MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE D_R. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
Département du Génie Electrique



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en électrotechnique
Spécialité : *Réseaux électriques*

THEME :

Optimisation des paramètres de bobinage d'un transformateur

Proposé et dirigé par :

Dr. HOUASSINE Hamza.

Préparé et présenté par :

M.BOUKHMIKHEM Oussama.
M^{lle}.ATTROUSSI Wassila

Année Universitaire 2016-2017.

Remerciement

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

Nous adressons de chaleureux remerciements à notre encadreur M. HOUASSINE Hamza, Docteur à l'université Yahia Farés de Médéa pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail, et Sahnoune chaouche moustafa nous les remercies encore pour son aide si précieuse sur les plans conseils et orientations. Nous remercions les membres du jury pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelles perspectives.

Nous remercions également tous les enseignants de département d'électrotechnique de L'université Yahia Fares de Médéa qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.

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

Dédicace

Avant tout, je remercie « ALLAH »qui nous a aidés à élaborer ce modeste travail.

Je dédie ce modeste travail Tout d'abord:
A mes parents pour toute l`affection tendresse et l`attention qu`ils mont témoignes et les sacrifices qu`ils ont bien voulu me consentir pour la réussite Dans mes études.
Á tous ma grande famille « BOUKHMIKHEM »
Á ma sœur « la petite princesse » « Asma »
Á mes très chers amis
Á mon professeur et promotors M. houassine hamza
Á Toutes le Département génie électrique
Á Toutes les enseignent de master 2 réseaux électriques «Promotion 2017»

OUSSAMA

Dédicace

Avant tout, je remercie « ALLAH »qui nous a aidés à élaborer ce modeste travail.

J'ai l'immense honneur de dédier ce modeste travail :

A mes très Cher parents pour toute l`affection, tendresse et l`attention qu`ils mont témoignes et les sacrifices

Qu`ils ont bien voulu me consentir pour la réussite Dans mes études.

Á mes frères « Yacine , Riyadh ,Rebeh,Mohamed et Hicham »

Á ma chère et seul sœurs « Manel » et mon amis « Sara »

Á toues les tantes et touts les oncles

Á touts(es)mes cousins

Á toutes la famille « ATTROUSSI et FARHANI»

Á mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université dont les conseils précieux m'ont guidé; qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance

Á mon professeur et promotor M.houassine

Á Toutes le Département génie électrique

Á Toutes les enseignent de réseaux électriques «Promotion 2017»

WASSILA

الملخص :

هذه المذكرة متمثلة في النمذجة النبضية للفات المحول الكهربائي من اجل تشخيص اعطابه

حساب النموذج النبضي للمحول تم ب الاستعانة بخوارزمية '' recuit-simuler'' ولقد تم اثبات نجاعة هذه الطريقة تجريبيا على نوعين من اللفات .

تشخيص الاعطاب ب داخل اللفات تم بادخال تغيرات على النموذج المرجعي التي تمثل اعطاب شهيرة في لفات المحول .

مفتاح الكلمات :محول كهربائي ,تحليل توتري ,Recuit simulé ,تشخيص .

Résumé :

Ce mémoire consiste en la modélisation fréquentielle de l'enroulement du transformateur dans l'objectif de son diagnostic. Le calcul des paramètres du circuit de référence équivalent à l'enroulement est effectué e utilisant l'algorithme 'recuit simulé', ce dernier a été validé expérimentalement sur deux types d'enroulements. Le diagnostic de défaut dans l'enroulement a été réalisé en introduisant des variations paramétriques qui traduisent des défauts usuels dans les enroulements du transformateur.

Mots clé : Transformateur, Analyse fréquentielle, Recuit simulé, diagnostic.

Abstract:

This memory consists in the frequency modeling of the winding of the transformer for the purpose of its diagnosis. The calculation of the parameters of the reference circuit equivalent to the winding is carried out using the simulated annealing algorithm; the latter has been validated experimentally on two types of windings. The fault diagnosis in the winding was carried out by introducing parametric variations, which reflect the usual defects in the transformer windings.

Key words: Transformer, frequency analysis, simulated annealing, diagnostics.

Sommaire :

Résumé……..……I

Sommaire...……..II

List des figures……..……V

List des tableaux. ……...VI

Introduction général……..…VIII

Chapitre I : transformateur et ses défaillances

Introduction :.....1

I-1 Généralité sur les transformateurs :.....1

I-1-1 Définition :.....1

I-1-2 Principaux éléments des transformateurs :.....1

I-1-3 Principe de fonctionnement.....1

I-1-4 Différents types de transformateurs :.....2

I-1-4-1 Transformateur à colonnes :.....2

I-1-4-1-1 Limitations des transformateurs à colonnes :.....3

I-1-4-2 Transformateurs triphasés :.....3

I-1-5 Groupe de couplage :.....4

I-1-5-1 Couplages normalisés :.....4

I-1-5-1-1 Couplage étoile –étoile :.....4

I-1-5-1-2 Couplage triangle-étoile.....5

I-1-5-1-3 Couplage étoile –zigzag :.....5

I-2- Circuit magnétique.....6

I-3- Enroulements.....8

I-3-1 Les types des défauts dans l'enroulement :.....10

I-3-1-1 Court-circuit entre spires *:*.....11

I-3-1-2 Déformation géométrique des enroulements :.....11

I-3-1-3 Amorçage diélectrique entre spires :.....12

Conclusion :.....13

Chapitre II: Modélisation des enroulements du transformateur en régime HF

Introduction :.....14

II-1 Modèle conventionnelle de l'enroulement en HF :.....14

II-2 Analyse fréquentielle de l'enroulement HF pour le diagnostic :.....15

II-2-1 Principe de la méthode 15

II-3 Identification des paramètres de l'enroulement par l'algorithme de recuit simulé : 16

II-3-1 Synthèse du circuit de référence :.....16

II-3-2 Présentation le recuit simulé ……..22

II-3-3 Utilisation du recuit simulé pour la détermination des paramètres du schéma équivalant.....23

Conclusion : 24

Chapitre III : Application

Introduction :.....25

III-1 Identification des paramètres de l'enroulement 25

III-1-1 premier cas d'étude : 25

III-1-1-1 La mesure de la réponse fréquentielle de l'enroulement 25

III-1-1-2 Identification des paramètres de l'enroulement par l'algorithme recuit simulé 27

III-1-1-3 Validation les résultats :.....30

III-I-2 deuxième cas d'étude : une bobine avec noyau de fer :.....30

III-I-2-1 La mesure par FRA technique 30

III-I-2-2 Identification des paramètres de cet enroulement par l'algorithme recuit simulé.....33

III-1-2-3 Validation les résultats 35

III-2 Détection les défauts de l'enroulement 36

III-2-1 Un défaut de court-circuit longitudinale 36

III-2-2 Défaut de court-circuit transversal 38

III-2-3 Un defaut de circuit overte 40

Conclusion…….....41

Conclusion général

Référence

Liste des figures :

Fig. I.1 : circuit magnétiques et électrique liés. 2

Fig. I.2 : transformateur à colonnes 3

Fig. I.1-a: couplageYy0 4

Fig. I.1-b : Diagramme vectoriel……4

Fig. I.2 -a: couplage Dy11..... 5

Fig. I.2-b : Diagramme vectoriel……5

Fig. I.3 -a: couplage Yz11…… 5

Fig. I.3-b : Diagramme vectoriel ……..5

Fig. I.4 -a : Hystérésis du circuit magnétique 7

Fig. I.4 -b : Circuit magnétique triphasé à 3 colonne ……..……7

Fig. I.5- a: Enroulement de transformateur..... 9

Fig. I.5 -b: Disposition relative des enroulements (coupe d'un ½ enroulement)..... 9

Fig. I.6 : Court-circuit entre spires 11

Fig. I.7 : Déformation mécanique d'un Enroulement..... 12

Fig. I.8: Amorçage entre spires, sans court-circuit entre-elle 12

Fig. II.1: Circuit équivalent d'un enroulement de transformateur……. …….14

Fig. II.2: réponse en fréquence (l'impédance et la phase)……15

Fig. II.3:mesure du point de conduite Impédance de du modèle (a) Et (b) phase……17

Fig. II.4: comparaison entre le recuit simulé et une heuristique classique……...23

Fig.III.1: la Réponse en fréquence de la modèle d'enroulement..... 25

Fig.III.2: Le model équivalant l'enroulement de 6 section 26

Fig.III.3 : les résultats obtenus par la résolution du polynôme d'ordre 6..... 28

Fig.III.4: identification entre la courbe FRA mesurées et estimées 29

Fig.III.5 : montage de mesure les paramètres d'une bobine avec noyau..... 31

Fig.III.6: Impédance (z) en fonction de la fréquence (f) mesurées……31

Fig.III.7:Modèle d'enroulement avec noyau de 2 sections……32

Fig.III.8: les résultats obtenus par la résolution du polynôme d'ordre 2……33

Fig. III.9: la Réponse en fréquence des paramètres estimer par le recuit simule 35

Fig.III.10 : un court-circuit longitudinal à section 1……...36

Fig.III.11 : la courbe de Z (f) des défauts de court circuit longitudinal pour chaque section…….37

Fig. III.12 : défaut de court-circuit transversal sur la section 1……38

Fig.III.13 : l'impédance en fréquence mesurées de court circuit transversal 39

Fig. III.14 : Un défaut de circuit ouvert à section 1..... 40

Fig.III.15 : les graphes de l'impédance en fréquence des défauts de circuit ouvert sur le model pour chaque section 40

Liste des tableaux :

Tableau II.1 : Polynomial dans l'ordre descendant de Cs……..….....21

Tableau.III.1 : les paramètres mesurés par RLC mètre 26

Tableau. III.2 : les Osnf et Scnf mesurées par le model d'enroulement 27

Tableau.III.3 : la bande minimale et maximale des paramètres à estimes. 28

Tableau.III.4: le paramètre estimé par le recuit simulé 29

Tableau.III.5: Valeurs mesurées et valeurs estimées des Scnf et Osnf avec l'erreur 30

Tableau.III.6 : les paramètres mesurés par LCR-mater 31

Tableau.III.7: les Osnf et Scnf mesurées par le model d'enroulement 32

Tableau. III.8 : la bande minimale et maximale des paramètres. 34

Tableau. III.9: les paramètres estimées par le recuit simuler 34

Tableau.III.10: Valeurs mesurées et valeurs estimées des Scnf et Osnf avec l'erreur 35

Tableau.III.11: le 1er ocnf de chaque section après le défaut 37

Tableau.III.12: le 1er ocnf de chaque section après le défaut 39

Tableau.III.13: les ocnf pour chaque section après le défaut 41

Introduction générale

Le transformateur de puissance est le composant le plus complexe et le plus critique du réseau électrique.

L'apparition d'un défaut dans le réseau électrique provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des contraintes dans ce dernier. Ces contraintes se traduisent par des forces axiales et radiales appliquées sur les enroulements du transformateur.

La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à des fortes sollicitations mécaniques. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entrainer des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux.

La surveillance de la santé du transformateur de puissance est importante pour la fiabilité de l'alimentation électrique .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 faite de résistances, inductances et capacités (circuit RLC).

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.

L'objectif de l'étude menée dans le cadre de ce mémoire est la modélisation de l'enroulement du transformateur en régime fréquentiel pour son exploitation dans le domaine de diagnostic des défaillances.

Pour répondre à la problématique posée, ce mémoire est subdivisé en trois chapitres.

Le premier chapitre est dédié aux notions générales sur le transformateur et aux différentes avaries qui y peuvent l'affecter.

La modélisation de l'enroulement du transformateur en régime fréquentiel ainsi que la méthodologie de calcul des paramètres du modèle adopté dans le cadre de cette étude par l'algorithme ‘’recuit simulé’’ sont présentées dans le second chapitre.

Le troisième chapitre de ce mémoire, est une application expérimental sur des enroulement réel dont laquelle l'algorithme « recuit simulé» est utilisé pour l'optimisation de calcul de paramètres du modèle de l'enroulement afin de synthétiser le modèle de référence qui sera une base pour l'étude de défaillance dans l'enroulement test .

A la fin de ce manuscrit, une conclusion regroupant les différents points retenus au cours de cette étude est présentée.

CHAPITRE I

Le transformateur et ses défaillances

Introduction :

Le transformateur de puissance occupe une place importante dans les réseaux électrique, il permet un acheminement d'électricité depuis les centrales électriques jusqu'au

Consommateurs final.

Ce chapitre est consacré à la présentation de quelques généralités sur les transformateurs et les différentes avaries internes qui peuvent avoir lieu dans ses enroulements.

I-1 Généralité sur les transformateurs :

I-1-1 Définition :

Un transformateur est une machine électrique qui convertie une tension électrique alternative en tension d'une autre valeur en conservant la fréquence.

Le transformateur ne possède pas de pièces en mouvement, il est qualifié de machine statique.

Les transformateurs permettent de transmettre une puissance électrique. La tension et le courant alternatif fournis au primaire sont transformés en une ou plusieurs tensions et courant secondaire .cette transformation se fait à travers un circuit magnétique ; les primaires et les secondaires sont parfaitement isolés.

I-1-2 Principaux éléments des transformateurs :

D'une manière générale, un transformateur est constitué d'un circuit magnétique feuilleté et d'un ensemble de bobines séparées par des écrans électrostatiques qui entourent des noyaux magnétiques. Chaque bobine formant le milieu conducteur est organisée en paquets de spires et chaque spire étant constituée de brins élémentaires. Les différents types de transformateurs se distinguent suivant la disposition géométrique de leurs constituants,

de la forme de leur circuit magnétique et du type de refroidissement.

I-1-3 Principe de fonctionnement

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable Øcircule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement ($d\emptyset/dt$) et au nombre de spire que comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire.

Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique tel que montré par la Fig. (I-1).

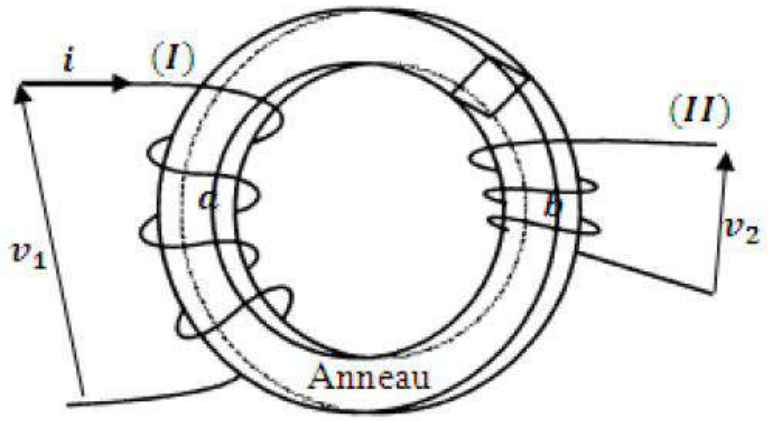


Fig. I.1 : circuit magnétiques et électrique liés.

I-1-4 Différents types de transformateurs :

Il existe différents types de transformateurs, permet cette types on a :

I-1-4-1 Transformateur à colonnes :

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses généralement de sections circulaires afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique (Fig. I.2)

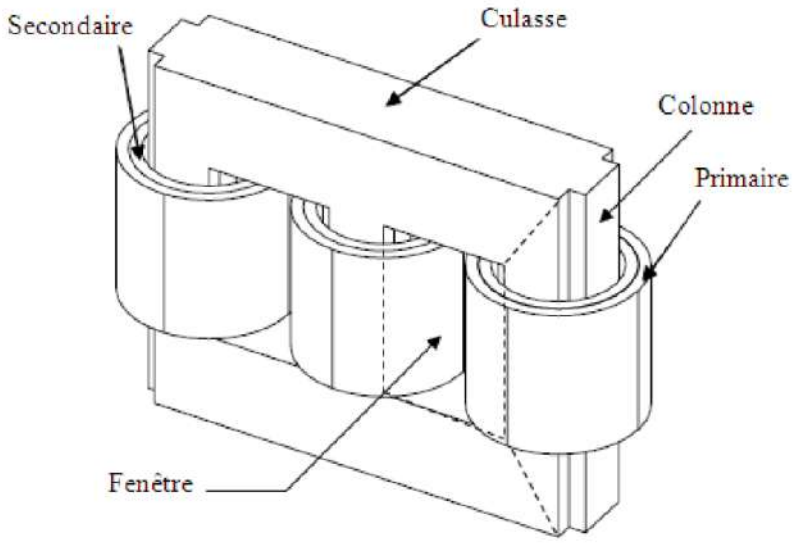


Fig. I.2 : transformateur à colonnes [1]

I-1-4-1-1 Limitations des transformateurs à colonnes :

Le circuit magnétique des transformateurs à colonnes est plus grand en volume que celui d'un type cuirassé. Par conséquence, le nombre de spires et le rapport volumique entre les matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont plus importants. Par ailleurs ce type de construction qui à fait ses preuves pour des puissances relativement faibles (environ jusqu'à 30 KVA), présente quelque difficultés pour des fortes puissances (plus de 100 KVA) et des tensions plus élevées. Pour des tensions supérieures à 220 KV, certains constructeurs ont abandonné la construction du transformateur à colonne au profit de la structure cuirassée.

I-1-4-2 Transformateurs triphasés :

Les transformateurs triphasés sont présents à différents endroits dans les réseaux électriques pour adapter les valeurs efficaces des tensions aux niveaux souhaitables. De façon simplifiée,

L'énergie électrique est produite dans les centrales sous des tensions moyennes. Le transport à longue distance exige des hautes tensions afin de limiter les pertes par effet Joule et réduire le dimensionnement des conducteurs, et l'utilisation demande des tensions basses ou moyennes. Des transformateurs élévateurs sont nécessaires au départ, et des transformateurs abaisseurs sont indispensables à l'arrivée coté consommateurs.

I-1-5 Groupe de couplage :

Le groupe de couplage désigne l'association des couplages des enroulements choisis pour la haute tension et pour la basse tension. L'enroulement haute tension d'un transformateur triphasé de nombre de spires peut être connecté en étoile (symbole Y) ou en triangle (symbole D). L'enroulement basse tension avec un nombre de spires peut être connecté en étoile (symbole y), en triangle (symbole d) ou en zigzag (symbole z). Les systèmes des tensions du primaire et du secondaire d'un transformateur triphasé sont en général déphasés avec un angle θ. Comme cette angle est multiple de $\pi/6$, on définit l'indice horaire par: $I = \theta/(\pi/6)$.

I-1-5-1 Couplages normalisés :

Trois couplages sont particulièrement utilisés en pratique : ce sont les couplages normalisés Yy 0, Dy 11, Yz 11.

I-1-5-1-1 Couplage étoile –étoile :

Pour le couplage étoile –étoile, les tensions aux bornes des bobines du primaire est du secondaire de la même colonne sont des tensions simples (Fig. I.1-a). Ce qui permet de construire le diagramme vectoriel (Fig. I.1-b). Le rapport de transformation est $m = N_2/N_1$ Le déphasage θ de basse tension par rapport à la haute tension est nul, ce qui donne un indice horaire I=0.

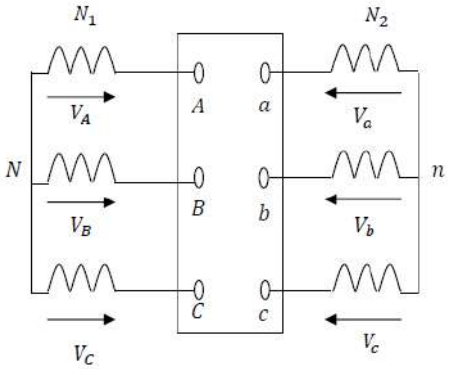


Fig. I.1-a: couplageYy0

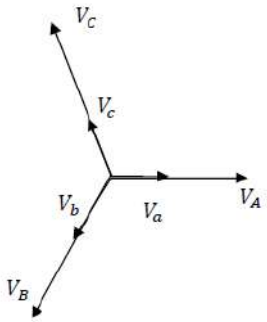


Fig. I.1-b : Diagramme vectoriel

I-1-5-1-2 Couplage triangle-étoile

Pour le couplage triangle-étoile la tension aux bornes d'une phase du primaire est une tension composée, alors que la tension aux bornes de la phase correspondante du secondaire est une tension simple (Fig. I.2-a). Le rapport de transformation est m=$\sqrt{3}.(N1/N2)$. Le déphasage θ entre les tensions du primaire et le secondaire est de (-π/6), ce qui veut dire l'indice horaire est I=11. (Fig. I.2-b).

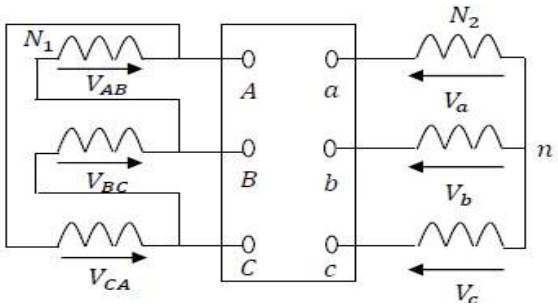


Fig. I.2 -a: couplage Dy11

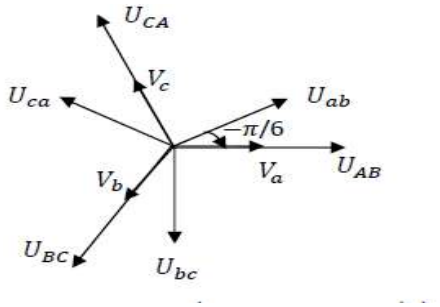


Fig. I.2-b : Diagramme vectoriel

I-1-5-1-3 Couplage étoile –zigzag :

Pour le couplage étoile zigzag (Fig. I.3 -a), la tension aux borne d'une phase du primaire est une tension simple alors qu'une tension aux bornes d'une phase du secondaire est la somme des deux tensions aux bornes de demi bobines ce qui permet de construire le diagramme vectoriel (Fig. I.3-b). Le rapport de transformation est m=$\sqrt{3}.(N1/N2)$.

Le déphasage entre les tension est de (-π /6) , en choisissant la première détermination position positif de l'angle, ce qui veut dire l'indice horaire est I=11.

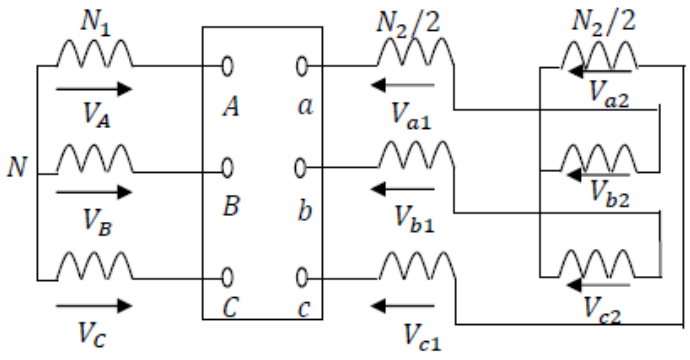


Fig. I.3 -a: couplage Yz11

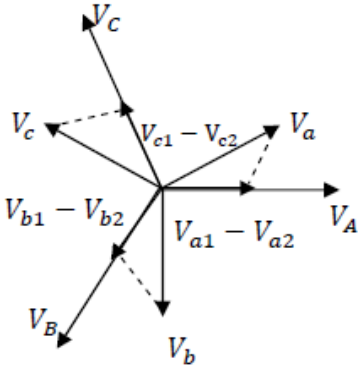


Fig. I.3-b : Diagramme vectoriel

Le choix de couplage s'effectue à partir de nombreux critères :

- Dimensionnement des enroulements :
- An très haute tension, on aura intérêt à choisir un couplage étoile pour que chaque bobine n'ait à supporter que : U '= U / 3
- Pour les très forts courants, on préférera le montage triangle ou chaque enroulement n'est parcouru que par un courant d'intensité : J= I /$\sqrt{3}$
- Fonctionnement déséquilibré:

- Aux faibles déséquilibres (≤10% .I Ligne), primaire et secondaire seront couplé en étoile avec conducteur de neutre.
- Si le déséquilibre est plus important, le primaire restera en étoile mais le secondaire en zig-zag.
- Si le déséquilibre et la puissance sont importants, on utilisera un montage triangle étoile pour économiser du cuivre au secondaire [2].

Rapport de transformation :

Par définition m = $\frac{Uab}{UAB}$

Ce rapport dépend non seulement du nombre de spires primaires est secondaires, mais aussi du couplage au primaire et au secondaire.

Indice horaire :

Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre des tensions primaire et secondaires et homologue, c'est à dire apparaissant entre les bornes désignées par les mêmes lettres (V_A,V_a) ou (U_{AB} ,U_{ab})

En pratique le déphasage θ obtenu est toujours un multiple de 30^0

θ: retard d'une tension BT sur son HT

L'indice horaire I est: I = θ / 30^0 $0 \leq I \leq 11$ (entier) [2].

I-2 Circuit magnétique :

Depuis plusieurs années les circuits magnétiques sont constitués de tôles magnétiques de fer laminées à froid, dites à « cristaux orientés », permettant un passage optimum du flux magnétique

Dans leur sens, isolées en surface avec de la Carlitte, qui est un revêtement minéral isolant.

Le choix des tôles et le calcul du circuit magnétique complet sont fonction de l'induction souhaitée

Dans celui-ci, de l'épaisseur des tôles et de leurs pertes spécifiques. Classiquement cette induction

Est d'environ 1,7 tesla et se situe avant la partie en saturation de la courbe B(H) du matériau (Fig. I.4 -a), B (l'induction magnétique) étant fonction de la tension et H (champ magnétique) du courant.

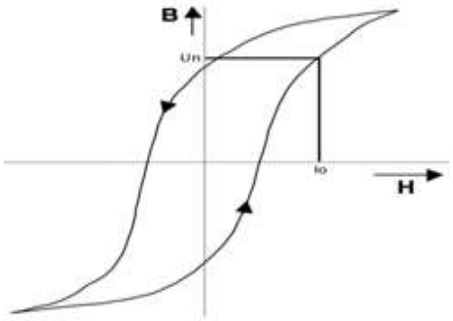


Fig. I.4 -a : Hystérésis du circuit magnétique

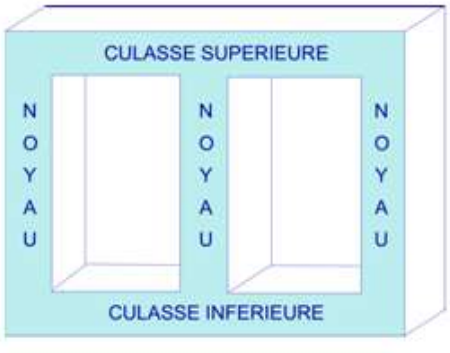


Fig. I.4 -b : Circuit magnétique triphasé à 3 colonne

Suivant cette caractéristique il est nécessaire de fournir un courant magnétisant **I0**, à vide, qui n'est fonction que de la tension d'alimentation, et caractéristique de l'inductance magnétisante du circuit magnétique. Ce courant est l'image des pertes à vide, ou pertes fer, qui sont permanentes sous tension.

Mécaniquement le circuit magnétique classique triphasé (Fig. I.4 -b) comporte trois noyaux (parties verticales). Sur chacun d'eux est placée une phase (ensemble des enroulements d'un élément monophasé). Ces noyaux sont réunis par des culasses supérieures et inférieures, qui referment le circuit. Ainsi le flux magnétique circulant dans le circuit magnétique a un chemin préférentiel fermé, de réluctance faible. Tout entrefer étant proscrit, son montage qui est manuel requiert un savoir-faire particulier.

Le circuit étant métallique il est nécessaire de fixer son potentiel, en l'occurrence à la terre.

Le circuit magnétique est un des éléments les plus lourds des transformateurs de puissance et peut peser aisément un tiers de la masse totale d'un transformateur. Par exemple

dans un transformateur de 100 MVA de masse totale de 120 tonnes, le circuit peut peser 45 tonnes.

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, isolées électriquement entres elles afin de réduire les pertes par courants de Foucault. Les tôles de circuit magnétique de type (Fe-Si), à grain orienté laminé à froid, ont une épaisseur qui varie de 0.15mm à 0.3mm [3]. Des joints enchevêtrés et orthogonaux effectuent la liaison entre les colonnes et les culasses sur les transformateurs de petite puissance. Ces joints qui constituent une succession de stratifications jouent un rôle important dans la performance du noyau afin d'obtenir une stabilité mécanique plus élevée, et diminuent également le bruit des vibrations pendant le fonctionnement du transformateur. [4] [5]. L'espace délimité par deux colonnes successives et les culasses est dénommé "fenêtre magnétique" et accueille donc les bobinages [6].

I-3 Enroulements :

Les enroulements sont constitués de spires dont le nombre est différent pour les enroulements de haute et de basse tension respectivement primaire/secondaire. Les spires sont elles mêmes subdivisées en plusieurs brins mis en parallèle. Les conducteurs formant les enroulements sont en cuivre ou en aluminium pour les puissances plus importantes. Ces matériaux sont ainsi préférés à d'autres pour leurs bonnes conductivités thermiques. Selon la gamme de puissance des transformateurs, les conducteurs peuvent êtres sous forme de fils massifs, de section circulaire ou carrée, de type méplat, ou encore laminés en fines feuilles [6].

Sur la Fig. I.5 -a on peut observer un enroulement seul, avec plusieurs spires qui seront connectées par la suite aux connexions finales du transformateur.

Pour une phase d'un transformateur donné il y a un enroulement par niveau de tension considéré : une basse tension (**BT**) et un haute tension (**HT**), avec parfois un moyenne tension (**MT**) supplémentaire.

Ces différents enroulements sont imbriqués les uns dans les autres avec généralement l'enroulement basse tension à l'intérieur et les enroulements de niveaux de tensions supérieures de façon croissante vers l'extérieur ; comme sur la coupe de demi enroulements de la Fig. I.5 -b.

L'ensemble de ces enroulements constituant une phase est installé sur les noyaux du circuit magnétique (**CM**).



Fig. I.5- a: Enroulement de transformateur

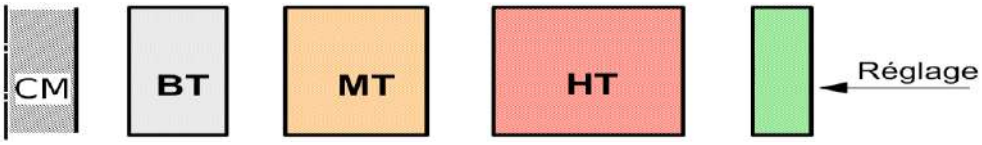


Fig. I.5 -b: Disposition relative des enroulements (coupe d'un ½ enroulement)

Les enroulements sont généralement en cuivre isolés papier (en plus de l'huile isolante en fonctionnement).

Les sections et les technologies de bobinages ne sont pas identiques pour tous les transformateurs et relèvent des caractéristiques techniques d'un appareil donné.

Les contraintes que doivent supporter le transformateur (exemples d'ordres de grandeurs d'un

transformateur 500 MVA, 400 kV) sont principalement liées aux enroulements et sont d'ordre:

1. **Diélectrique** : tenir la tension en basse fréquence (nominale, industrielle) et en haute fréquence (chocs de foudre, de manœuvre, normalisés jusqu'à 1425 kV) [7]

2. **Mécanique** : tenir mécaniquement les efforts développés pendant les courts-circuits

(Plusieurs centaines de tonnes) [8]

3. **Thermique** : le cuivre ne doit pas dépasser une température absolue de point chaud de 98°C

Qui dégraderait exagérément le papier isolant [9]. De plus les enroulements

sont le siège des pertes en charge (≈ 1,5 MW) qu'il faut évacuer continuellement.

Deux grandes familles technologiques d'enroulements existent : la colonne et le cuirassé.

I-3-1 Les types des défauts dans l'enroulement :

Les défauts qui peuvent se produis dans un transformateur sont classés dans deux types de défauts externes et internes. Les défauts externes sont ceux qui se produisent à l'extérieur du transformateur: surtension, suralimentation, sous fréquence et courts-circuits système externes. Les défauts internes sont ceux qui se produisent à l'intérieur du transformateur: bobinage tournant-à-tour, mise au sol, sur fluxage

Au cours des dernières décennies, une croissance continue a été observée dans le système d'alimentation et les progrès se poursuivront au cours des prochaines années.

Un transformateur, qui fait partie intégrante du système d'alimentation, constitue un lien important entre une centrale électrique génératrice et un point d'utilisation de puissance. En raison de divers types de charges complexes et de leurs systèmes de contrôle, le transformateur est sujet à des défauts. Les défauts d'enroulement internes dans les transformateurs peuvent causer d'énormes dégâts en très peu de temps et, dans certains cas, les dommages sont réparables

Et aussi environ 70% -80% des pannes du transformateur sont causées par des défauts internes. Parmi ces défauts, l'enroulement tourner à la volée est difficile à surveiller et à détecter, en particulier à une grandeur inférieure du courant de défaut. Ainsi, le défaut de localisation est un travail nécessaire pour réparer les transformateurs défectueux, qui peuvent être réparés et remis en service à nouveau.

Parmi les défauts les plus courants :

I-3-1-1 Court-circuit entre spires *:*

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement qui devraient être normalement isolées entre elles. Cela arrive souvent suite à un amorçage diélectrique entre spires entretenu, ou le déchirement du Papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements.

Ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique Dans certains cas. [2]



Fig. I.6 : Court-circuit entre spires

I-3-1-2 Déformation géométrique des enroulements :

Il est possible mécaniquement de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement suite à des courts-circuits extérieurs qui provoquent des courants extrêmement élevés qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes [2]

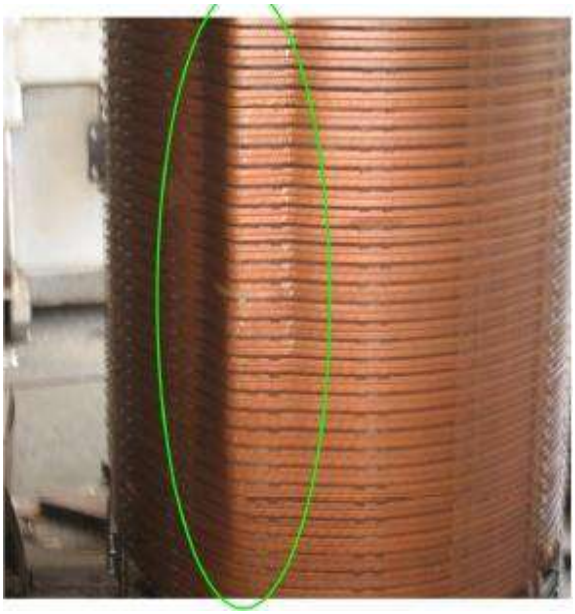


Fig. I.7 : Déformation mécanique d'un Enroulement

I-3-1-3 Amorçage diélectrique entre spires :

C'est un amorçage entre spire d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit, localement. [2]



Fig. I.8: Amorçage entre spires, sans court-circuit entre-elle

Conclusion :

Les transformateurs de puissance sont des appareils complexes, qui doivent tenir de nombreuses et fortes contraintes, de natures diverses, durant leur cycle de vie. De plus, dans le contexte actuel, avec un parc d'appareils vieillissant et un réseau de plus en plus chargé, les transformateurs seront soumis à des contraintes de plus en plus importantes, pendant encore plusieurs années à priori. Bien que leur fiabilité soit plutôt bonne, les transformateurs restent des éléments critiques de tout réseau électrique. Il est dont très important d'être capable d'en assurer la maintenance, et le dépannage au mieux, afin d'optimiser l'exploitation du matériel lui-même, et surtout de garantir la transmission, importante, d'énergie électrique qui transite par lui. Ce contexte général introduit les enjeux du diagnostic et détection les défauts, dont tous les éléments nécessaires pour le réaliser sont présentés dans le chapitre 2.

CHAPITRE II

Modalisation en HF de l'enroulement de transformateur

Introduction :

Dans le premier chapitre, nous avons mis en relief les défauts qui peuvent affectés le fonctionnement normal du transformateur, afin faciliter l'analyse et la compréhension de ces défauts une modélisation des enroulements du transformateur est nécessaire. Ce chapitre est consacré pour la modélisation et l'identification des paramètres du modèle en haute fréquence dans l'objectif de diagnostic de défaillances qui peuvent avoir lieu dans les transformateurs.

II-1 Modèle conventionnelle de l'enroulement en HF :

La représentation de l'enroulement du modèle en tant que circuit électrique contribue intrinsèquement Capturer la longueur physique de l'enroulement (Figure II.1). Ou, en d'autres termes, L'enroulement physiquement continu peut être visualisé comme étant cartographié sur une série de Nœuds discrets, à partir de la ligne à l'extrémité neutre.

On discrétise l'enroulement par un ensemble fini de section, chaque section est représenté par sa résistance r, son inductance propre ls qui est couplé mutuellement avec les autres inductances, entre les sections il existe des capacités en séries Cs de couplage et pour chaque section une capacité par rapport à la masse Cg ce dernière elle est divisées aux l'extrémité.[10]

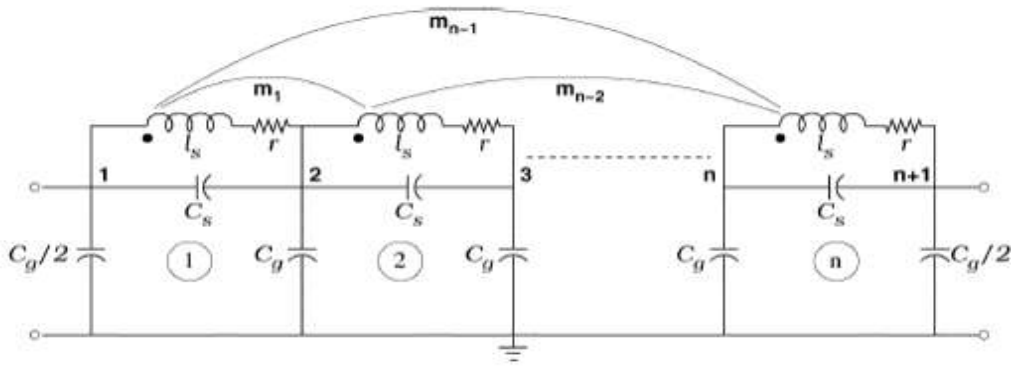


Fig. II.1: Circuit équivalent d'un enroulement de transformateur

Avec :

Cs: la capacité en série.

Cg : la capacité à la terre.

Ls : l'inductance propre.

r : la résistance par section.

$\boldsymbol{m_i}$ **:**la mutuelle entre les section avec **i** varie de 1 à **n**

n : nombre de section

II-2 Analyse fréquentielle de l'enroulement HF pour le diagnostic :

L'analyse de la réponse en fréquence est un outil puissance et sensible pour évaluer l'intégrité mécanique et géométrique de basse, des enroulements et du circuit magnétique dans les transformateur de puissance, par la mesure de leurs fonctions de transfert sur une large gamme de fréquences.

II-2-1 Principe de la méthode

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductances et de résistances, un circuit très complexe qui génère une empreinte digitale ou signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des répondes sont représentées sous forme de courbe sur la figure II.2[10]:

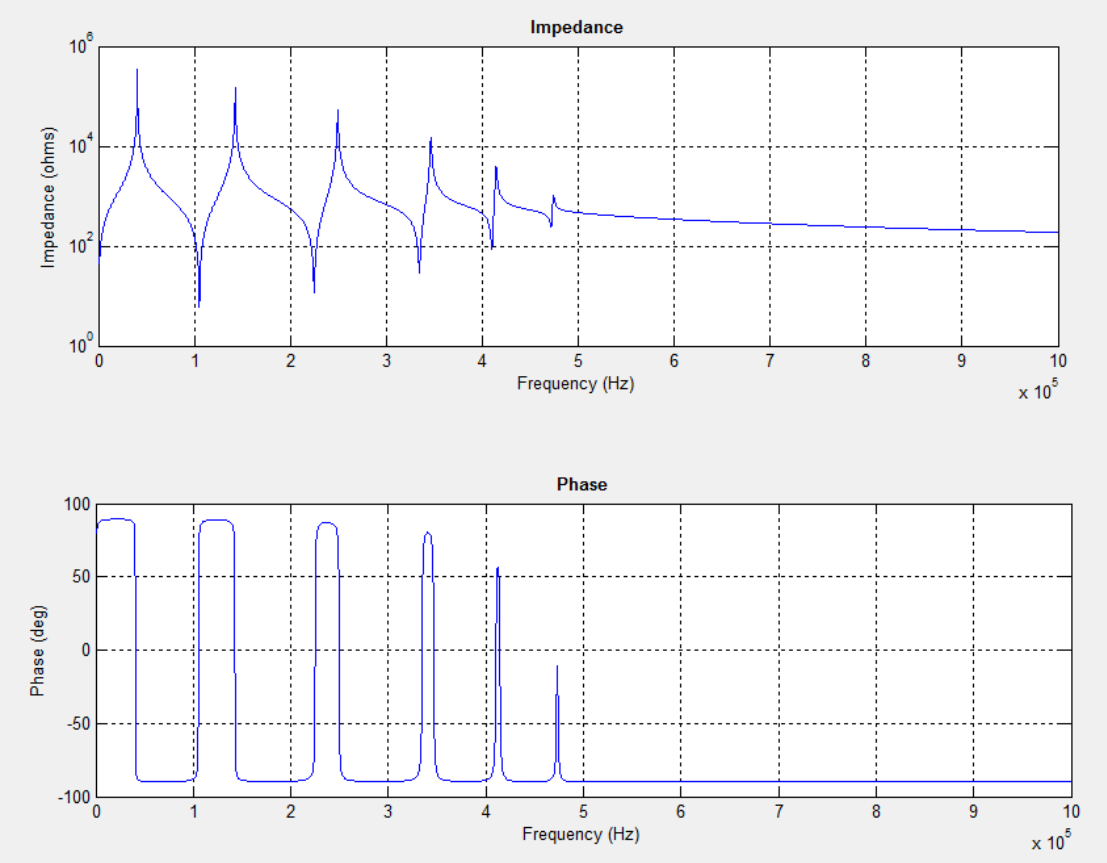


Fig. II.2: réponse en fréquence (l'impédance et la phase)

II-3 Identification des paramètres de l'enroulement par l'algorithme de recuit simulé :

II-3-1 Synthèse du circuit de référence :

La première étape de la méthode proposée consiste à représenter le modèle

Enroulement au moyen d'un circuit équivalent, appelé circuit de référence. Atteindre

Ceci, les paramètres suivants de l'enroulement du modèle sont nécessaires:

R_{dc} - résistance en courant continu.

l_{eq} - inductance équivalente.

$c_{g,eff}$ - Capacité de shunt efficace à la masse.

α-constante de distribution de tension initiale.

Ces paramètres sont mesurés

Les étapes suivante sont nécessaires la synthèse d'un circuit pour représenter le modèle l'enroulement est le suivant :

- détermination des fréquences naturelles (ocnfs et scnfs) du modèle l'enroulement par mesures de fréquence balayée.
- Détermination du nombre de sections du circuit équivalent à être synthétisé.
- Estimation les paramètres du circuit équivalent[10].

Chacune de ces étapes est discutée ci-dessous:

a)-Détermination des fréquences naturelles :

La fonction d'impédance d'un enroulement avec son neutre mis à la terre est modélisé par circuit équivalent à n-section (comme sur la figure II.3), peut être exprimée comme suit[11]:

$$Z(s)=\frac{\beta 1(s-\tau)\Pi_{i=1}^{n-1}(s-z_{i,})(s-z'_{l})}{\Pi_{i=1}^{n}(s-p_{i,})(s-p'_{l})} \qquad (2.1)$$

- Où$\beta 1$ - facteur d'échelle;

τ- zéro réel;

$z_{i,}z'_{l}$- paire de zéros complexe conjuguée ;

$p_{i,}p'_{l}$- paire de pôles conjugués complexes.

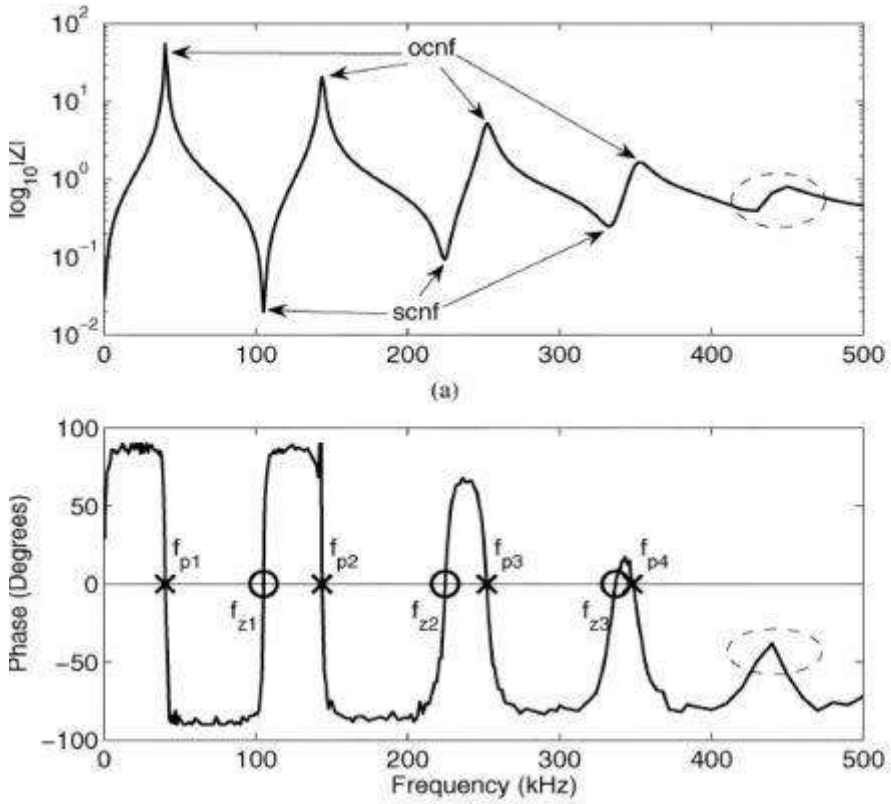


Fig. II.3:mesure du point de conduite Impédance de du modèle (a) Et (b) phase.

Les pôles et les zéros de la fonction d'impédance se situent dans la moitié gauche du plan de fréquence complexe. Les pôles complexes$(\delta_{p+}jw_p)$ et des zéros complexes$(\delta_{z+}jw_z)$, les parties réelles sont dues aux pertes (Représentés comme des résistances) et les parties imaginaires signifient les pulsations pour lesquelles les pics et les creux se produisent dans l'étendue de l'amplitude de l'impédance.

B) Fréquences naturelles relatives aux pôles et zéros de deuxième ordre :

Déterminer les fréquences naturelles du modèle l'enroulement, représenté son impédance en fonction de la fréquence. A chaque fréquence, la grandeur et la phase de la tension d'entrée et le courant sont mesurés.

La grandeur mesurée et les diagrammes de phase de l'impédance correspondant à un modèle enroulement à disque continu sont présentés à la figure II.3.[12] De ce chiffre, les points suivants se dégagent:

A certaines fréquences, la grandeur de l'impédance devient maximum et simultanément sa phase devient nulle. Ces fréquences sont appelées fréquences naturelles en circuit ouvert (ocnf).

-A certaines fréquences, la grandeur de l'impédance minimale et sa phase devient simultanément nulle. Ces fréquences sont appelées fréquences naturelles en circuit court-circuit (scnfs).

Ainsi, les ocnfs et les scnfs appartenant aux pôles et zéros de second ordre de la fonction d'impédance peuvent être déterminées par l'inspection du module et de la phase de la réponse fréquentielle de l'impédance de l'enroulement.

C) Fréquence naturelle (scnf) relative au premier ordre zéro.

La fonction d'impédance Z(s) décrite dans l'équation (2.1) contient un zéro réel τ (où τ =-2πf_1). Comme la perte est généralement très basse, le scnf"f_1" " serait dans la région à basse fréquence (de l'ordre de quelques centaines d'Hertz). τ peut être déterminé comme suit :

L'impédance Z(s) aux basses fréquences est

$$\lim_{s\to 0} z(s)=R_{dc} + sl_{eq} \quad (2.2)$$

Où R_{dc} - résistance DC;

l_{eq} - inductance équivalente;

s- variable de Laplace;

Z (s) - impédance.

De ce qui précède, le zéro réel (s= τ) se trouve

$$\tau = -\frac{R_{dc}}{l_{eq}} \quad (2.3)$$

Où R_{dc} - résistance DC;

l_{eq} - inductance équivalente;

τ- zéro réel.

d) Déterminer le nombre de sections N. Lors de la synthèse du circuit :

le nombre de section N choies selon les nombre des ocnf vu par la mesure FRA.[13]

Mais dans la pratique, pas tous les pics ne sont observables, en raison des raisons suivantes:

A des fréquences plus élevées, en raison de l'effet de la peau, l'amortissement est élevé. Par conséquent, les haut scnfs et ocnfs ne sont pas bien prononcés dans les courbe de FRA mesure (Figure II.2)

Dans un enroulement entrelacé, puisque la plupart des zéros et pôles à haute fréquence Sont très proches l'un de l'autre, seules quelques fréquences naturelles sont observables

En outre, dans les mesures réelles, les courbes de réponse en fréquence présentent quelques petites courbes comme entortillements. Ces problèmes sont dus au bruit, à la sensibilité limitée de la Instruments de mesure, etc. Par conséquent, l'estimation de N est lourde difficultés.

Aux hautes fréquences, l'impédance offerte par le circuit se trouve à partir de (3.1) comme :

$$\lim_{s\to 0} z(s) = \frac{\beta 1}{s} \qquad (2.4)$$

Où

s- Laplace variable;

Z (s) - impedance;

$\beta 1$ - facteur d'échelle

Parce que, le circuit se comporte entièrement comme un réseau capacitif au plus haut Fréquences, le facteur$\beta 1$ de mise à l'échelle peut être lié à la capacité équivalente C_{eq} comme

$$\beta 1 = \frac{1}{C_{eq}} \qquad (2.5)$$

Où $\beta 1$ - facteur d'échelle;

C_{eq} - capacité équivalente.

La relation ci-dessus est un lien crucial qui peut être utilisé pour déterminer N. à s=0, l'impédance d'entrée devient résistive (c'est-à-dire ,R_{dc}). En utilisant ceci et En remplaçant (2.3) par (2.1), le facteur d'échelle $\beta 1$ peut exprimer comme

$$\beta 1 = leq * \frac{\Pi_{i=1}^{n}(-p_i)(-p'_l)}{\Pi_{i=1}^{n-1}(-z_i)(-z'_l)} \qquad (2.6)$$

Où$\beta 1$ - facteur d'échelle;

l_{eq} - inductance équivalente;

$z_{i,}z'_l$- paire de zéros complexe conjuguée ;

$p_{i,}p'_l$- paire de pôles conjugués complexes.

Puisque seuls q ocnfs et (q-1) scnfs sont observables, n et (n-1) dans ce qui précède L'équation peut être remplacée par q et (q-1) respectivement

En outre, comme la valeur absolue des parties imaginaires des fréquences complexes est nettement plus élevé que leurs parties réelles (les pertes dans l'enroulement sont faibles), et $p_{i,}$'S et$z_{i,}$'S in (2.6) peuvent être remplacés par les fréquences angulaires w_p'S et w_z'S s, respectivement. Puisque les parties imaginaires des pôles et des zéros sont $w_p = 2\pi f_p \; et \; w_z = 2\pi f_z$, Respectivement peut réécrit comme :

$$\beta 1 \approx leq * \frac{4\pi^2 * \Pi_{i=1}^{q} f_{pi}^2}{\Pi_{i=1}^{q-1} f_{zi}^2} \qquad (2.7)$$

Où $\beta 1$- facteur d'échelle;

leq - inductance équivalente, en mH;

$z_{i,}z'_l$ - paire de zéros conjugué conjugué complexe, en MHz;

$p_{i,}p'_l$- paire de pôles conjugués complexes, en MHz [14]

Calcul la capacité en série Cs :

Pour estimer la capacité en série Cs en utilisant le polynôme suivant :

Nombre de section	P(Cs)
2	-2nKc_s^2-2(nKc_g-2)c_s-$\frac{c_g}{2}$(nKc_g-4)
3	-2Kc_s^3-3(nKc_g—2)c_s^2-2c_g(nKc_g—4)c_s-$\frac{c_g^3}{3}$(nKc_g—6)
4	-2kc_s^4-4(nkc_g-2)c_s^3-5(nkc_g-2)c_s^2 − 2c_g^2(nkc_g-6)c_s-$\frac{c_g^4}{4}$(nKc_g-8)
5	-2kc_s^5-5(nkc_g-2)c_s^4-10c_g(nkc_g-4)c_s^3-7c_g^2 (nkc_g-6)c_s^2-2c_g^3 (nkc_g-8)c_s-$\frac{c_g^4}{5}$ (nkc_g-10)
6	-2Kc_s^6-6(nKc_g-2)c_s^5-17.5c_g(nKc_g-4)c_s^4-18.67c_g^2 (nKc_g-6)c_s^3-9c_g^3 (nKc_g-8)c_s^2-2c_g^4(nKc_g-10)c_s-($\frac{c_g^5}{6}$) (nKc_g-12).
7	-2Kc_s^7-7(nKc_g-2)c_s^6-28c_g(nKc_g-4)c_s^5-42c_g^2(nKc_g-6)c_s^4-30c_g^3(nKc_g-8)c_s^3-11c_g^4(nKc_g-10)c_s^2-2c_g^5(nKc_g-12)c_s($\frac{c_g^6}{7}$) (nKc_g-14).
8	2Kc_s^8-8(nKc_g-2)c_s^7-42c_g(nKc_g-4)c_s^6-42c_g^2(nKc_g-4)c_s^6-84c_g^2(nKc_g-6)c_s^5-82.5c_g^3(nKc_g-8)c_s^4-44c_g^4(nKc_g-10)c_s^3 −13c_g^3(nKc_g-12)$c_s^2$2c_g^6(nKc_g-14)c_s- ($\frac{c_g^7}{8}$) (nKc_g-16).

Tableau II.1 : Polynomial dans l'ordre descendant de Cs

Avec

k = β1est le facteur d'échelle

n : nombre de section

Cs : la capacité en série.

Cg : la capacité à la terre.

Les étapes en résumer pour calculer Cs :

1) mesurer et tracer la réponse en fréquences de l'enroulement transformateur (avec neutre) ;

2) A partir des ocnf et scnf, identifier les pôles et les zéros pour construire le polynôme P(Cs)et obtenir la valeur de k(facteur d'échèle).

3) le nombre de sections correspondant est égal au nombre de pics de ocnf et scnf ;

4) mesure Cg effective de l'enroulement, pour calculer la valeur Cg de chaque section.

5) Construire le polynôme le polynôme P(Cs) correspondant en utilisant tableau II.1, en l'arrangeant dans l'ordre décroissant.

6) Détermination du nombre de changements de signe dans le polynôme P(Cs).

7) résoudre le polynôme P(Cs) pour obtenir les racines, et la racine réelle positive est la valeur de Cs[15].

II-3-2 Présentation le recuit simulé :

Le recuit simulé imite le processus de recuit pour résoudre un problème d'optimisation. Il utilise un paramètre de température qui contrôle la recherche. Le paramètre de température commence généralement haut et lentement "refroidi" ou abaissé dans chaque itération. À chaque itération, un nouveau point est généré et sa distance par rapport au point actuel est proportionnelle à la température. Si le nouveau point a une meilleure valeur de fonction, il remplace le point actuel et le compteur d'itérations est incrémenté. Il est possible d'accepter et d'avancer avec un point pire. La probabilité de le faire dépend directement de la température. Cette étape inutile aide parfois Identifiez une nouvelle région de recherche dans l'espoir de trouver une meilleure solution.

Le recuit simulé applique itérativement l'algorithme de Metropolis[16], pour engendrer une séquence de configurations qui tendent vers l'équilibre thermodynamique :

1) Choisir une température de départ T=T0 et une solution initiale S=S0 ;

2) générer une solution aléatoire dans le voisinage de la solution actuelle ;

3) comparer les deux solutions.

4) répéter 2 et 3 jusqu'a ce que l'équilibre statistique soit atteint ;

5) décroitre la température et répéter jusqu'a ce que le système soit gelé.

Dans un premier temps, T étant généralement choisi très grand, beaucoup de solutions - même celles dégradant la valeur de f - sont acceptées, et l'algorithme équivaut à une visite aléatoire de l'espace des solutions. Mais à mesure que la température baisse, la plupart des solutions augmentant l'énergie sont refusés, et l'algorithme se ramène à une amélioration itérative classique.

A température intermédiaire, l'algorithme autorise de temps en temps des transformations qui dégradent la fonction objective. Il laisse ainsi une chance au système de s'extraire d'un minima local. [17]

Notons aussi que si la température est égale à 0, seules les solutions optimisant f sont acceptées. L'algorithme se comportera donc comme la méthode de la descente du gradient.

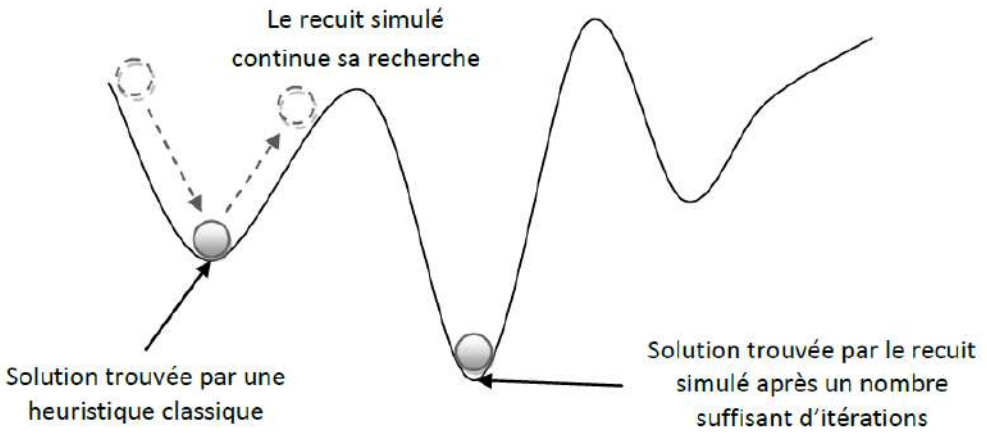


Fig. II.4: comparaison entre le recuit simulé et une heuristique classique[18]

II-3-3 Utilisation du recuit simulé pour la détermination des paramètres du schéma équivalent:

a)–la fonction objective :

on va optimiser la fonction objective suivant de N variables :

$$l_{eq}(mesuré) = Nls + 2\sum_{i=1}^{n-1}(N-1)m_i \qquad (2.8)$$

Avec :

Leq : L'inductance équivalant mesuré par LCR-mater

N : nombre de section

Ls : L'inductance probe

m_i : les mutuelles avec i=2 :N

b) Le bond d'espace d'optimisation :

On va crie un bond maximal et un autre minimal par un vecteur avec un N démontions comme un espace de recherche pour résoudre le problème.

Cette opération permis de estimées les paramètres :

L'inductance propre Ls les mutuelles m_i

Conclusion :

La modélisation et l'identification des paramètres du modèle en haute fréquence dans l'objectif de diagnostic de défaillances qui peuvent avoir lieu dans les transformateurs a fait l'objet de ce chapitre.

Une méthodologie de synthèse du schéma équivalent de référence aux enroulements du transformateur a été abordée dans le but de l'appliquer sur des bobinages réels, cette partie sera traitée dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III

Application

Introduction :

Le présent chapitre est consacré à l'identification des paramètres du modèle de l'enroulement du transformateur en utilisant sa réponse en fréquence et l'algorithme «recuit simulé ».

Des tests expérimentaux sont réalisés sur deux type de bobinage l'un à noyau de fer et l'autre est sans noyau.

Le modèle ainsi synthétisé sera exploité pour exploité pour le diagnostic de défaillance en utilisant l'analyse de la réponse fréquentielle de l'enroulement.

III-1 Identification des paramètres de l'enroulement :

III-1-1 premier cas d'étude :

III-1-1-1 La mesure de la réponse fréquentielle de l'enroulement :

Un test FRA est réalisé sur un enroulement sans noyau [19].

La fig.III.1 représente la réponse obtenue sur une plage de fréquence allant jusqu'à à 1MHz.

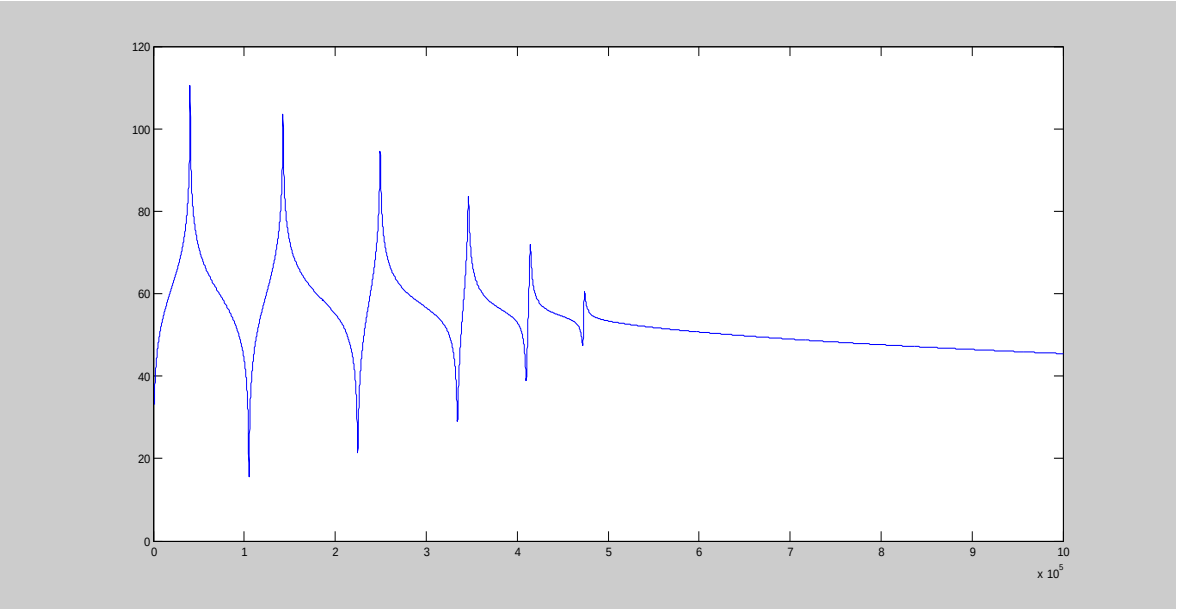


Fig.III.1: la Réponse en fréquence de la modèle d'enroulement

Sa réponse ainsi obtenue, permet de déterminer le nombre de section du modèle adopté, comme on peut bien le constater le nombre de pic relevés sur cette courbe est égale à 06 ce qui correspond au nombre de cellule du modèle adopté fig.III.2 :

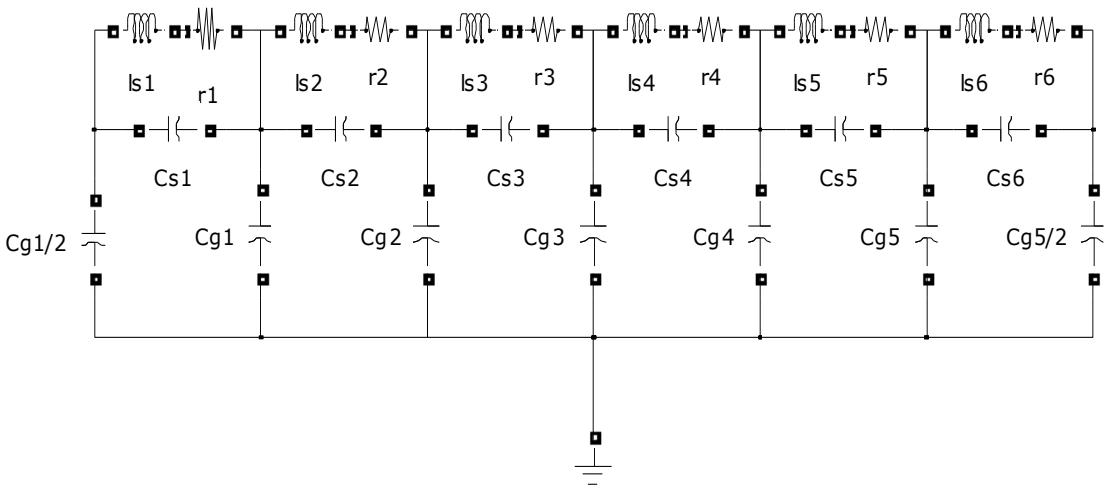


Fig.III.2: Le model équivalant l'enroulement de 6 section

Avec :

Cs: la capacité en série.

Cg : la capacité à la terre.

Ls : l'inductance propre.

r : la résistance par section.

Les derniers trois sont mesurés :

Afin d'identifier tous les paramètres du modèle fig.III .2, les mesure : leq, Req , Cg_{eff} sont nécessaire.

Le tableau III.1 représente les trois paramètres mesurés.

R (ohm)	l_{eq} (mH)	Cg (nF)
1.333	6.98	0.933

Tableau.III.1 : les paramètres mesurés [19]

L'analyse de la réponse fréquentielle permet de prélever les fréquences mutuelles en circuit ouvert (Ocnfs) et en court circuit (Scnfs) .ces fréquences sont récapitulées dans le tableau III .2.

Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
40.5	
142.6	105.2
249.4	224.8
346.5	334.4
414.5	410.1
474.1	472.3

Tableau. III.2 : les Osnf et Scnf mesurées par le model d'enroulement [19]

III-1-1-2 Identification des paramètres de l'enroulement par l'algorithme recuit simulé :

La détermination de la capacité série C_s nécessite le calcul suivant :

- L'expression de facteur d'échelle $\beta 1$:

$$\beta 1 = leq * \frac{4\pi^2 * \Pi_{i=1}^{q} f_{pi}^2}{\Pi_{i=1}^{q-1} f_{zi}^2}$$

Avec :

f_{pi} : Les pôles (ocnf)

f_{zi} : Les zéros (scnf)

$$\beta 1 = \frac{(7.0382 \times 4 \times \pi^2 \times (40.5^2 \times 142.6^2 \times 249.4^2 \times 346.5^2 \times 414.5^2 \times 474.1^2}{(105.2^2 \times 224.8^2 \times 334.4^2 \times 410.1^2 \times 472.3^2)}$$

$$\beta 1 = 1.1392$$

Pour 6 sections le polynôme la capacité en série Cs est égal [20]:

P(Cs)=-2Kc_s^6-6(nKc_g-2) c_s^5-17.5c_g×(nKc_g-4) c_s^4-18.67c_g^2 (nKc_g-6) c_s^3-9c_g^3 (nKc_g-8) c_s^2-2c_g^4(nKc_g-10)c_s-($\frac{c_g^5}{6}$) (nKc_g-12).

Ses racines de ce polynôme est réalisé en utilisant Microsoft mathimatics :

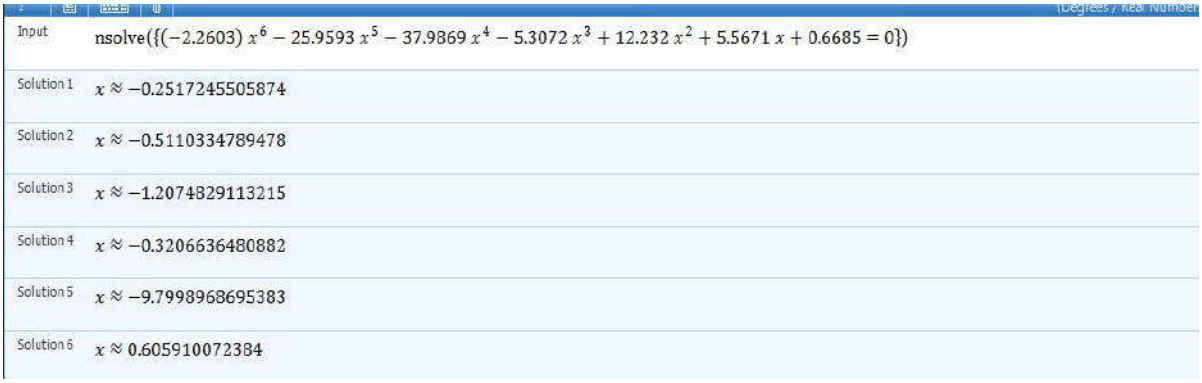


Fig.III.3 : les résultats obtenus par la résolution du polynôme d'ordre 6.

La valeur de C_s correspond à la solution positive de ce polynôme, ce qui donne $C_s = 0{,}659\ nF$

La fonction objective d'optimisation les paramètres nécessaire pour l'optimisation des paramètres en utilisant l'algorithme recuit simulé est:

$$l_{eq}\,(mesuré) = Nls + 2\sum_{i=1}^{n-1}(N-1)m_i$$

Avec :

Leq : L'inductance équivalant mesuré par LCR-mater

N : nombre de section

Ls : L'inductance probe

m_i : les mutuelles avec i=2 : N

Ses bandes minimale est maximale des éléments de la matrice des inductances sont donnés dans le tableau III .3

L'inductance	La bande maximale	La bande minimale
Ls	$0.5\times \frac{leq}{n}$	$0.5\times (0.5\times \frac{leq}{n})$
M12	0.6*Ls	0.5*Ls
M13	0.6*M12	0.5*M12
M14	0.6*M13	0.5*M13
M15	0.6*M14	0.5*M14
M16	0.6*M15	0.5*M15

Tableau.III.3 : la bande minimale et maximale des paramètres à estimes.

Le tableau suivant récapitule les valeurs des l'élément estimé de la matrice des inductances par l'algorithme recuit simulé :

Ls	M12	M13	M14	M15	M16
0.4696	0.2504	0.1123	0.0873	0.0403	0.0334

Tableau.III.4: le paramètre estimé par le recuit simulé

Après avoir estimé tout les paramètres du modèle synthétisé, un test FRA est simulé sur ce dernier et comparé à la réponse FRA expérimentale [21]:

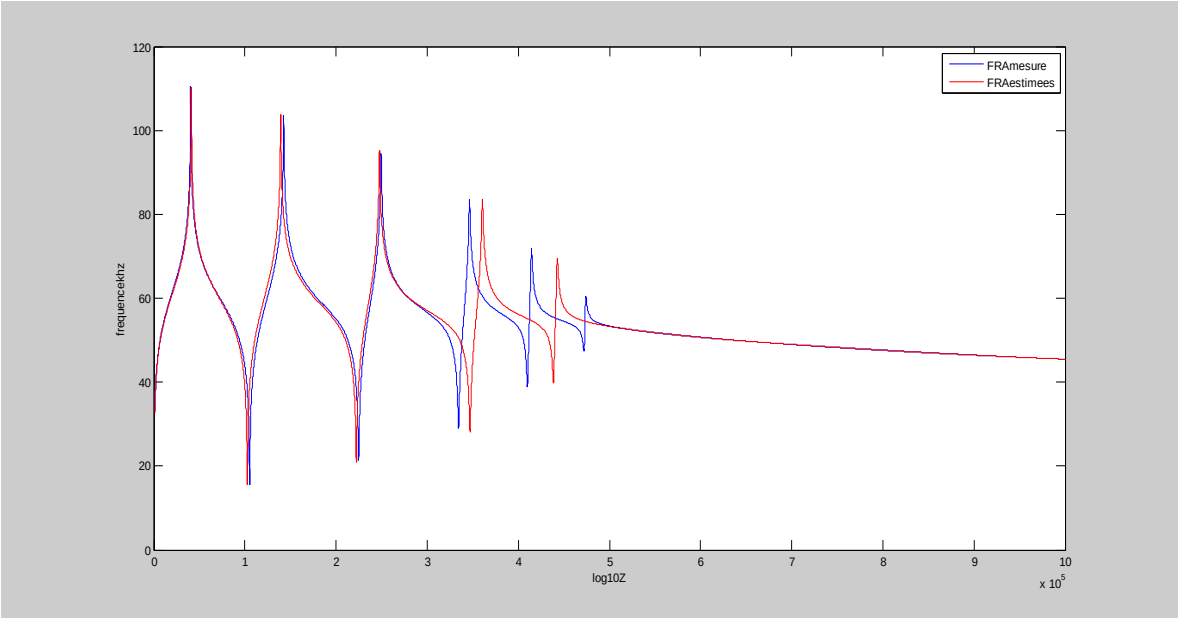


Fig.III.4: identification entre la courbe FRA mesurées et estimées

III-1-1-3 Validation les résultats :

Dans l'objectif de validé le modèle synthétisé, le tableau ci-dessous représente la comparaison entre les fréquences mutuelles obtenues des deux réponses expérimentale et simulée :

Valeurs mesurées par la modèle d'enroulement		Valeurs estimées par la méthode recuit simuler		Erreur %	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)	Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)	Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
40.5		41.2		1.6	
142.6	105.2	139.3	102.6	2.3	2.5
249.4	224.8	247.7	222.7	0.68	0.9
346.5	334.4	360.6	346.9	3.9	3.6
414.5	410.1	442.8	438.6	6.3	6.4
474.1	472.3				

Tableau.III.5: Valeurs mesurées et valeurs estimées des Scnf et Osnf avec l'erreur

Avec :

$$\text{Erreur} = \left| \frac{\text{Valeurs mesurées} - \text{Valeurs estimées}}{\text{Valeurs mesurées}} \right| * 100$$

On remarque bien que l'écart enregistré entre la mesure et la simulation ne dépasse pas 6.5% ce qui valide le modèle synthétisé.

III-I-2 deuxième cas d'étude : une bobine avec noyau de fer :

III-I-2-1 La mesure par FRA technique :

La bobine avec noyau **(**Fig.III.8) est une bobine continue avec un noyau de fer qui permet de varier l'inductance :

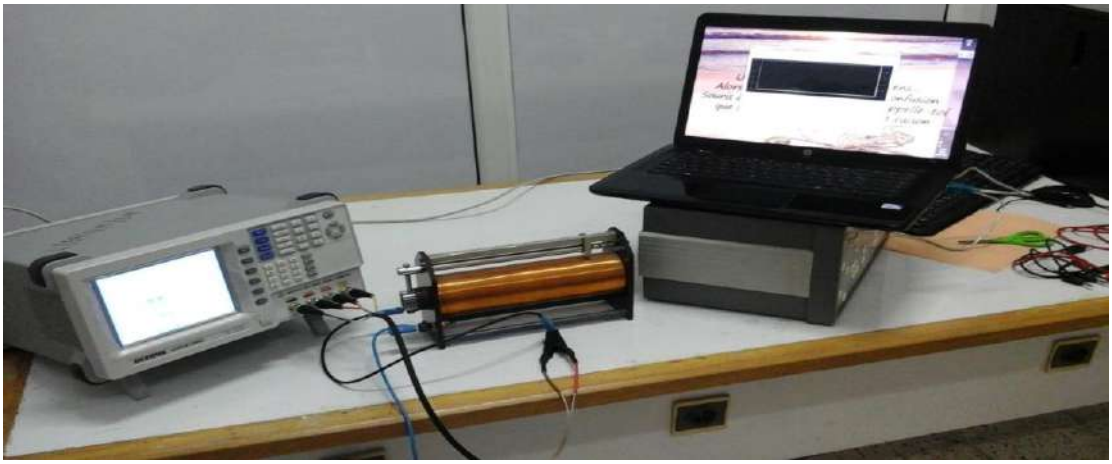


Fig.III.5 : montage de mesure les paramètres d'une bobine avec noyau

Des mesures similaires au premier cas d'étude sont réalisées sur cette bobine à savoir :

_ Un test FRA

_ Une mesure R_{eq} , L_{eq} , Cg_{eff}

Les paramètres mesurés sont données le tableau III .6 :

Cg (nF)	0.125
Leq (H)	1.07

Tableau.III.6 : les paramètres mesurés par LCR-mater

Sa repense fréquentielle expérimentale du bobinage est illustrée par la fig.III.6

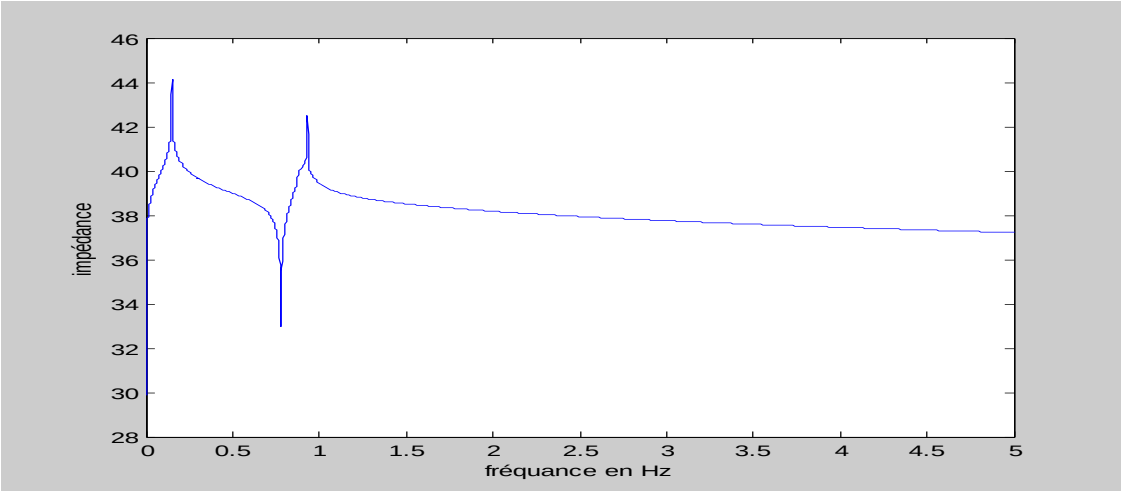


Fig.III.6: Impédance (z) en fonction de la fréquence (f) mesurées

De même que pour ce deuxième cas d'étude les fréquences mutuelles sont relevées à partir de sa réponse en fréquences expérimentale :

Les valeurs relevées sont représentées dans le tableau III .7

OCNF(KHz)	SCNF(KHz)
15	77.5
94	

Tableau.III.7: les Osnf et Scnf mesurées par le model d'enroulement

Comme il a été déjà essaie, le nombre de cellule du modèle à synthétisé est égal au nombre des fréquences (ocnfs) relevée dans ce cas n=2

La fig.III.7 représente le schéma du modèle synthétisé.

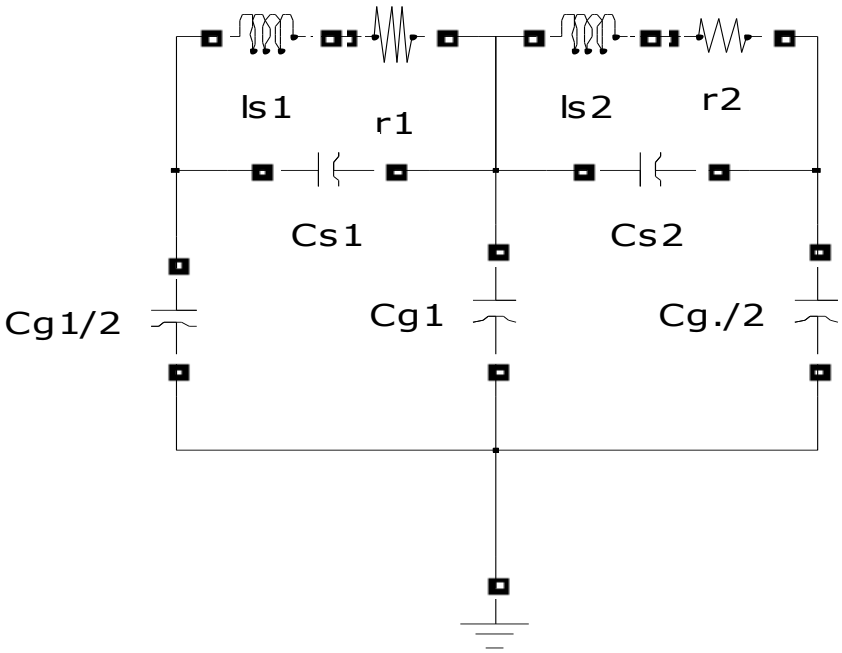


Fig.III.7:Modèle d'enroulement avec noyau de 2 sections

III-I-2-2 Identification des paramètres de cet enroulement par l'algorithme recuit simulé :

Le calcul de C_s est réalisé conformément à la méthode évoquée précédemment

Calculer le facteur d'échelle $\beta 1$:

$$\beta 1 = leq * \frac{4\pi^2 * \Pi_{i=1}^{q} f_{pi}^2}{\Pi_{i=1}^{q-1} f_{zi}^2}$$

$\beta 1$=6.98× $4\pi^2 \frac{(15^2 \times 94^2)}{(77.5^2)} \times 10^{-3}$

$\beta 1$= 13.6184

Le polynôme p(Cs) est donné par :

P (Cs) = -2nKc_s^2-2(nKc_g-2)c_s-$\frac{c_g}{2}$(nKc_g-4)

La détermination des racines P (Cs) est réalisée par Microsoft astigmatique :

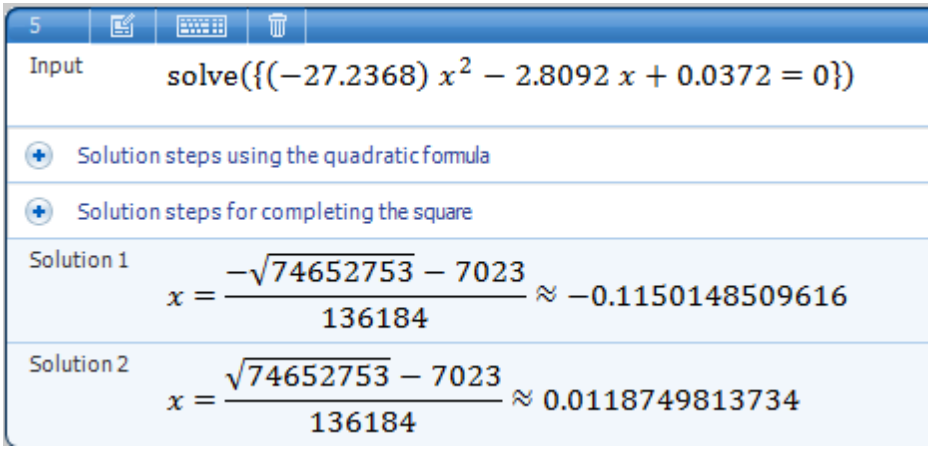


Fig.III.8: les résultats obtenus par la résolution du polynôme d'ordre 2.

Sa solution positive de ce polynôme donne la valeur estimée de Cs

Cs=0.0118nF

La fonction objective d'optimisation utilisée l'algorithme recuit simulé :

$$l_{eq}(mesuré) = Nls + 2\sum_{i=1}^{n-1}(N-1)m_i$$

Avec :

Leq : L'inductance équivalant mesuré par LCR-mater

N : nombre de section

Ls : L'inductance probe

m_i : les mutuels avec i=2 :N

Les bandes minimale et maximale des éléments de la matrice inductances sont donnés dans le tableau III .8 :

Paramètres	Ls	M1
Band minimale	0.178	0.2
Band maximale	0.276	0.3447

Tableau. III.8 : la bande minimale et maximale des paramètres.

Les paramètres estimés en utilisant l'algorithme recuit simulé sont donnés par :

L'inductance propre ls	0.2977 mH
La mutuel m1	0.2470 mH

Tableau. III.9: les paramètres estimées par le recuit simuler

La comparaison entre les deux réponses fréquentielles simulée est donnée par la fig .III.9 :

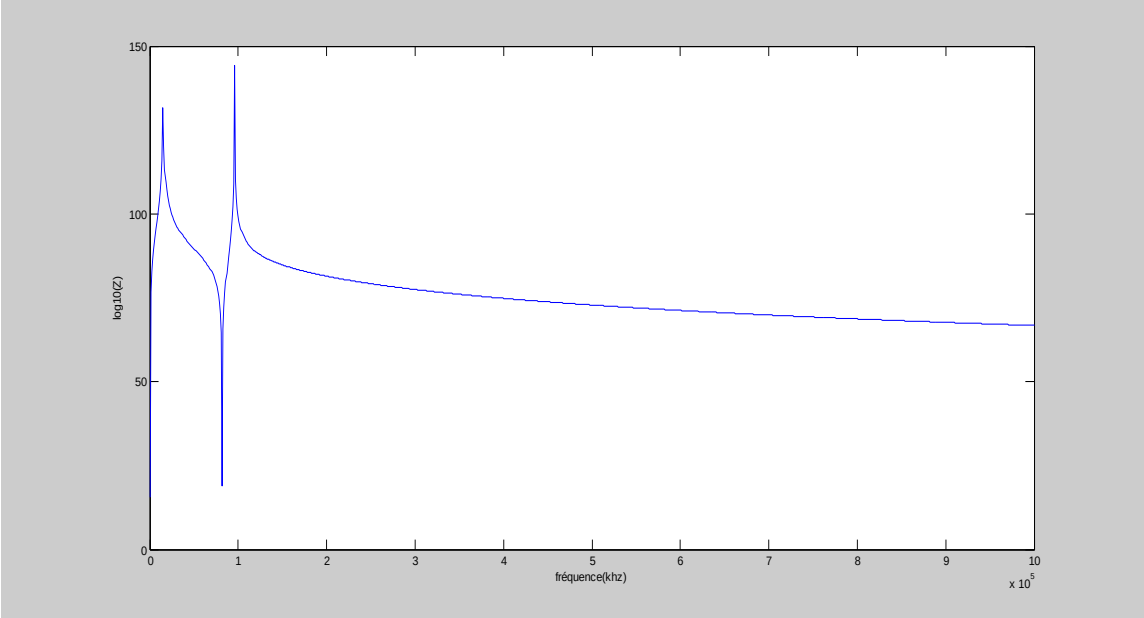


Fig. III.9: la Réponse en fréquence des paramètres estimer par le recuit simule

III-1-2-3 Validation les résultats :

Le tableau II.4 présente les valeurs des fréquences estimées par le recuit simulé et mesurées de l'enroulement,

Valeurs mesurées par la modèle d'enroulement		Valeurs estimées par la méthode recuit simuler		Erreur %	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)	Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)	Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
15	77.5	15	82	0.0	5.8065
94		96		2.1277	
Leq=1.07		Leq=1.0903			

Tableau.III.10: Valeurs mesurées et valeurs estimées des Scnf et Osnf avec l'erreur

On a constaté que les écarts enregistrés entre le mesure est la simulation ne dépasse pas 6%, Ce qui valide le modèle estimé.

III-3 Détection les défauts de l'enroulement :

L'étude de diagnostique sera réalisée sur l'enroulement présenté dans le premier cas d'études le modèle de dernies est composé de 06 cellule RLC.

III-3-1 Un défaut de court-circuit longitudinale :

Le défaut de court-circuit longitudinal est réalisé par l'introduction d'une résistance très faible en parallèle avec la capacité Cs, et le court circuit est déplacé le long de l'enroulement (fig.III.10) .

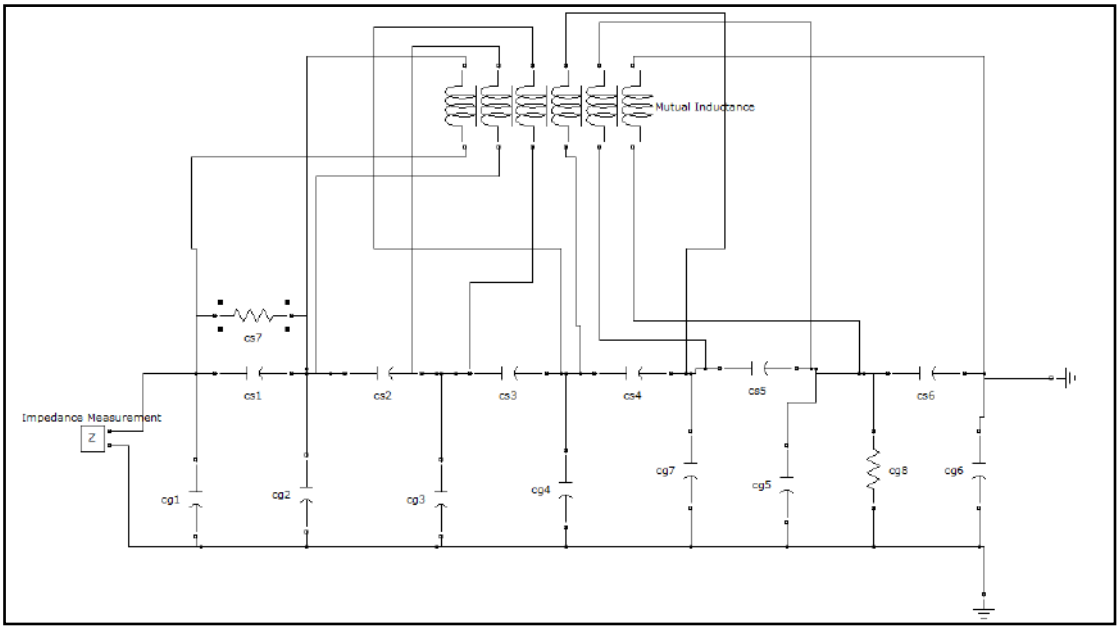


Fig.III.10 : un court-circuit longitudinal à section 1

Pour chacun des défauts réalisés, la réponse fréquentielle obtenue est comparée à celle d'un enroulement sain (fig.III.11):

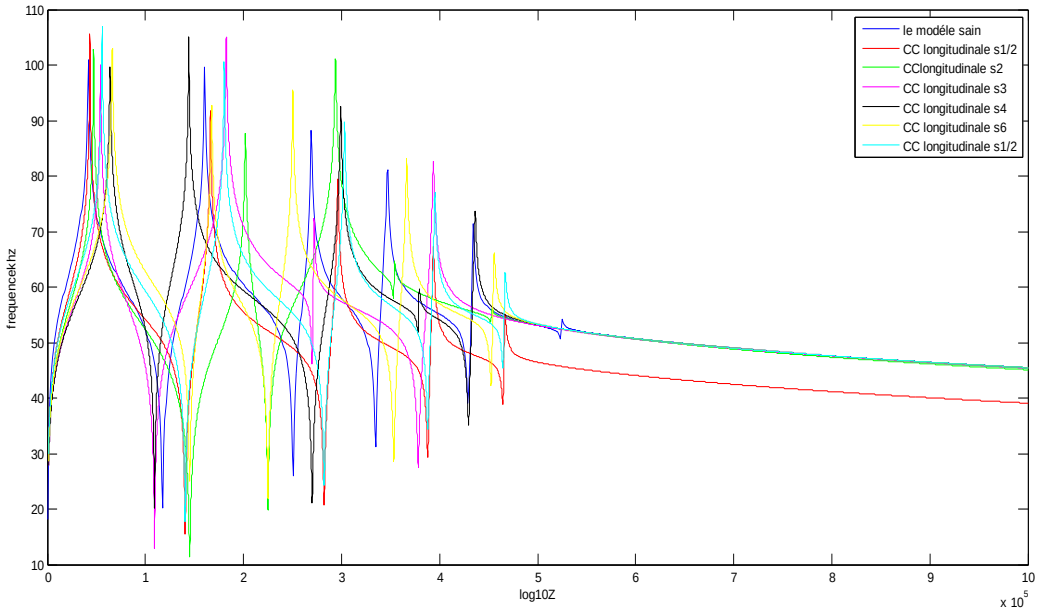


Fig.III.11 : la courbe de Z (f) des défauts de court circuit longitudinal pour chaque section

Dans l'objectif de la détection de défaillances, des relevés de fréquences du premier pic sont réalisés pour chaque défaut et comparés à la fréquence du premier pic de l'enroulement sain Tableau.III.11:

	Le modèle sain	Le défaut à Section 2	Le défaut à Section 3	Le défaut à Section 4	Le défaut à Section 5
Le 1^{er} ocnf (kHz)	40.05	43.4	47.2	55.5	66.2

Tableau.III.11: le 1^{er} ocnf de chaque section après le défaut

D'après les résultats obtenus on a constaté vers la droite.

-Un décalage des fréquences de coupure du premier pic des réponses fréquentielle des enroulements présentant un court-circuit interne par rapport à l'enroulement sain

-Ce décalage est d'autant plus important que le défaut est loins de l'entrée de l'enroulement, l'écart en fréquence lors d'un défaut sur la première section est de 3.35kHz

par rapport à l'enroulement sain et il est de 26.15kHz pour un défaut situé à la dernière section.

III-3-2 Défaut de court-circuit transversal :

Le défaut de court-circuit transversal est simulé en insérant une faible résistance en parallèle avec la capacité C_g. Ce défaut est translaté le long du bobinage :

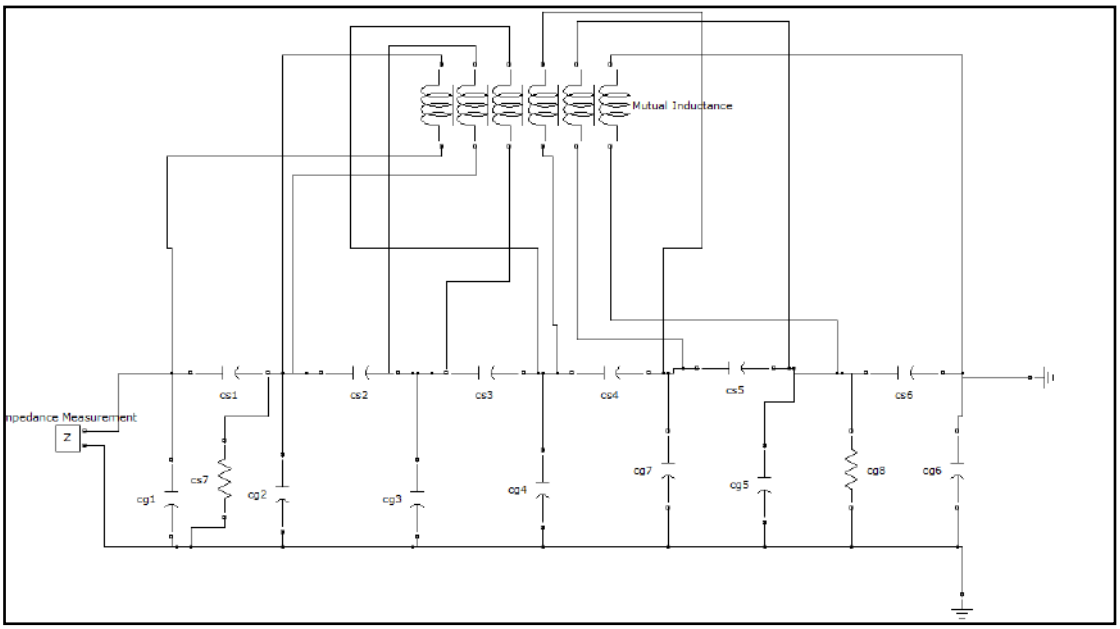


Fig. III.12 : défaut de court-circuit transversal sur la section 1

La comparaison entre la modèle sain et les défauts de court-circuit transversal à chaque section est illustrée par la Fig.III.13 :

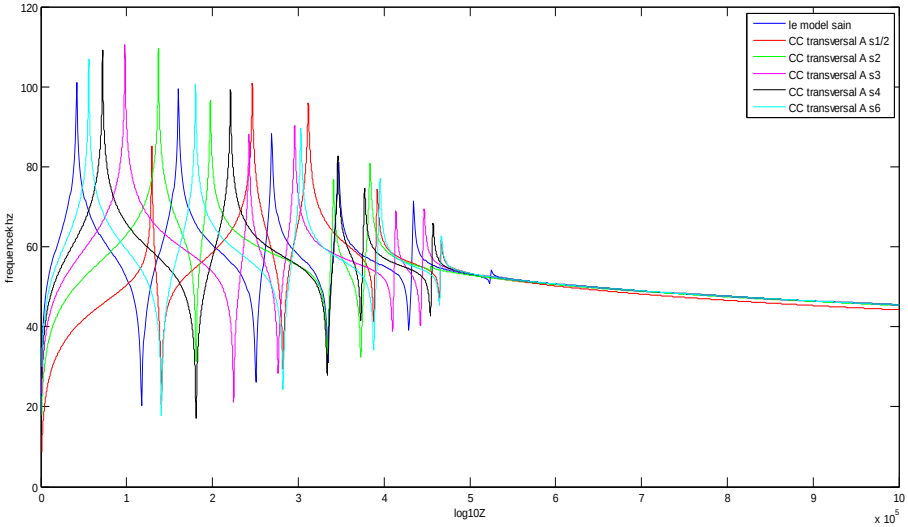


Fig.III.13 : l'impédance en fréquence mesurées de court circuit transversal

Il en est de même pour ce cas, pour un but objectif de détection de défaut, Une comparaison ocnfs du premier pic de chacun des défauts transversaux par rapport à ocnfs des bobinages sain.

	Le modèle sain	Le défaut à Section 5	Le défaut à Section 4	Le défaut à Section 3	Le défaut à Section 2
Le 1^{er} ocnf (kHz)	40.05	55.9	72	98.1	131.1

Tableau.III.12: le 1^{er} ocnf de chaque section après le défaut

D'après les résultats obtenus, on peut noter :

_ Un décalage à droit des fréquences de coupure des réponses de l'enroulement sain.

_ Contrairement au court-circuit transversal, les fréquences de premier pic sont d'autant plus proche de celle du l'enroulement sain avec le défaut qui s'éloigne de la première section ; en effet, l'écart en fréquence lorsque le défaut est sur la première section est de 91.5 kHz si le défaut est sur la 6eme section 15kHz

_ Les écarts enregistrés dans le cas étudié sont plus importants par rapport à ceux relevés dans le cas des c.c longitudinaux.

III-3-3 Un defaut de circuit overte :

Le défauts d'ouverture d'enroulement est simulé , en introduisant une résistance très grande on serie avec la cellule RLC , et puis ce défaut est deplacé le long des bobinage

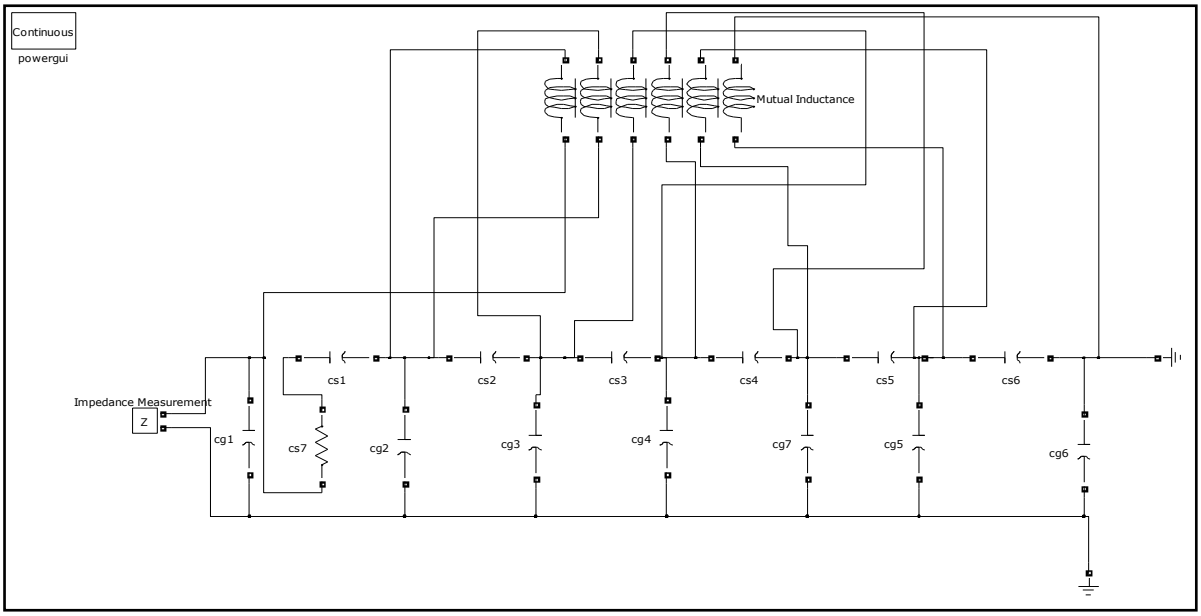


Fig. III.14 : Un défaut de circuit ouvert à section 1

Ca Fig.III.15 illustre la comparaissant des réponses des enroulements défectueux par rapport à l'enroulement sain :

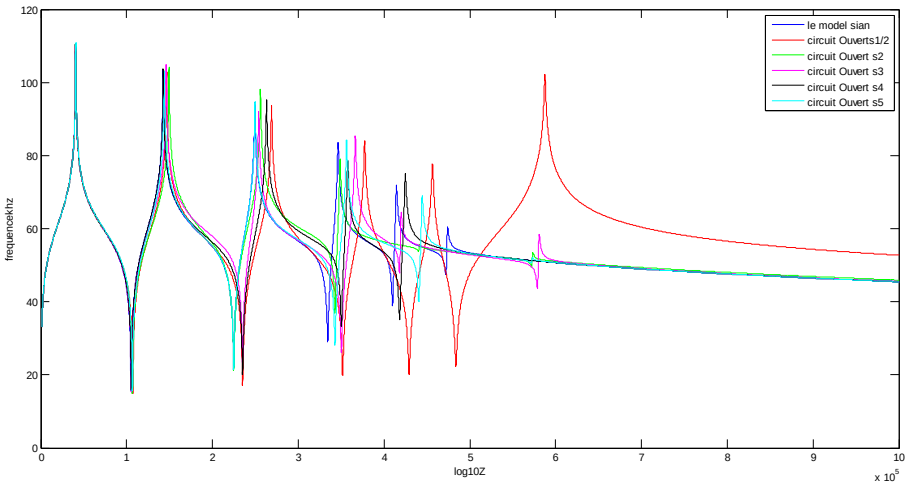


Fig.III.15 : les graphes de l'impédance en fréquence des défauts de circuit ouvert sur le model pour chaque section

Sa comparaison du 1 pic de résonance n'a pas été déterminant pour la détection de défaut, c'est pour cette rais au notre investigation est passée au 2 pic de résonance tableau III.13.

	Le modèle sain	Le défaut à Section 2	Le défaut à Section 3	Le défaut à Section 4
Le 1^{er} ocnf (kHz)	40.05	40.6	40.6	40.6
Le 2eme ocnf (kHz)	142.6	149.4	146	142.7

Tableau.III.13: les ocnf pour chaque section après le défaut

D'après les résultats obtenus, on conclue que :

-les fréquences de coupure du premier pic de résonance des enroulements défectueux se confondant avec celle de l'enroulement sain, ce qui rende la détection très difficile.

-des décalages vers la droite ont été constatés dans la fréquence du second pic de résonance, ce qui permet de détecter relativement le défaut d'ouverture de circuit.

Conclusion :

Le chapitre présenté est subdivisés en deux parties, la première est consacrée à l'identification des paramètres de l'enroulement du transformateur en utilisant l'algorithme « recuit simulé », ce dernier est testé sur deux types d'enroulements (à noyau de fer et sans noyaux de fer). La seconde parties est consacrée à la détection de défaillances dans les enroulements, les défaillances étudiées sont souvent existantes dans les transformateurs de puissance à savoir les courts-circuits entres spires les ouvertures de spires et les ruptures l'isolation.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et ouvrent des voies de recherche dans le domaine de diagnostic du transformateur.

Conclusion générale

Le travail mené dans le cadre de ce mémoire est consacré l'étude du comportement fréquentiel des enroulements du transformateur.

L'intérêt primordial du transformateur dans les réseaux électrique depuis la production de l'énergie jusqu'à sa consommation, rend sa maintenance et son entretien une tâche indispensable pour assurer la continuité de service et la fiabilité de fonctionnement des réseaux électriques.

L'objectif de notre étude est de modéliser l'enroulement du transformateur en régime fréquentiel et le calcul des paramètres de son modèle fréquentiel afin de synthétiser le schéma équivalent qui servira de référence pour une étude de détection de défauts dans les enroulements.

La méthode utilisée pour la détermination des paramètres du modèle de l'enroulement est basée sur un algorithme itératif très répandu dans le domaine de l'optimisation en l'occurrence ''Algorithme de Recuit Simulé''.

L'algorithme utilisé pour la synthèse du schéma de référence est testé sur deux types d'enroulements a montré une bonne efficacité.

Différents défauts ont été simulés en introduisant des variations paramétriques dans le schéma de référence dans le but de détecter les variations de la réponse fréquentielle associée à chacun des défauts injectés dans le modèle de l'enroulement.

D'après les résultats obtenus au cours de ce travail, on a pu tirer les conclusions suivantes :

- Le modèle de l'enroulement du transformateur représenté par une cascades de cellules RLC mutuellement couplées est très représentatif du comportement électromagnétique de l'enroulement.
- La réponse fréquentielle de l'enroulement est considérée comme une empreinte de ce dernier. Tout changement des caractéristiques mécaniques, diélectriques et électrique de l'enroulement est traduit par une variation remarquable de sa réponse en fréquences ce qui rend cette dernière un outil performent dans le domaine du diagnostic de défaillance.

- Utilisation de l'algorithme « recuit simulé » a permis de résoudre un problème complexe de calcul de paramètres du circuit de référence, très difficile à résoudre analytiquement.
- Les défauts injectés dans le circuit de référence afin de simuler des défauts qui peuvent survenir dans les enroulements tels que les courts-circuits internes et les ouvertures partielles du bobinage, ont montré que effectivement l'étude de la réponse fréquentielle peut servir d'outil d'aide pour l'ingénieur de la maintenance du transformateur .

Comme perspectives pour ce travail, il serait souhaitable :

- d'appliquer d'autre algorithme d'optimisation afin choisir le meilleur en terme de précision et de rapidité.
- De reprendre notre étude sur un transformateur entier afin de mettre exergue les influences inter-enroulements du transformateur.

REFERENCES

[1] Yvonnick Le Menach «Contribution à la modélisation numérique tridimensionnelle des systèmes électrotechniques» Thèse de Doctorat de l'Université de Lille1, Année1999.

[2] B.HOCHART « le transformateur de puissance » édition Lavoisier 1998

[3] Christophe Guerin « Détermination des pertes par courants de Foucault dans les cuves des transformateur-modélisation des régions minces et prise en compte de la saturation des matériau

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

[5] Juan Carlos Olivares ;Yilu Liu Jose M ;Canedo ;Rafael Escarela-perez ; Johan Driesen ;Pablo Moreno « Reducing Losses in Distribution Transformers »IEEE Transactions on Power Delivery,vol.18,No.3,pp 821-826,July 2003.

[6] Anthony Lefevre « Contribution a la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformteurs application à l'étude de l'échauffement sur charges non linéaires » Thése de doctorat de l'Université de Nantes Année 2006.

[7] IEC 60076-3. (2000) transformateurs de puissance –partie 3 : Niveaux d'isolement, essais diélectrique et distance d'isolement dans l'air.

[8] IEC 60076-5. (2006) transformateurs de puissance partie 5 : Tenue au court-circuit.

[9] IEC 60076-7. (2005) transformateurs de puissance partie 7 :Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile.

[10] Simulation models of power engineering objects in theory and practice by sarzhanova, kazakhbaeva and balgabaeva (almaty 2014) p32,54,33

[11] E. A. Guillemin, Synthesis of Passive Networks. New York: Wiley, 1962.

[12]. Ragavan, K. & Satish, L. (2007). Localization of Changes in a Model Winding based on Terminal Measurements: Experimental Study. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 22, no. 3, July 2007, pp. 1557-1565.

[13] P. A. Abetti and F. J. Maginniss, “Natural frequencies of coils and windings determined by equivalent circuit,” AIEE Trans., vol. 72, pt. III, pp. 495–504, Jun. 1953.

[14] Simulation models of power engineering objects in theory and practice by sarzhanova, kazakhbaeva and balgabaeva (almaty 2014) p36,37

[15]IEEE transactions on power delivery, vol. 26, no. 4, october 2011: pramanik and satish: estimation of series capacitance of a transformer winding p2873.

[16]BENDAHMANE Amine – Master2 RFIA 25 octobre 2011 (page5)

[17] Les méta heuristiques en optimisation combinatoire [Rapport] : Mémoire de fin d'études / aut. Autin Baptiste / Conservatoire National Des Arts et Métiers. - PARIS : [s.n.], 2006.

[18]BENDAHMANE Amine – Master2 RFIA 25 octobre 2011 (page7)

[19] Measure de RAGAVAN et SATISH: localization of changes in a model winding based on terminal measurements.

[20] IEEE transactions on power delivery, vol. 26, no. 4, october 2011: estimation of series capacitance of a transformer winding based on frequency-response data: an indirect measurement approach by SAURAV PRAMANIK and l. SATISH p2873

[21] IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 22, NO. 3, JULY 2007 1557 Localization of Changes in a Model Winding Based on Terminal Measurements: Experimental Study K. Ragavan and L. Satish, Senior Member, IEEE p 1562.

.