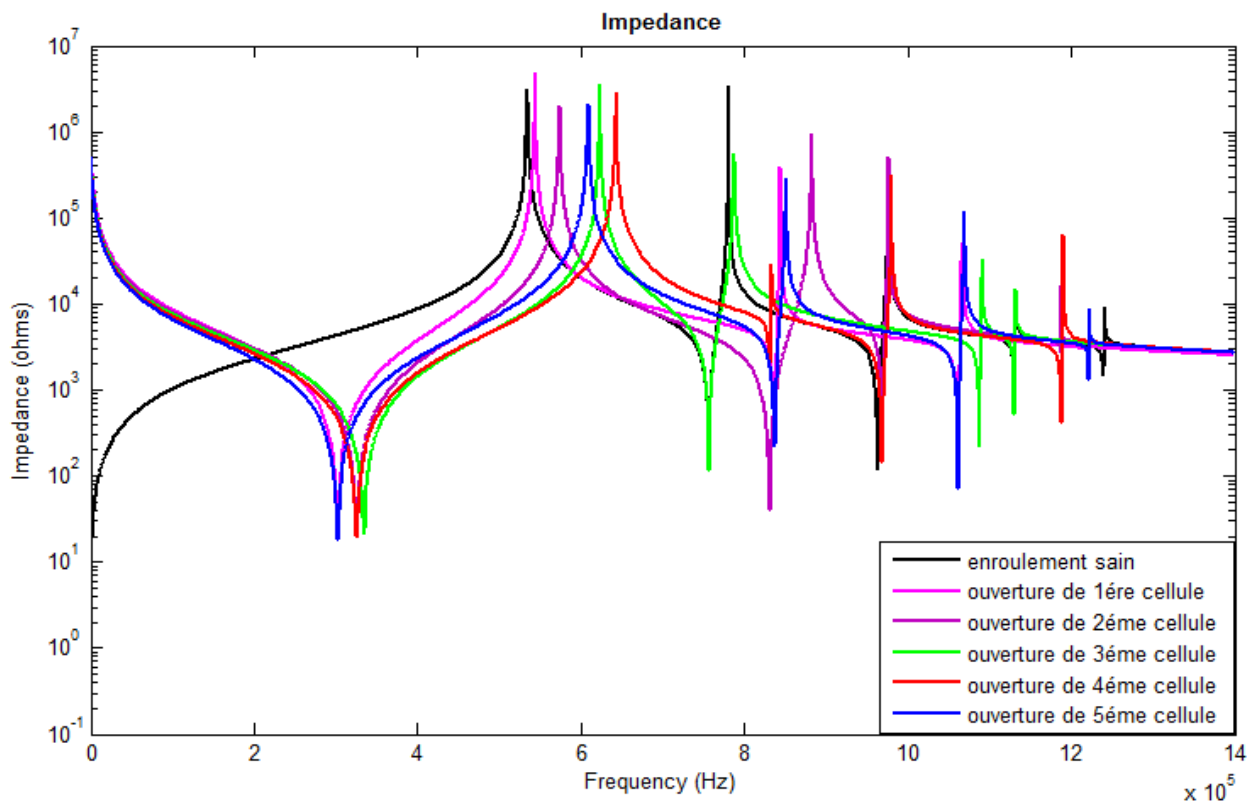


Figure (IV.25) : Les différentes impédances pour chacun des points de circuit ouvert des spires et celle de l'enroulement sain.

Interprétation des résultats :

Lors de défaut lié au circuit ouvert ou à la coupure de spire de l'enroulement, la FRA nous indique l'apparition de pic de résonance O_{cnf} à 0Hz.

Les tableaux IV.12 jusqu'à IV.16 représentent la comparaison entre O_{cnf} et S_{cnf} des enroulements sains et présents une ouverture au niveau de la 1^{ère} jusqu'à la 5^{ème} cellule respectivement, montrent que les O_{cnfs} et S_{cnfs} associée à l'enroulement défectueux se décalent vers la droite par rapport à celle d'un enroulement sain ce qui est illustré sur la figure (IV.25).

IV.13- Localisation de défaut de long de l'enroulement :

Dans le but de localiser un défaut une étude a été effectuée par l'intermédiaire de la fréquence des pics.

L'histogramme représente la comparaison entre les différentes valeurs des fréquences de premier pic dans le cas d'un enroulement sain d'une part et d'autre part dans le cas d'un défaut.

Chapitre IV : Localisation des défauts d'un enroulement du transformateur de puissance

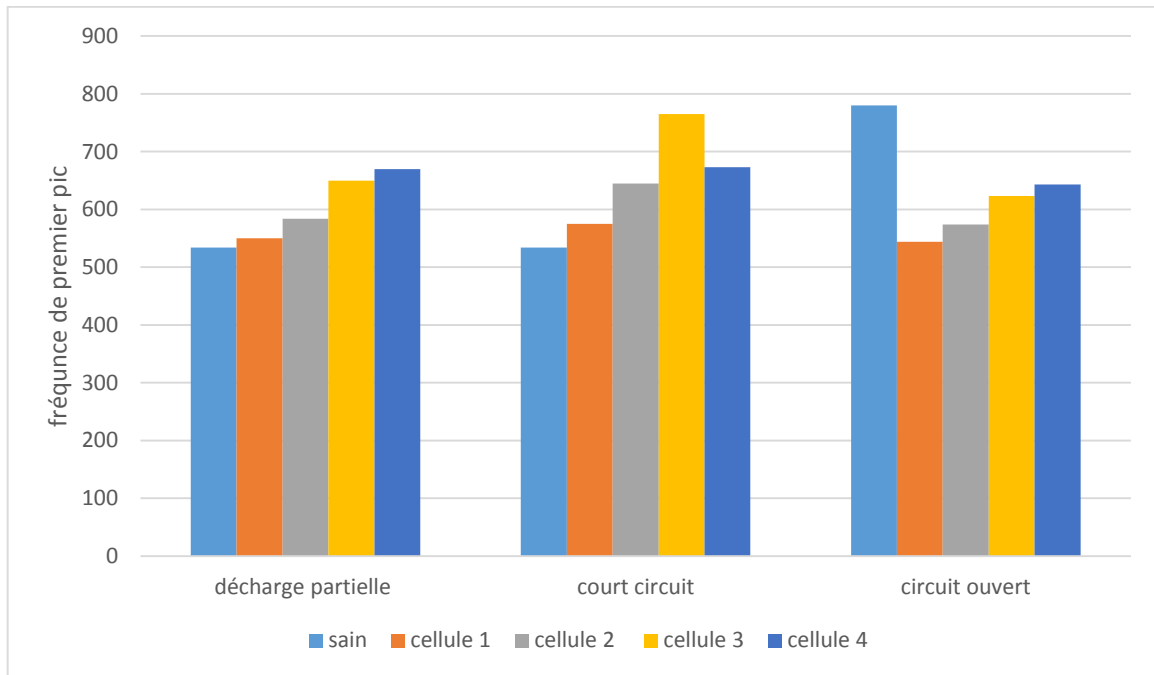


Figure (IV.26) : La comparaison entre les différentes valeurs des fréquences de premier pic dans le cas d'un enroulement sain d'une part et d'autre part dans le cas d'un défaut.

D'après la figure on a constaté une augmentation des valeurs des fréquences de premier pic le long de l'enroulement, cette augmentation est plus remarquable sur la cellule concernée par le défaut.

Les changements dans l'allure de la réponse fréquentielle d'un transformateur, tel que le déplacement, l'apparition ou disparition des pics de résonances indiquent que le transformateur est en défaut.

On remarque une augmentation élevée des valeurs des fréquences dans le cas de court-circuit par rapport à celle de décharge partielle, cette augmentation peut être considérée comme moyen de classification de défaut.

Dans les trois cas de figure étudiés, on remarque une augmentation des valeurs des fréquences de premier pic à la position du défaut par rapport celles de le cas d'un enroulement sain. Ce changement des fréquences au point d'injection de défaut peut être considéré comme un moyen de localisation de défaut.

IV.14- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploité la méthode PSO pour identifier les paramètres de l'enroulement du transformateur. Pour cet objectif, nous avons démontré par simulation la procédure à suivre pour assurer un bon résultat.

Nous avons constaté que la présence d'un tel défaut dans l'enroulement du transformateur provoque une variation de sa réponse en fréquence.

D'après la simulation effectuée, nous avons constaté que l'analyse fréquentielle de l'impédance peut être un outil de détection de la nature et de localisation d'un défaut qui survient le long de l'enroulement. Elle a le potentiel pour détecter des avaries dans les enroulements.

Basé sur des données mesurées, la localisation des défauts discrets (décharge partielle, court-circuit et ouverture des spires) dans un enroulement de transformateur réel a été démontrée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le diagnostic de défaut des transformateurs de puissance par l'analyse de la réponse en fréquence a fait l'objectif de ce mémoire. L'analyse de la réponse en fréquence est l'un des outils de diagnostic le plus utilisé pour la détection de défauts et l'évaluation de leurs états.

Afin de cerner notre problématique nous avons opté pour le modèle basé sur la discrétisation de l'enroulement par une cascade de cellules RLC, ce modèle nous a servi de référence pour la validation d'un autre modèle que nous avons proposé, ce dernier est basé sur la réponse en fréquence de l'impédance de l'enroulement.

Le modèle que nous avons jugé le plus adéquat pour notre étude est celui 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 permettra de modéliser les enroulements des transformateurs de grande puissance et d'étudier leurs comportements internes (répartition de la tension le long de l'enroulement, le gradient de tension, les fréquences de résonance...). Cependant, il est important de trouver les bonnes procédures qui permettront le calcul des paramètres du modèle afin d'avoir une bonne précision dans les résultats.

Le calcul des paramètres du modèle adopté a été effectué par l'application de la méthode intelligente PSO.

Les différents défauts qui peuvent avoir lieu dans l'enroulement du transformateur ont été réalisés sur un transformateur et simulés en utilisant le modèle adopté de l'enroulement.

Nous avons constaté que la présence d'un tel défaut dans l'enroulement du transformateur provoque une variation de sa réponse en fréquence.

D'après l'étude menée on peut tirer les points suivants :

- Les défaillances liées aux décharges partielles de l'enroulement se manifestent par des pics de résonances dans la zone (100 kHz). Ces réponses, se manifestent par un décalage de fréquence de coupure de défaut vers la droite de l'enroulement sain.
- Les défauts de court-circuit entre cellule, se manifestent par des pics de résonance dans la région (3-100 kHz) : avec un déplacement vers la droite de ces pics en fonction des défauts le long de l'enroulement.
- Les défauts liés aux ouvertures de cellule de l'enroulement apparaissent comme des perturbations sur la réponse en gain même aux faibles fréquences, ces perturbations sont importantes dans le premier pic de fréquence.

Conclusion générale

- Une augmentation de fréquence de coupure de défaut de court-circuit par rapport au défaut de décharge partielle.

Comme perspective pour ce travail on propose :

- ✓ La mise en pratique de la décharge partielle dans un bobinage.
- ✓ Elargir la base donnée de défaillances par une détection automatique du défaut tel que les Réseaux de Nouerons Artificiels (NRA).

- [1] : Théodore Wildi, Gilbert SYBILLE, “ ELECTROTECHNIQUE : transformateur ”. 4e édition, Bibliothèque Nationale, Paris, juin 2005.
- [2] : Omicron electronics ‘FRAnalyzer Manuel d’utilisation’ Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006.
- [3] : Sonelgaz DEPT GRTE formation sur le diagnostic des transformateurs de puissance « Méthodes de diagnostic de transformateur E. cottens janvier 2008 ».
- [4] : Document SONELGAZ « Ecole technique de Blida les transformateurs de puissance ».
- [5] : 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° 3, avril 1961, p. 121-125.
- [7] : Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE octobre 2008 ».
- [8]: 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.
- [9] : Pauwels international service « formation générale sur les transformateurs de puissance GRTE octobre 2008 ».
- [10] : Mr ZELLAGUI Mohamed, « Etude protection des réseaux électriques mt 30& 10 kv », mémoire de magister université de Constantine. Juillet 2010.
- [11] : Christophe Ferrier. « Étude des huiles et des mélanges à base d’huile minérale pour transformateurs de puissances-recherche d’un mélange optimal ». Thèse de doctorat, L’école centrale de Lyon (Année 2005).
- [12] : T.Noda, H. Nakamoto, S.Yokoyama, « Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies », IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.
- [13] : Jean Sanchez, « Aide au diagnostic des défauts des transformateurs de puissance » université Grenoble alpes, 2011.
- [14] : Piere. Mayé, « Aide-mémoire, électrotechnique », Duond, paris, 2006, ISBN20
- [15] : DERBALI RABAH, « Diagnostic et Localisation des Défauts dans les Enroulements du Transformateur » Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2012.
- [16] : Abdelkebir Amir, Saadi Nassim, « Application de la logique floue pour le diagnostic des transformateurs de puissance par analyse des gaz dissous », Mémoire de master, Faculté des Sciences de l’Ingénieur, Université de Boumerdes, Juin 2017.

- [17] : MEZARI Naouel, « Diagnostic des transformateurs de puissances », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzou. Juillet 2011
- [18] : Tenue des transformateurs en cas de défauts internes, Raux / Leconte / Gibert, CIREC 89.
- [19] : Groupe Schneider « cahier technique n° 192 protection de transformateur MT/BT.
- [20]: NenadKartalovic, DraganKovacevic, and Srd-anMilosavljevic, “An Advanced Model of Partial Discharge in Electrical Insulation” FACTA universitatis. April 2011, Vol. 24, NO. 1, pp. 43-57.
- [21]: Steven A. Boggs, “Partial Discharge: Overview and Signal Generation”IEEE Electrical Insulation Magazine July/August 1990-Vol.6, No.4 pp. 33-39.
- [22]: C. L. Wadhwa, “High Voltage Engineering”, New Age International (P) Ltd., Publishers, 2010.
- [23]: T. S. Ramu and H. N. Nagamani, “Partial Discharge Based Condition Monitoring Of High Voltage Equipment”, New Age International (P) Ltd., Publishers, 2010.
- [24]: E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel, High voltage engineering: fundamentals, Published by Elsevier, ISBN 0-7506-3634-3, second edition, 2005.
- [25]: Danikas M.G., Papagioutopoulos D. “Partial discharges in solid insulation cavities: A theoretical analysis and a comparison with experimental results”, Facta Universitatis, Ser: Elec. Energy., Vol. 15, No. 3, pp. 385-398, 2002.
- [26]: Edin H., Partial Discharges Studied with Variable Frequency of the Applied Voltage. Sept 14, Stockholm, Sweden: Kungl Tekniska Högskolan, TRITAEEK-0102., 2001.
- [27]: RamanujamSarathi, Prathap D. Singh and Michail G. Danikas, “Characterization Of Partial Discharges In transformer Oil Insulation Under AC And DC Voltage Using Acoustic Emission Technique” Journal of Electrical Engineering, 2007, Vol. 58, NO. 2, pp. 91–97.
- [28]: Mehdi Nafar, Taher Niknam and Amirhossein Gheisari, “Using correlation coefficients for locating partial discharge in power transformer” ELSEVIER Journal Electrical Power and Energy Systems 2011 pp.493–499.
- [29] : Tahar Seghier, «Étude des décharges partielles et leurs influences sur l'apparition des arborescences dans la couche isolante des câbles haute tension», Thèse de Doctorat, Département Génie électrique, Université Mohamed Khider – Biskra, Février 2011.
- [30]: Achillides.Z, Kyriakides.E & Georgiou.G.E, «Partial Discharges and Associated Transients: The Induced Charge Concept versus Capacitive Modeling», IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 6; December 2008.

- [31]: K. Ragavan, L. Satish, «Localization of changes in a model winding based on terminal measurements: experimental study», IEEE Trans. Power Deliv, 2007, 3, pp. 1557–1565.
- [32]: Charles Sweetser, B.Sc., M.Sc. Dr. Tony McGrail, ‘Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications A Technical Paper from Doble Engineering’ Version 1.0, 01/2003.
- [33] : Andrianirina RAKOTOMALALA, « contribution à la modélisation des transformateurs De puissance en régime haute fréquence » Thèse de Doctorat de l’Université de Nantes, Le 27 octobre 2006.
- [34]: Wilcox D.J., «Theory of transformer modelling using modal analysis », IEE Proceedings C, Vol. 138, No.2, March, 1991, pp. 121 -1 28.
- [35] : Ahmad AHMAD, «Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute fréquence » Thèse de doctorat, L’école centrale de Lyon, 1992.
- [36]: S.Chimklai, R. Marti, «Simplified three-phase transformer model for electromagnetic transients». IEEE Transaction on power delivery Vol: 10, No: 3, July 1995.
- [37]: G. Andrieu, E. Dauphant, D. Boss, «A frequency-dependant model for a MV/LV transformer.” International conference power systems transients (IPST), Budapest, Hungary, June 20-24, 1999.
- [38] : H.Houassine « Etude des surtensions dans les blocs alternateur-transformateurs des centrales électriques », Thèse de Doctorat, Département Génie électrique, Université de TiziOuzou 2010.
- [39] : Gueller.B, Veverka.A, «Processus impulsionnelles dans les machines électriques», Energya, Moscou, 1973.
- [40]: 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.
- [41]: M. Mahvi, V. Behjat,“ Localizing low-level short-circuit faults on the windings of power transformers based on low-frequency response measurement of the transformer windings”, IET Electric Power Applications, pp. 533–539, 2015.
- [42] : A. Chanane, O. Bouchhida, H. Houassine,“ Investigation of the transformer winding high frequency parameters identification using particle swarm optimization method”, IET Electric Power Appl., 2016, Vol. 10, Iss. 9, pp. 923–931
- [43] : A. Chanane, Diagnostic des défauts dans les enroulements de transformateur, Thèse de Doctorat, Département Génie électrique, Université de MEDEA, 2015.
- [44]: Kennedy, J., Eberhart, R.: „Particle swarm optimization“. IEEE Proc. Int. Conf. Neural Netw, Perth, WA, 1995, pp. 1942–1948

الملخص :

هذا العمل هو دراسة ونمذجة لللفات محولات الكهرباء لتشخيصه باستخدام تقنية تحليل استجابة التردد. حيث تم اعتماد لف، تم تقسيمه إلى خمسة أقراص متطابقة كل قرص يحتوي على 30 حلقة ذو قطر متوسط 200ملم.

بعد التحقق من صحة النموذج المعتمد من خلال خوارزمية الأسراب، عملنا دراسة تشخيصية لللف المحولات لدراسة الأعطال المختلفة في لفائفه من خلال تحليل أسلوب التردد.

هذه النتائج تم استعمالها كقاعدة بيانات لأجل كشف وتحديد أماكن الأعطال في لفات المحولات الكهربائية

مفتاح الكلمات: المحولات، التشخيص، تحليل التردد، خوارزمية الأسراب، كشف أماكن الأخطاء

Résumé :

Ce travail est une étude et modélisation des enroulements du transformateur en vue de son diagnostic en utilisant l'analyse de réponse en fréquence (FRA). Et cette enroulement discrétise en 5 disque chaque disque 30 tour de 200 mm.

Après avoir validé le modèle adopté par la méthode Optimisation par Essaim de Particules (PSO), nous avons l'exploités pour une étude de diagnostic de l'enroulement du transformateur. Pour étudier les différentes défaillances de l'enroulement avec la technique d'analyse fréquentielle. Les résultats obtenus sont discutés. Ces résultats sont utilisés comme une base de données pour la détection et localisation des défauts dans les enroulements de transformateur.

Mot clés : Transformateur, Diagnostic, Analyse fréquentiel(FRA), Optimisation par Essaim de Particules (PSO), détection et la localisation des défauts.

Summary:

This work is a study and modeling of transformers windings for its diagnosis. And this winding discredited in 5 hard disk; each disc contains 30 rounds of 200 mm average diameter.

After having validated the model adopted by Particle Swarm Optimization (PSO) method, we operated for a diagnostic study of the transformer winding. For study the various failures of the coil with the frequency analysis technique. These results are used as a database for detecting and locating faults in the transformer windings.

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