

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme

D'ingénieur d'état en électrotechnique

OPTION

RESEAUX ELECTRIQUES

THEME

**DIAGNOSTIC DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCES
EN UTILISANT LA TECHNIQUE D'ANALYSE
FREQUENCIALE FRA**

Proposé et Dirigé par :

Mr. HOUASSINE Hamza

Etudié par :

Mr. DJEMAH Hamid

Mr. ALIOUANE Karim

Promotion 2010

REMERCIEMENTS

Au terme de notre travail, nous remercions en premier lieu le bon Dieu de nous avoir donné la volonté, et surtout le courage de mener dans des bonnes conditions ce présent travail.

Nous tenons particulièrement à remercier notre promoteur Monsieur HAMZA HOUASSINE, Maître assistant, chargé de cours à l'université de Médéa, pour son entière disponibilité ,son aide précieuse, son orientation, pour ses conseils durant l'élaboration de ce travail et on tiens à lui témoigner pour ses grande qualités humaines.

Nous remercions Mademoiselle Nawal MAZARI, chargé de cours à l'institut de froid de Oued-Aissi, Mademoiselle Nadia RADJA, chargé de travaux dirigés à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.

A tout ceux qui ont participé de près où de loin à la réalisation de ce mémoire.

Que Monsieur le président et Messieurs les membres de jury trouvent ici l'expression de notre gratitude, de notre respect pour nous avoir fait l'honneur d'examiner et juger notre travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- Ø Ma très chère mère qui m'a toujours soutenu ;*
- Ø Mon père ;*
- Ø Mes frères : Morad, Mohamed et Bissam;*
- Ø Mes sœurs : Louiza, Karima et Sonia;*
- Ø Mes très chers amis : Kader, Madjid, Moh, Karim, Nordine ;*
- Ø Mes cousins et cousines ;*
- Ø Tous ceux qui me sont chère.*

Karim

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- Ø Ma très chère mère qui m'a toujours soutenu ;*
- Ø Mon père ;*
- Ø Mes frères : A rezki, Farid et A del;*
- Ø Mes sœurs :Ghania, Nacera, Zhira et Nawal;*
- Ø Mes très chers amis : Kader, Farid, Mustapha,
Karim, Rabah, Moh, Madjid, Belaid;*
- Ø Mes couzins et couzines surtout Djidda, Sarah et
A mar;*
- Ø Tous ceux qui me sont chère.*

Hamid

Résumé

Ce travail est une étude de la réponse fréquentielle des enroulements des transformateurs de puissances, un modèle traduisant le comportement électromagnétique du transformateur a été adopté, et exploiter en vue de son diagnostic. la méthode a été appliquée sur transformateur 110-10.5Kv/125 MVA-50Hz, a donné des résultats satisfaisants comparativement aux normes utilisées dans les essais pratique avec la FRA (Frequency analysis).

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : modélisation d'un transformateur de puissance en vue de diagnostic

I.1 Introduction.....	3
I.2 Modélisation du transformateur.....	3
I.2.1 Modèle a 50 Hz	3
I.2.2 Généralité sur les modèles HF.....	4
I.2.3 Modèle HF dans la littérature (haute fréquence).....	5
I.3 Conclusion	12
I.4 Diagnostic des transformateurs.....	12
I.4.1 Analyse d'huile.....	12
I.4.1.1 Les analyses physico-chimiques.....	13
I.4.1.2 Analyse des furanes.....	16
I.4.1.3 Analyse des gaz dissous dans l'huile.....	17
I.4.2 Mesures diélectriques.....	26
I.4.2.1 Mesure du facteur de puissances et de la capacité.....	26
I.4.2.1.1 Mesure du facteur de puissance et de capacité des enroulements.....	26
I.4.2.1.2 Mesure de la capacité des bornes.....	27
I.4.2.2 Mesure de résistance d'isolement en courant continue.....	28
I.4.3 Mesures électriques.....	30
I.4.3.1 Mesure du courant d'excitation.....	30
I.4.3.2 Mesure de rapport de transformation.....	30

I.4.3.3 Mesure de la résistance d'enroulements.....	31
I.4.3.4 Mesure de la réactance de fuite.....	31

Chapitre II : La technique FRA

II.1 Introduction.....	33
II.2 L'équipement de mesure.....	33
II.3 Analyse de la réponse en fréquence (FRA).....	36
II.3.1 Principe de la méthode.....	37
II.3.2 Objectifs des mesures par FRA.....	37
II.3.3 Quand faut-il faire un test FRA?.....	38
II.3.4 Type d'essais par FRA.....	39
II.4 Méthodes d'interprétation.....	41
II.4.1 Interprétation Méthodologique.....	41
II.4.2 Domaine de fréquence pour les interprétations.....	42
II.5 Conclusion.....	43

Chapitre III : modèle adopté et calculs des paramètres

III.1 Introduction.....	44
III.2 Schéma équivalent complet des enroulements HT et BT du transformateur.....	45
III.3 Logiciel de simulation P-Spice.....	46
III.3.1 Choix des logiciels de référence.....	46
III.3.2 Simulation des enroulements HT et BT sur P-Spice.....	46

Chapitre IV : Validation du modèle adopté par des essais et discussions des résultats

IV.1 Introduction.....	65
IV.2 Différents types de défaillances d'isolement dans un transformateur.....	65
IV.2.1 Défaits entre spires.....	65
IV.2.2. Défaits entre enroulements.....	66
IV.2.3 Défaits à la masse et influence du régime de neutre.....	66
IV.2.4 Défaits liés à la technologie.....	67
IV.3 Schéma équivalent à l'enroulement HT et BT adopté.....	69
IV.3.1 Validation du modèle adopté.....	69
IV.3.1.1 Injection d'une tension sinusoïdale.....	69
IV.4 Etude de la réponse fréquentielle du gain de l'enroulement suite à des sollicitations sinusoïdales à fréquence variable.....	70
IV.4.1 Réponse en fréquence du gain de l'enroulement HT sans défaut (sain).....	71
IV.4.2. La réponse fréquentielle de l'enroulement HT avec défaut.....	72
IV.4.2.1 Court-circuit entre spires.....	72
IV.4.2.1.1 Défaut entre une seule spire.....	72
IV.4.2.1.2 Défaut entre deux spires (2).....	75
IV.4.2.1.3 Défaut entre trois spires.....	77
IV.4.2.1.4 Défaut entre quatre spires.....	79
IV.4.2.1.5 Défaut entre cinq spires.....	81
IV.4.2.1.6 Défaut entre six spires.....	82
IV.4.2.2 Circuits ouverts.....	82
IV.4.2.3 Déformations propres de l'enroulement.....	85
IV.4.2.4 Défaut entre partie active et la masse.....	87

IV.5 Conclusion.....	90
Conclusion générale	91

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Suite à la progression rapide des nouvelles technologies, les systèmes industriels sont de plus en plus complexes et l'opération de diagnostic est devenue indispensable pour assurer la sûreté de fonctionnement et la disponibilité de ces systèmes. Bénéficiant des outils déjà existants en automatique, la recherche dans le domaine du diagnostic a connu une évolution très importante qui lui a permis de développer plusieurs méthodes donnant une solution aux problèmes de la détection et de l'isolation multi-défauts. Dans certains systèmes complexes, la phase de détection et de localisation d'un ou de plusieurs défauts est nécessaire. Les méthodes de diagnostic que nous proposons reposent sur la connaissance d'un modèle capable de décrire précisément le fonctionnement du système à surveiller. Si un modèle décrivant le fonctionnement normal du système est disponible, l'opération de diagnostic des défauts comporte une phase d'extraction d'indicateur de défauts et une phase de prise de décision par des techniques statistiques d'évaluation des résidus. La génération d'indicateurs de défauts (ou résidus) permet d'évaluer un écart par rapport aux conditions normales de fonctionnement ainsi d'identifier la cause de tout changement anormal. Nous savons qu'une variété importante de défauts peut se produire à l'intérieur des transformateurs.

La surveillance et le diagnostic des transformateurs a fait l'objet de nombreux travaux au cours de ces deux dernières décennies.

L'analyse des signatures spectrales des courants en était la première tentative pour détecter les pannes des transformateurs de puissances, en se basant sur des logiciels de surveillance et d'acquisition de données.

Le diagnostic s'appuie sur la bonne compréhension des systèmes, à fin d'hiérarchiser les défauts sur la base de leur impact sur le fonctionnement de la et sur la fréquence d'apparition. Ceci permet de focaliser l'étude sur un nombre limité de défaut et l'apparition des défaillances, soit par des analyses logiques du processus de fonctionnement. Citant par exemple l'effet de sur-échauffement du transformateur qui provoquerait une dégradation des isolants des conducteurs et par conséquent, engendrait des courts-circuits dans les bobinages. Soit par des études statistiques faites généralement dans l'industrie sur un large panel de l'expérience des praticiens est aussi une source fiable et précieuse d'informations.

Notre travail est une étude de détection de défauts dans les enroulements du transformateur par la méthode d'analyse fréquentielle de la réponse de l'enroulement suite à des sollicitations sinusoïdales à fréquence variable. Dans cette optique nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitres.

Le premier chapitre est dédié à la synthèse des modèles traduisant le comportement des enroulements du transformateur de puissance en haute fréquence, utilisés pour les études de diagnostic et du contrôle non destructif.

Le deuxième chapitre est une présentation de quelques généralités sur les différentes techniques de diagnostic des enroulements du transformateur telle l'analyse d'huile, des gaz dessous et la technique d'analyse de la réponse fréquentielle.

La présentation du modèle adopté et la procédure de calcul de ses paramètres sont l'objet du troisième chapitre.

Le dernier chapitre est consacré pour valider le modèle adopté et son exploitation pour une étude de diagnostic à la haute fréquence, en réalisant divers défauts sur l'enroulement haute tension et interprétations des résultats obtenus.

Nous terminons par une conclusion générale, tirée des résultats de simulations réalisées et quelques perspectives envisagées dans le cadre de la problématique posée

CHAPITRE I :
***Modélisation d'un
transformateur de puissance
en vue de diagnostic***

I.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.

Nous présentons les principaux modèles de transformateurs qui existent dans la littérature et leurs caractéristiques afin de montrer que le modèle issu du principe de la dualité est mieux adapté aux régimes variables de fréquence

I.2 Modélisation du transformateur

I.2.1 Modèle a 50 Hz

Considérons deux enroulements de n_1 et n_2 spires, qui sont traversées par le même flux d'induction magné

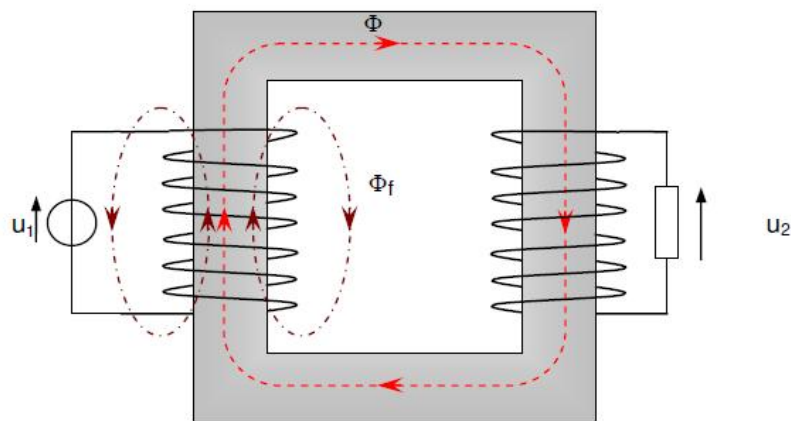


Fig. I.1 : Deux bobines couplées sur un circuit magnétique.

Le modèle élémentaire à 50Hz pour ce type du transformateur est montré dans la figure (I.1). Ce modèle comporte un transformateur idéal avec le rapport $m = \frac{n_1}{n_2}$ et les inductances les résistances, dans lesquelles nous avons : [1]

Ø R_1, X_1 : Résistance et inductance de l'enroulement primaire.

Ø R_2, X_2 : Résistance et inductance de l'enroulement primaire.

- Ø X_m : Inductance de magnétisation du circuit magnétique.
- Ø R_f : Résistance qui représente des différentes pertes dans le circuit magnétique.

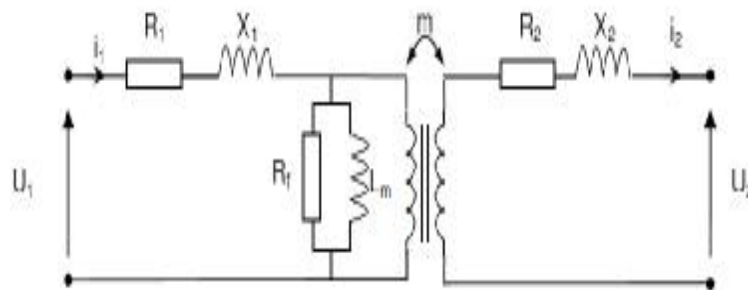


Fig. I.2 : Modèle d'un transformateur monophasé à 50Hz.

I.2.2 Généralité sur les modèles haute fréquence (HF)

En HF, même si négligeons l'effet non-linéaire du noyau de fer, la modélisation du transformateur devient plus complexe par rapport celle à 50 Hz en raison de plusieurs phénomènes :

- Ø Effets des courants de Foucault dans le noyau de fer et dans les conducteurs de l'enroulement
- Ø Actions des capacités apparaissent entre les spires et entre les spires et la masse.

De nombreux travaux ont été réalisés pour essayer de trouver un modèle unique du transformateur en HF. Cet objectif est loin d'être atteint en raison des dépendances des phénomènes énumérées ci-dessus liés aux différentes structures de chaque transformateur.

En réalité, nous avons constaté que la modélisation du transformateur de puissance est normalement basée soit sur l'étude du régime transitoire, soit sur la distribution de tension dans l'enroulement pour dimensionner les isolants contre les surtensions. Les modèles du transformateur peuvent être donc classés en deux grandes tendances: [1]

a) Modèle détaillé

Ce type de modèle consiste à représenter le transformateur par un grand réseau de capacités et d'inductances. Le calcul de ces paramètres nécessite la résolution des équations électromagnétiques complexes et des informations sur les matériaux et la géométrie détaillée de chaque transformateur. Comme chaque spire est modélisée en détail, ce type de modèle est plutôt destiné à l'étude de la distribution de tension dans les enroulements. [1]

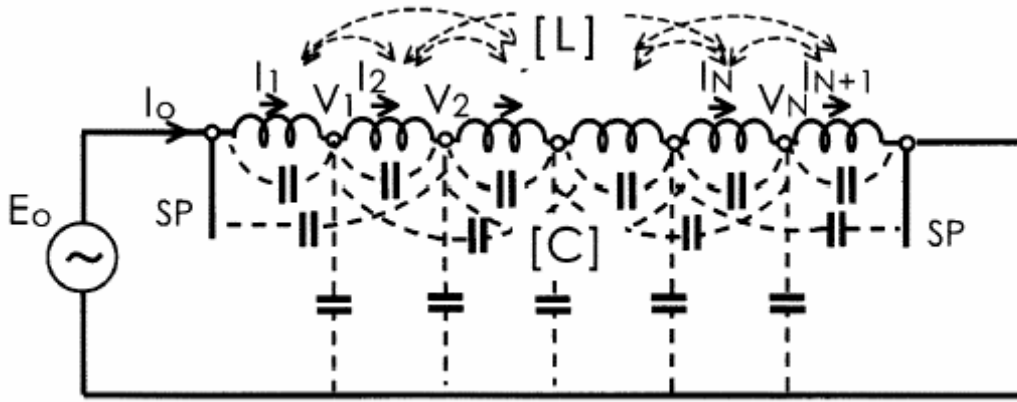


Fig. I.3 : Exemple du circuit équivalent détaillé d'un enroulement.

b) Modèle entrée-sortie

Dans ce type de modèle, le transformateur est considéré comme une boîte noire et la modélisation se base sur les caractéristiques en domaine fréquentiel des impédances du transformateur vues de ses bornes. À partir de ces caractéristiques un circuit équivalent sera développé. Ce modèle est convenable pour l'étude de l'interaction entre le transformateur et le réseau. [1]

Parmi ces deux types de modèle, c'est le deuxième qui est approprié pour notre étude. Nous allons donc étudier les modèles de ce type issus de la littérature.

I.2.3 Modèle HF dans la littérature (haute fréquence)

a) Modèle de Morchid

Ce modèle est utilisé dans logiciel EMTP pour modéliser le transformateur en HF. Il appartient au deuxième type de modèle. Supposons un transformateur de n bornes (y compris HT et BT), l'équation matricielle qui relie les tensions et les courants des bornes est (1.1) ou sous la forme réduite (1.2).

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{12} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1n} & Y_{2n} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Ou

$$[Y][V] = [I] \quad (1.2)$$

Avec $[Y]$: matrice de conductance, dont les éléments sont complexes, et dépendants de la fréquence.

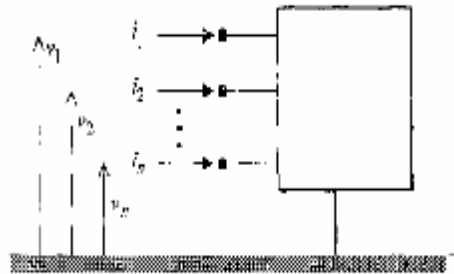


Fig. I.4 : Modèle d'un transformateur considéré comme une boîte noire de n bornes.

Dans ce modèle, chaque élément de matrice des conductances est approximé avec une fonction rationnelle qui a les pôles et les zéros réels et complexes conjugués. Ensuite ces fonctions rationnelles seront synthétisées par des circuits R, L, C comme dans la fig. (II.5).

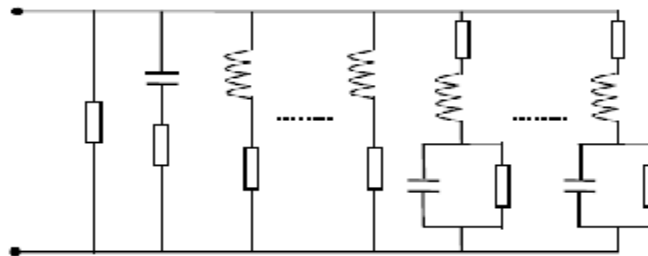


Fig. I.5 : Circuit équivalent pour un élément de la matrice de l'inductance

Ensuite le circuit équivalent sera établi pour pouvoir être introduit dans logiciel EMTP. Cependant, pour diminuer le calcul, ce modèle a fait une hypothèse simplificatrice en considérant que matrice $[Y]$ est symétrique, ce qui n'est pas toujours valable. De plus, une autre difficulté provient de la détermination des éléments de la matrice $[Y]$ qui est aussi compliquée lors qu'elle est réalisée en HF. L'avantage de ce modèle est qu'il nous permet de modéliser tous les types de transformateur à condition d'avoir les valeurs de matrice de conductance. [2]

b) Modèle de Leon

Dans les travaux [3], [3'] les auteurs ont présenté le développement d'un modèle du transformateur de puissance en HF. Ce modèle permet de modéliser en détail les enroulements et le noyau de fer. Pour les enroulements, les éléments suivants sont calculés :

- Ø Une matrice d'inductance de fuite entre les paires de spires (ou sections/galettes)
- Ø Une matrice de capacités entre les spires (ou sections/galettes) et entre les spires et la masse.
- Ø Une matrice de résistance, qui dépend de la fréquence et qui tient en compte des courants de Foucault.

Pour chaque colonne un système de trois matrices comme ci-dessus est calculé et puis est transformé sous forme d'une équation d'état. Ensuite un circuit de Foster en série figure (I.6) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne.

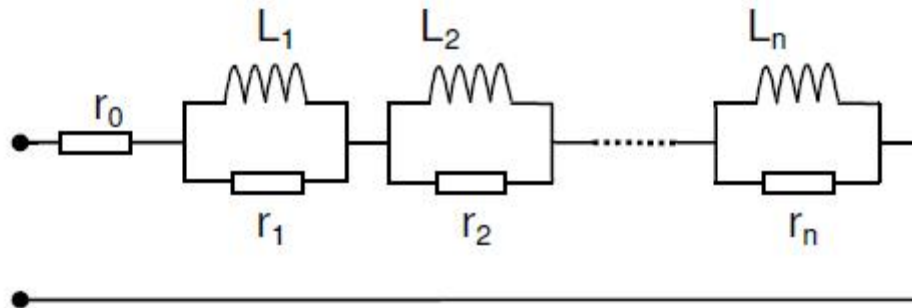


Fig. I.6: circuit de Foster en série.

Pour le noyau de fer, l'effet des courants de Foucault est modélisé par un circuit de Cauer figure (II-7)

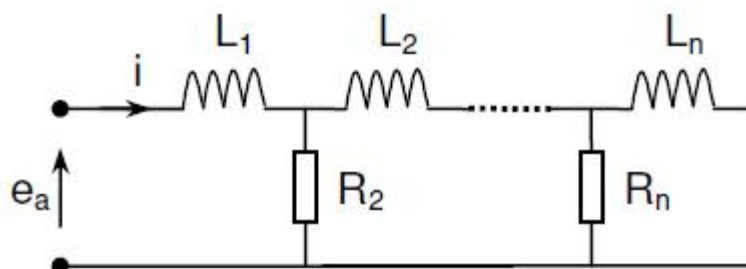


Fig. I.7: modèle de Cauer pour le noyau de fer.

Ce modèle, qui ne tient pas compte de l'inductance mutuelle dans l'air entre les enroulements, nous permet quand même de modéliser le transformateur par un circuit équivalent. Pourtant, il reste encore assez compliqué en raison des calculs analytiques et des transformations en circuit équivalent.[3]

c) Modèle de Chimklai

Dans ce modèle, les auteurs ont proposé une méthode simple pour modéliser un transformateur de puissance. Ce modèle figure (I.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 seront synthétisés par les mesures et seront rajoutés dans le circuit du modèle classique. En effet, chaque circuit rajouté représentera 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 après, et nous choisirons aussi cette méthode pour modéliser le transformateur en raison de son efficacité et de sa simplicité.

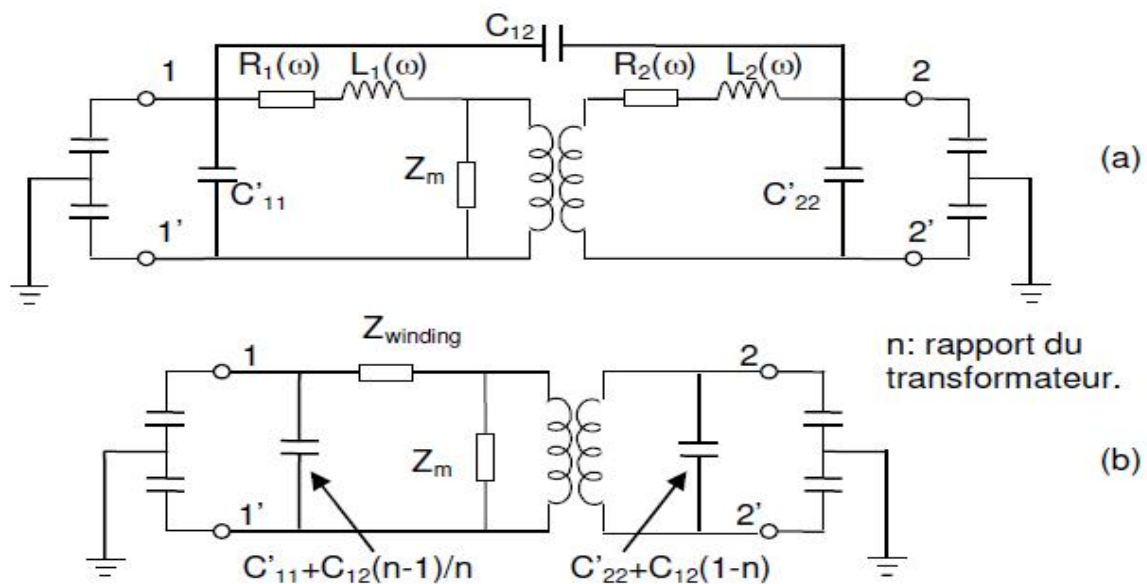


Fig. I.8 : Modèle du transformateur de Chimklai

(a) circuit d'origine, (b) circuit simplifié

Dans ce travail, 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 :

- Ø la considération de la dépendance en fréquence de la résistance et de l'inductance de l'enroulement, dites l'impédance de l'enroulement ($Z_{winding}$) comme dans la figure (II.9). Cette impédance est synthétisée par une méthode d'approximation non linéaire pour obtenir un circuit R, L, C comme dans la fig. ci-dessous.

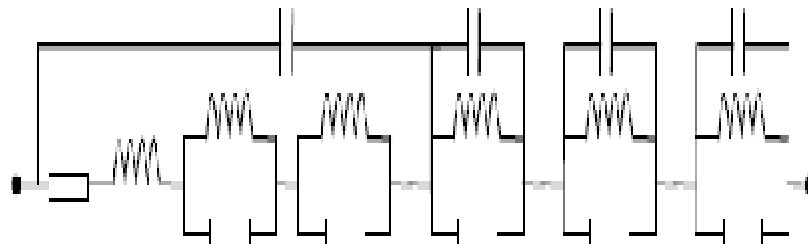


Fig. I.10 : $Z_{winding}$

- Ø le rajout d'un système de capacités dont capacité entre les enroulements, capacité entre l'enroulement et la masse, capacité entre les spires d'un enroulement, capacité entre l'extérieur d'un enroulement et l'extérieur d'un autre. 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 dont chacune est connectée à une extrémité de l'enroulement.

Ces travaux nous donnent une bonne base pour développer nos modélisations du transformateur en HF. Pourtant, il reste encore des limites : il considère que les phases sont symétriques, la fréquence jusqu'à laquelle le modèle reste valable est de 100 kHz.[4]

d) Modèle de Noda

Dans [5], les auteurs montrent le développement d'un modèle du transformateur de puissance en HF. Ce modèle suit le principe de celui de Chimklai. Donc à partir de modèle à 50Hz, en HF il tient en compte de:

- Ø Capacités entre les enroulements, et entre les enroulements et la masse (C_{s1} , C_{s2} , C_{sm})
- Ø Effet de peau du conducteur et du noyau de fer (Z_{skin})
- Ø Résonances créées par les inductances de l'enroulement et capacités entre les spires ($Y1, Z2$).

Chaque phénomène sera représenté par un circuit équivalent. Le modèle complet est montré dans la figure (I.11)

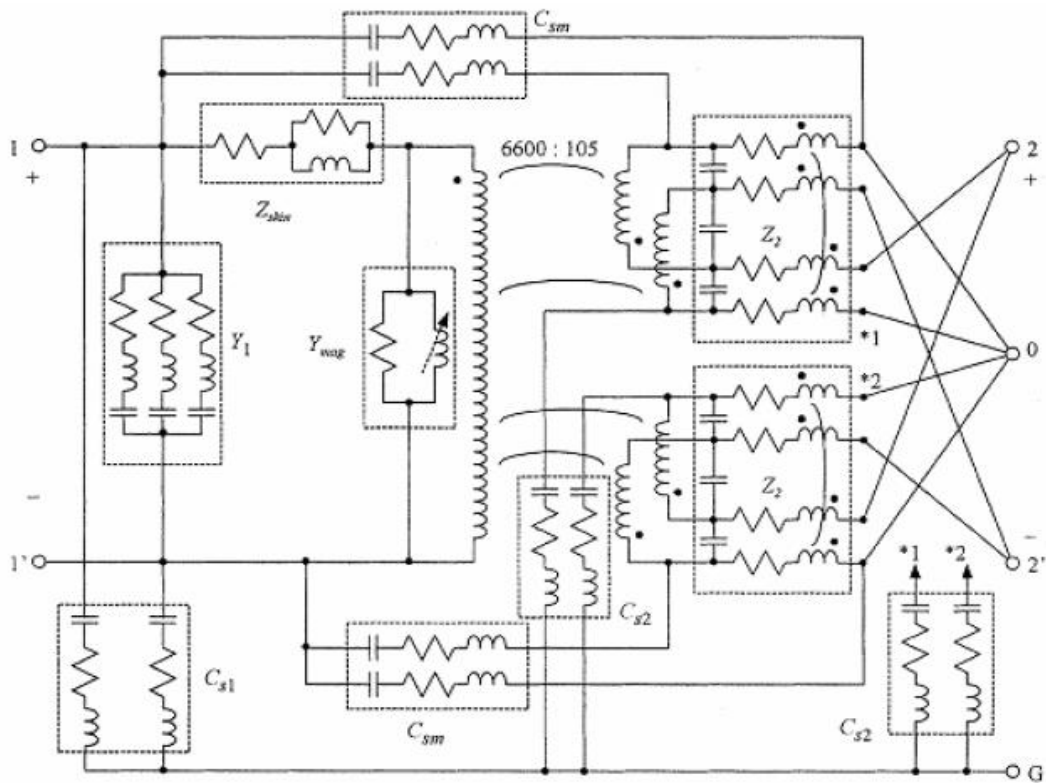


Fig. I.11 : Modèle de Noda

Ce travail a donné un bon résultat sur la modélisation du transformateur en HF. Il a montré des méthodes simples pour synthétiser les circuits équivalents représentant les phénomènes comme les résonances, ou les capacités. Mais en raison de la structure particulière monophasée, la disposition particulière de l'enroulement de BT (divisée en quatre), le modèle reste encore difficile à appliquer. [5]

e) Modèle d'Andrieu

Dans ce travail [6], les auteurs ont développé un modèle d'un transformateur de distribution triphasé à deux enroulements par des principes comme dans le modèle de Chimklai figure (I.8). Pour modéliser le transformateur en HF, les phénomènes suivants sont pris en compte:

- Ø les capacités
- Ø les résonances en HT
- Ø l'impédance de l'enroulement de BT, dépendant la fréquence (ZCC).

L'auteur a également proposé une procédure, dans la quelle les mesures nécessaires sont fixées pour développer un modèle à HF. Ces mesures sont les mesures des capacités, les mesures en court-circuit et les mesures en circuit ouvert. Mais la fréquence limite dans laquelle le modèle reste valable est inférieure à 1MHz ; pou une fréquence plus haute on montre des désaccords entre le résultat de la simulation et la mesure. [6]

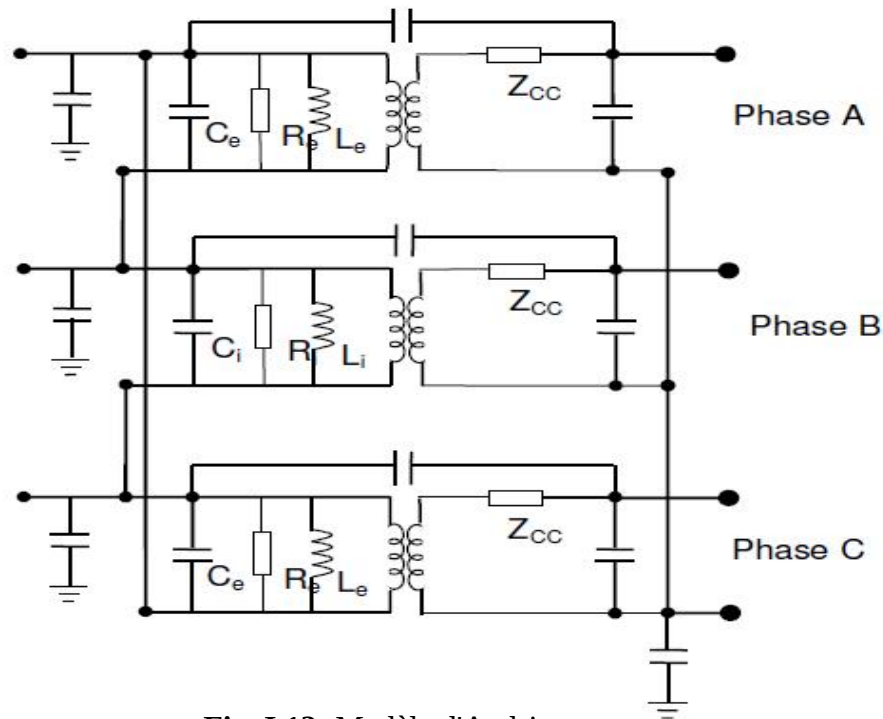


Fig. I.12: Modèle d'Andrieu

Le circuit équivalent de l'impédance Z_{CC} est montré dans la figure (I.13).

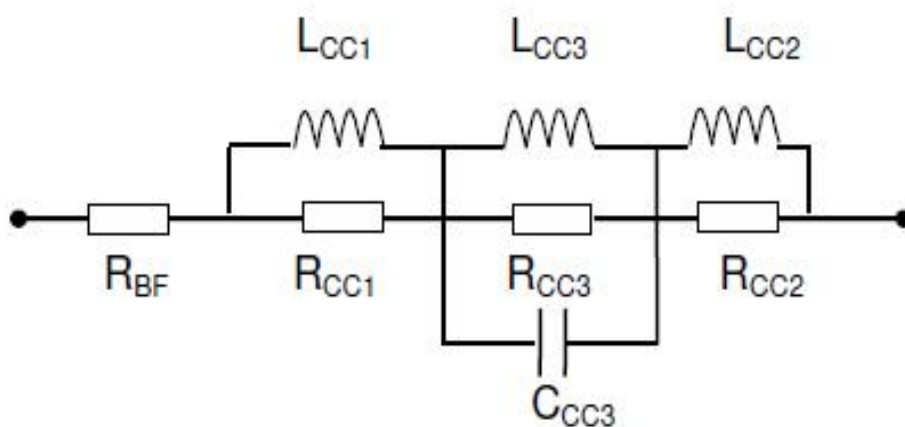


Fig. I.13: Z_{CC}

f) Modèle de Gustavsen

Ce modèle suit le principe de celui Morchid, en considérant le transformateur comme une boîte noire. La différence est la méthode d'approximation des éléments de la matrice d'inductance. Dans ce modèle les auteurs ont développé une méthode, dite « vector fitting » pour approximer chaque élément par un circuit R, L, C équivalent.

Le code d'approximation pour ce modèle est distribué gratuitement et permet de faire la simulation de façon simple et efficace. Les avantages et désavantages de ce modèle restent les mêmes que ceux du modèle de Morchid, c'est la difficulté des mesures pour obtenir la matrice d'inductance, qui est très délicate en HF. [7]

Remarque

Dans ce chapitre, nous avons résumé les différents modèles de transformateur en haute fréquence. Parmi ces modèles, on s'intéressera au modèle qui représente le transformateur par un schéma équivalent à constante localisées et à paramètres constants. Les paramètres de ce schéma, inductifs (selfs et coefficients de mutuelles), capacitifs et résistifs, doivent tenir compte aussi de la géométrie du transformateur.

I-4 Diagnostic des transformateurs

Les actions de diagnostic à réaliser sur les transformateurs sont :

I.4.1 Analyse d'huile

Le fonctionnement des transformateurs sans défaillance dépend dans une large mesure de la qualité des huiles minérales isolantes utilisées. Les caractéristiques des huiles dégradent par l'effet de la contamination, de l'humidité et du vieillissement.

L'huile isolante est l'un des éléments les plus importants dans un transformateur qui nécessite surveillance et un entretien car sa fonction est d'assurer l'isolation et le refroidissement de celui-ci.

L'huile est un fluide qui piétre dans toute les parties internes du transformateur, sa circulation permet l'évacuation de la chaleur produite par les enroulements, par convection à travers la cuve du transformateur.

La connaissance de l'état d'huile et des gaz qui peuvent être dilués dans ce dernier est d'une importance fondamentale pour assurer un bon fonctionnement des transformateurs, il est par conséquent nécessaire d'effectuer une vérification annuelle d'état de l'huile.

Les analyses d'huile peuvent être réalisées soit sur site soit en laboratoire mais cette dernière est plus poussée et permet d'avoir plus d'informations que celles réalisées sur site.

Les aspects les plus significatifs à vérifier sur l'huile, reposent sur un nombre important d'analyse telle que :

- Les analyses physico-chimiques.
- Les analyses des furanes.
- L'analyse des gaz dissous (DGA).

I.4.1.1 Les analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques ont pour but de déterminer la tenue diélectrique de l'huile et son état d'oxydation à travers les paramètres suivants :

a) Aspect et couleur

L'aspect est un test visuel de l'huile qui permet de détecter la présence des corps en suspension (poussière, eau) et d'évaluer la couleur et la viscosité. Un bon état visuel de l'huile, signifie un aspect limpide.

La couleur est une propriété intrinsèque de l'huile neuve, elle a une relation avec les hydrocarbures qui constituent l'huile. Elle d'apprécier la qualité des huiles neuves et constitue un moyen efficace pour surveiller l'acidité des huiles en service. Elle renseigne également sur la dégradation ou la contamination de l'huile donne lieu à une augmentation de la couleur qui évolue depuis une couleur jaunâtre presque transparente, pour une huile neuve, jusqu'à un jaune rougeâtre ou rouge foncé pour une huile vieillie.

Principe

Le principe de mesurer la couleur est basé sur la détermination en lumière transmise et est exprimée par un nombre obtenu par comparaison avec une série de couleurs normalisées (étalons).

Appareillage

L'indice de couleur est mesuré selon la norme ASTM D1500. L'appareil utilisé pour cette mesure est un spectrophotomètre, de type lovibond PFX automatic colorimeter.

Calorimètre composé d'une :

- Ø Source de lumière de verres étalons de couleur
- Ø Un logement muni de cache pour les éprouvettes.
- Ø Affichage du menu et clavier.

Mode opératoire

Examiner l'huile dans un flacon cylindrique et sous une épaisseur égale à 33 mm. Un diaphragme de 20mm de diamètre limite la plage colorée. Comparer cette plage à deux jeux de verre de couleur que l'on fait défiler pour les choisir, devant un diaphragme de même diamètre que le précédent, éclaire par la même source lumineuse. Une fiole identique à celle qui renferme l'huile et remplie d'eau distillée, est placée devant ce diaphragme dans le but de rendre bien comparables les plages à étudier. L'huile et le verre choisi en même temps dans l'oculaire de l'appareil et on définit la couleur d'huile par l'index ASTM D1500 correspondant au verre dont la teinte se rapproche le plus de celle de l'huile, les résultats s'expriment selon le tableau ci-dessous :

Couleur	Blanc pur	Blanc crème	Extra pale	Citron extra	Citron pale	Orange extra	Orange pale	orange	Rouge clair	Rouge fonce	Rouge bordeaux
numéro	<0.5	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6	7et8

Tableau I.1 : Numéro significatif pour chaque type de couleur

b) La viscosité

La viscosité traduit les forces qu'opposent les molécules d'huile à une force tendant à les déplacer. En d'autres termes, elle mesure les frottements dus aux mouvements internes entre les molécules du fluide [8]. C'est un critère particulièrement important pour apprécier la qualité de l'huile.

La viscosité et sa variation avec la température sont des paramètres de première importance pour le transfert thermique. En effet, plus le liquide est visqueux, plus il est difficile de le faire circuler dans l'appareil, pour refroidir les parties actives chaudes [9].

c) L'acidité (indice de neutralisation)

La détermination de l'acidité a une grande importance. Elle permet de suivre l'altération de l'huile, de donner une idée claire sur son degré d'oxydation et de décider du mémento ou elle doit être mise hors service. Elle est due à la présence de produits hydrocarbures acides tels que les carboxyliques et les hydropyroxliques dont la formation est favorisée sous l'effet de la température, de la pression et de l'oxygène.

Sa mesure se fait par un tirage acido-basique. Elle est déterminée en mg KOH/g. d'après la norme CEI 62 021, une borne huile possède une acidité inférieure à 0.03mg KOH/g. indice de

neutralisation (mg KOH/g) : il permet de détecter la présence de composés acides produits par l'oxydation de l'huile.

d) Teneur en eau (mg / Kg)

Ce paramètre permet de déterminer s'il y a condensation ou infiltration d'eau à l'intérieur du transformateur, il est très important car la présence d'eau conduit à une perte de la capacité diélectrique de l'huile. La présence d'humidité dans l'eau permet aussi de déterminer la quantité d'eau dans la cellulose ce qui provoque le vieillissement prématuré de cette dernière [10].

e) La teneur en soufre

L'huile peut contenir des traces de soufres, soit sous forme de soufre libre, soit sous forme de composés sulfurés, leur formation conduit à des défaillances dans l'isolement cellulosique [11].

Le dérivé de soufre est diffusé à travers le papier et attaque sélectivement le cuivre en formant le Cu_2S , Ceci apporte par conséquent une augmentation de la probabilité de défaillance par manque d'isolement dans le transformateur [12].

f) Facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$)

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électriques qui se traduisent par un échauffement plus ou moins important du liquide. La cause principale de ces pertes est la présence d'un courant de fuite qui traverse le liquide sous l'effet du champ électrique.

Le facteur de dissipation diélectrique « $\tan \delta$ » est la tangente de l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et ce courant de fuite (l'angle des pertes) [8]. Il permet de déterminer précisément l'état physico-chimique dans son rôle premier est de connaître le degré de contamination des l'huile isolante par la présence d'impuretés et de produits polaires; c'est un paramètre très significatif pour la conductibilité du diélectrique car plus le facteur de dissipation est grand moins l'huile est isolante [10].

g) Tension de claquage (kV)

Ce paramètre indique la capacité de l'huile à supporter la tension à laquelle elle est soumise en service. Une réduction de cette valeur est généralement due à une pollution par des particules solides ou par de l'eau en état libre [12].

h) Analyse de particules

La rigidité diélectrique de l'huile dépend de la concentration, de la taille, de la forme et du type de particules, ainsi que du degré d'humidité dans l'huile.

Les principales sources de particules dans les transformateurs sont la poussière, les fibres de cellulose et la saleté résiduelle. Il est possible de trouver aussi des particules de fer, de cuivre et d'autres métaux. Pour déterminer ces sources de génération il est important d'identifier ces particules [12].

I.4.1.2 Analyse des furanes

a) Composants furaniques

La dégradation des matériaux cellulosiques constituant l'isolation solide des enroulements du transformateur conduit à la formation des dérivées furaniques ; leur présence dans les huiles du transformateur est un bon outil de diagnostic de l'état de l'isolation de ce dernier.

Les composants furaniques sont générés quand la cellulose est décomposée thermiquement, par conséquent un contenu élevé de composés furaniques indique un haut degré de dégradation du papier isolant.

L'analyse de composés furaniques dans l'huile est effectuée par chromatographie liquide dans le laboratoire.

Les indices à analyser selon la norme CEI61198 sont :

Ä 2 FAL : furfuraldéhyde (plus significatif)

Ä 5 HMF : 5-hydroxyméthylfuraldéhyde.

Ä 2ACF : 2-furilméthylcétone

Ä 5 MEF : 5-méthylfurfuraldéhyde.

Généralement les niveaux de furaniques dans les transformateurs sont en dessous de 0.1ppm. Dans des vieux équipements, ils peuvent dépasser 1ppm, même atteindre 10ppm.

Certains chercheurs ont proposé des équations qui mettent en relation la teneur en furaniques et le degré de polymérisation de l'isolement de cellulose.

b) Degré de polymérisation

Les matériaux de cellulose (papier et carton) constituent la plus grande partie de l'isolement des transformateurs de puissance.

Les papiers isolants se dégradent pour des raisons diverses à savoir :

Ä La chaleur (surcharges, décharges,...)

- Ä La contamination (saleté, humidité, oxygène)
- Ä Les efforts électrodynamiques (court-circuit)
- Ä Les contraintes thermiques

La dégradation de l'isolation du papier a comme conséquence la perte de ces propriétés mécaniques, il devient fragile et ne peut rester aux efforts mécaniques résultants des forces électromagnétiques, à la dilatation due à la température et aux vibrations.

A partir de l'analyse d'un échantillon de papier on obtient la valeur de degré de polymérisation D.P qui permet de mesurer son temps de vie espérer.

Le papier vierge a un D.P de 1000 ; après le séchage et l'imprégnation d'huile (quand il sera dans le transformateur) cette valeur tombe à 800. Fin de vie du papier est estimé à : $D.P < 200$.

A partir de l'analyse de l'échantillon de papier on obtient la valeur du degré de polymérisation D.P qui permet de mesurer son temps de vie espéré.

I.4.1.3 Analyse des gaz dissous dans l'huile

a) Formation de gaz dissous dans l'huile lors de défaut

L'apparition de défauts d'origine thermique conduit à la dégradation de l'huile. Chaque type de défaut fait cuire l'huile ou le papier d'une manière différente, produisant des quantités relatives de gaz dissous qui caractérisent le défaut.

Par conséquent, les analyses des gaz dissous permettent de suivre le comportement du transformateur à travers des analyses par chromatographie en phase gazeuse, elles permettent de :

- Détecter la présence d'anomalies dans le transformateur dès leur premier stade d'apparition et de suivre leur évolution.
- D'avoir des hypothèses sur le type de défaut (arc, point chaud, décharge partielle, mauvaise connexion d'un contact) [10].

Cette technique de diagnostic est une des méthodes prédictives plus fiables et présente l'avantage de pouvoir être effectuée sans laisser le transformateur hors service.

La technique est basée sur le fait que la quantité et la distribution relative de ces gaz dépend du type et de la gravité de la détérioration et des efforts auxquels le transformateur a été soumis [12].

Les gaz sujet au diagnostic et leur origine sont représentés dans le tableau ci-dessous

Type	Gaz	Symbole	origine
Gaz combustibles	Acétylène	C ₂ H ₂	Il apparaît par défauts électriques (décharges) de haute énergie.
	Ethylène	C ₂ H ₄	Ce gaz se génère par la décomposition thermique de l'huile ou de l'isolant solide.
	Ethane	C ₂ H ₆	Proviennent de la décomposition thermique de l'huile.
	Hydrogène	H ₂	Il se génère par défauts électriques (décharges) de basse ou de haute énergie.
	Méthane	CH ₄	Généralement il apparaît quand il existe des décharges partielles ou de décomposition thermique de l'huile.
	Monoxyde de Carbone	CO	Proviennent de la décomposition de la cellulose des matériaux qui composent le transformateur.
Gaz non combustibles	Anhydride carbonique	CO ₂	
	Azote	N ₂	Pour vérifier la prise d'échantillon.
	Oxygène	O ₂	

Tableau I.2 : Les gaz pour le diagnostic [12]

b) Méthode d'interprétation des résultats

L'analyse des gaz dissous dans les huiles des transformateurs est une technique de diagnostic bien connue dans l'industrie et plusieurs critères ont été établis. Les critères communs les plus connus sont ceux de Rogers, Doernenburg, CEI 60599 et triangle de Duval [11].

b.1) Méthode de Rogers

Rogers a développé cette méthode dans lequel trois rapports de gaz sont employées (C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6) pour produire des codes basés sur des gammes des 0 rapports comme montré dans le Tableau I.3. La combinaison des codes produits, peut être liée à une interprétation diagnostic comme montré dans le Tableau I.4 [11].

Rapport de gaz		Type de gaz	Range	Code
A	C_2H_2/C_2H_4	Acétylène/Ethylène	< 0,1	0
			0,1 à 1	1
			1 à 3	1
			> 3	2
B	CH_4/H_2	Méthane/hydrogène	< 0,1	1
			0,1 à 1	0
			1 à 3	2
			> 3	2
C	C_2H_4/C_2H_6	Éthylène/Éthane	< 1	0
			0,1 à 1	0
			1 à 3	1
			> 3	2

Tableau I.3 : Code de Rogers [12]

Case	Type défaut	A	B	C	Problèmes trouvés
0	Sans défaut	0	0	0	Vieillessement normal
1	Décharge partielle de basse énergie	1	1	0	Décharges électriques dans les bulles, provoquées par des vides d'isolation, saturation en gaz superbe dans l'huile ou la cavitation (des pompes) ou humidité élevée dans l'huile (bulles de vapeur d'eau)
2	Décharge partielle de haute énergie	1	1	0	Égal que ce qui est précédent mais avec perforation de l'isolation de cellulose par étincellement ou formation d'arcs. Ceci produit généralement CO et CO ₂ .
3	Décharges de basse énergie, arcs	1-2	0	1-2	Étincellement continu en huile entre les connexions mauvaises de potentiel différent ou au potentiel flottant; panne de l'huile diélectrique entre les matériaux solides d'isolation.
4	Décharges de haute énergie, arcs	1	0	2	Décharges (formation d'arcs), panne par formation d'arcs de l'huile entre les enroulements, entre les enroulements et terre ou formation d'arcs à travers des contacts du régulateur pendant le fonctionnement avec l'huile fuyant au réservoir principal.
5	Défaut thermique de basse T < 150°C	0	0	1	Surchauffe isolée de conducteur, ceci produit généralement CO et CO ₂ parce que ce type de défaut comporte généralement l'isolation de cellulose.
6	Défaut thermique de T entre 150 - 300 °C	0	2	0	Points surchauffant dans le noyau dû aux concentrations de flux. Les problèmes ci-dessous sont en règle des températures croissantes des points chauds dans le noyau. Stratifications court-circuitées dans le noyau. Surchauffe du conducteur de cuivre. Mauvais branchement dans l'enroulement ou mauvais contacts dans le régulateur. Circulation de courants dans le noyau. Ces problèmes produisent généralement CO et CO ₂ parce qu'ils comportent généralement l'isolation de cellulose
7	Défaut thermique de T entre 300 - 700 °C	0	2	1	
8	Défaut thermique de T > 700 °C	0	2	2	

Tableau I.4: Interprétation de Rogers [12]

b.2) Méthode de CEI 60599

Le critère CEI 60599 a été employé pour plusieurs décennies et une expérience considérable est accumulée dans le monde entier pour diagnostiquer les défauts naissant dans les transformateurs.

Les six grandes classes de défauts sont présentées sous forme d'une table d'interprétation ci-dessous (Tableau I.5).

Cas	Défaut typique	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
DP	Décharges partielles	NS*	< 0,1	< 0,2
D1	Décharge de basse énergie	> 1	0,1 ÷ 0,5	> 1
D2	Décharge d'haute énergie	0,6 ÷ 2,5	0,1 ÷ 1	> 2
T1	Faute thermique, T < 300 °C	NS*	> 1 mais NS*	< 1
T2	Faute thermique, 300°C < T < 700°C	< 0,1	> 1	1 ÷ 4
T3	Faute thermique, T > 700°C	< 0,2**	>1	> 4

Tableau I.5 : Interprétation de la CEI60599 [12]

NS* : non significatif quel que soit la valeur

Le Tableau I.6 ci-dessous donne quelque défaut typique pour une recherche plus approfondie des causes de défauts ou de dégradation dans le transformateur.

Typique	Défaut	Exemple
DP	Décharge partielle	Décharge dans les cavités gazeuses résultant d'une imprégnation incomplète, d'une forte humidité dans le papier, de la sursaturation de l'huile ou de la cavitation, et entraînant la formation de cire-X.
D1	Décharge de faible énergie	Etincelle ou arc entre mauvaise connexion à potentielle différent ou à potentielle flottant en provenance d'anneau statique, de tore, de disque ou de conducteur d'enroulement adjacente, de mauvaise soudure ou de boucle fermé dans le noyau. Décharge ente les pièces de serrages, la traversée et la cuve, la haute tension et le tore dans les enroulements, sur la paroi de la cuve. Cheminement dans le calage de bois, la colle des poutres d'isolation, les cales entre enroulements, claquage dans l'huile, courant de coupure dans le sélecteur.
D2	décharge de forte énergie	Contournement, cheminement ou arc de forte énergie locale pu de puissance (fort courant). Courts-circuits entre basse tension et terre, connecteur, enroulement, traversées et cuve, jeux de barre et cuve, enroulement et noyau, dans le canal de l'huile, la tourelle. Boucle de courant entre deux conducteurs adjacent autour du flux magnétique principale entre des boulons du noyau, des anneaux métalliques serrant le noyau.
T1	Faute thermique, $T < 300^{\circ}\text{C}$	Surcharge de transformateur en situation d'urgence, objet bloqué limitant le passage d'huile dans les enroulements. Flux de fuite dans les poutres de serrage des culasses.
T2	Faute thermique, $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$	Contact défectueux entre connexion boulonnée (particulièrement entre es barres omnibus en aluminium), contact glissante, contactes à l'intérieur du sélecteur (formation pyrolytique de carbone), connexion entre les câbles et le conducteur de traversée courants de circulation entre pièces de serrage défectueux dans les écrans magnétiques. Isolation endommagée entre conducteurs adjacente parallèles dans les enroulements.
T3	Faute thermique, $T > 700^{\circ}\text{C}$	Forts courants de circulations de la cuve et le noyau. Faible courant dans les parois de la cuve créé par un champ magnétique élevé ou compensé. Court circuit dans les joints du noyau.

Tableau I.6 : Exemples des Défauts typique[12]

b.3) Méthode de Doernenburg

Les quatre ratios utilisés dans cette méthode sont représentés dans le Tableau I.7 suivant :

Rapport de gaz		Type de gaz	Range	Code
A	CH ₄ /H ₂	Méthane/hydrogène	< 0,1	5
			0,1 à 1	0
			1 à 3	1
			> 3	2
B	C ₂ H ₆ /CH ₄	Ethane/méthane	< 1	0
			> 1	1
C	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Éthylène/Éthane	< 1	0
			1 à 3	1
			> 3	2
D	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	Acétylène/Ethylène	< 0,1	0
			0,1 à 3	2

Tableau I.7 : Code pour les ratios de Doernenburg [12]

L'analyse de gaz Doernenburg essaye d'identifier les anomalies suivantes :

- Ø Défaut thermique
- Ø Décharge partielle
- Ø Décharge par arc

Présenter dans la table d'interprétation suivante (Tableau I.8) :

A	B	C	D	Caractéristiques de défaut
0	0	0	0	Sans défaut, vieillissement normal
5	0	0	0	Décharges partielles de basse énergie ; contrôler les niveaux de CO
0	0	0	1	Décharges partielles de haute énergie ; contrôler les niveaux de CO
0	0	1	>0	Décharges de basse énergie ; contournement sans puissance
0	0	2	>0	Décharges de basse énergie ; crépitements continus à potentiel flottant
0	0	1	0	Décharges de haute énergie ; arc électrique avec perforation de l'isolement et surchauffe des conducteurs
1	0	0	0	Défaut thermique de basse température : < 150°C
>0	1	0	0	Défaut thermique de température moyenne : entre 100 et 200 °C
1	0	1	0	Défaut thermique de température moyenne : entre 150 et 300 °C. Surchauffe des conducteurs
>0	0	2	0	Défaut thermique de haute température : entre 300 et 700 °C. Contacts défectueux, points chauds dans le noyau magnétique, courants de circulation dans le tonneau métallique, etc.

Tableau I.8 : Interprétation de Doernenburg [12]

b.4) Triangle de Duval

Un point faible des techniques de ratios est qu'elles ne couvrent pas toutes les gammes des données et négligent souvent les données qui sont des rapports en dehors des seuils déterminés dans les tables. Duval a développé une représentation triangulaire pour dépasser ce problème [13].

Elle consiste au calcul de pourcentages de concentrations en (ppm) des trois gaz (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2) par rapport au total ($\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2$).

Ces pourcentages seront tracés dans un triangle divisé en régions indiquant le type de défaut (Fig. I.14).

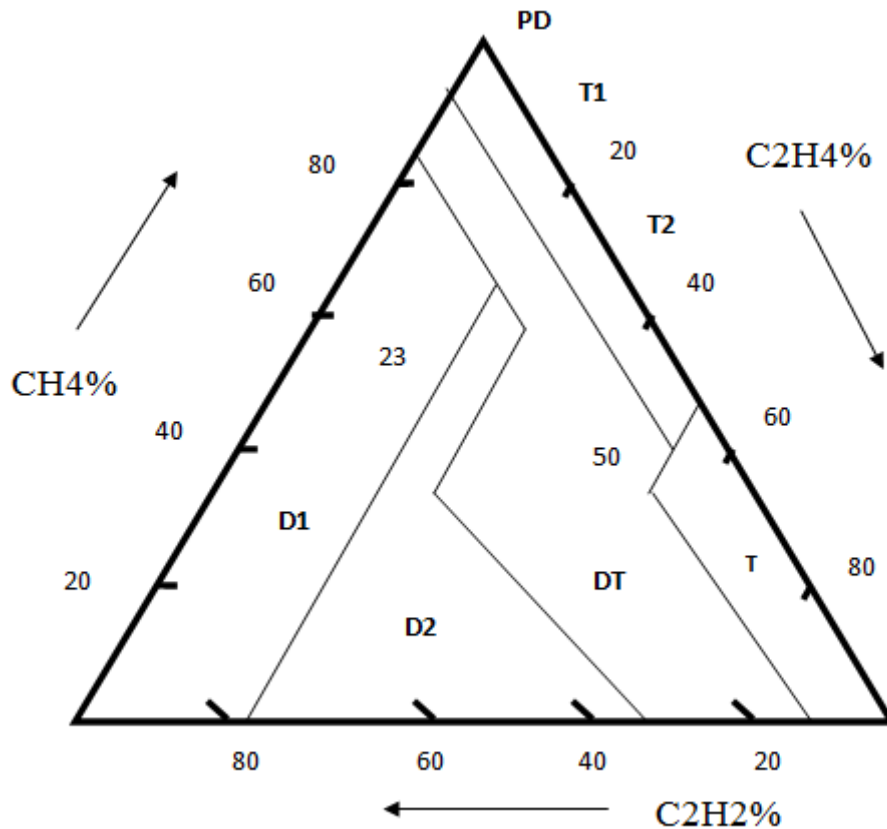


Fig. I.14 : Triangle du Duval [12]

PD : Décharge partielle

D1 : Décharge de basse énergie

D2 : Décharge de haute énergie

T 1 : Faute thermique, $T < 300\text{ °C}$

T2 : Faute thermique, $300\text{ °C} < T < 700\text{ °C}$

T : Faute thermique, $T > 700\text{ °C}$

DT : Mélange de fautes thermiques et électriques.

I.4.2 Mesures diélectriques

Les isolants électriques des équipements sont soumis à un vieillissement donnant lieu à une perte progressive de leurs caractéristiques diélectriques pouvant être la cause des défauts du transformateur.

L'objectif des mesures diélectriques est de détecter d'éventuelles dégradations dans l'isolement du transformateur afin de pouvoir intervenir avant la survenue d'un incident due à une avarie [10].

La condition d'isolement est un facteur essentiel de la fiabilité opérationnelle des transformateurs. Pour évaluer son état on doit effectuer la mesure des paramètres suivants :

- Mesure de facteur de puissance.
- Mesure de capacité.
- Mesure de la résistance d'isolement en courant continu.

I.4.2.1 Mesure du facteur de puissances et de la capacité

On applique ce type d'essai aux enroulements et aux bornes, en permettant d'identifier clairement des sources de problèmes à court terme dans le transformateur.

I.4.2.1.1 Mesure du facteur de puissance et de capacité des enroulements

La mesure du facteur de puissance et de la capacité des enroulements est un bon outil pour déterminer la qualité et l'état de l'isolement des équipements, spécialement ceux qui incorporent dans leur fabrication de l'isolant papier ou huile [10].

- **Mesure de facteur de puissance (F.P)**

L'essai du facteur de puissance ou appelé '**tan δ** ' permet d'évaluer la qualité et l'intégrité de l'isolement capacitif des enroulements, en indiquant l'existence des détériorations de l'isolement (un vieillissement du papier, la présence d'eau dans le papier, un mauvais état de l'huile, décharge électrique) [10].

- **Mesure de capacité des enroulements**

La capacité fournit des informations générales sur la perte d'isolement dans le noyau ou les enroulements. La mesure de capacité se fait entre cuve et enroulement ou entre enroulement (Fig. I.15).

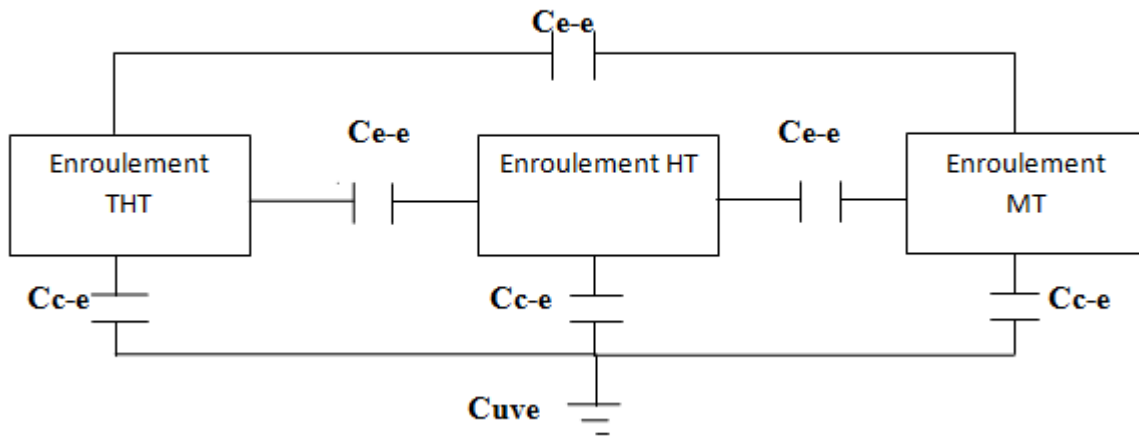


Fig. I.15 : Schéma de capacité de d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements

C_{c-e} : capacité entre cuve et enroulement.

C_{e-e} : capacité entre enroulements.

Ainsi, une variation de la capacité d'isolement prouve l'existence de conditions anormales, comme la présence d'humidité, de sections de conducteurs Court-circuitées ou interrompues, de déformation de bobinage [10].

I.4.2.1.2 Mesure de la capacité des bornes

Les traversées haute tension sont un accessoire important qui peut en cas d'avarie être une cause d'indispensabilité importante du transformateur ce qui fait une attention particulière doit être accordée à leur entretien [10].

La mesure de la capacité des bornes, peut renseigner sur l'état des bornes ce qui permettra d'éviter des avaries (explosion) de traversées.

Si les bornes sont de type capacitif, elles possèdent normalement une prise de mesure, une borne capacitive de construction typique possède deux isollements $C1$ et $C2$, la

valeur $C1$ représente la capacité entre le conducteur central de la borne et la prise capacitive, et $C2$ indique la capacité entre la prise capacitive et la terre voir Figure I.16 [10].

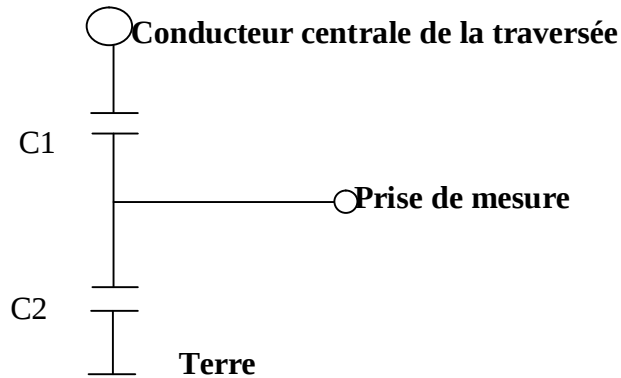


Fig. (II-16) : Schéma d'une borne de type capacitif

Les résultats des mesures doivent être comparés aux résultats des tests effectués en Usine, permettant de déterminer les courts-circuits dans les galettes capacitives de la traversée et les détériorations du corps des traversées. Donc il est nécessaire de prendre certaines précautions pour réduire les causes d'erreurs :

- Réaliser les mesures si l'humidité atmosphérique est faible.
- Veiller sur la dépollution des traversées avant de mesurer.
- Les mesures doivent être effectuées à une température proche de celle de l'essai en usine [10].

I.4.2.2 Mesure de résistance d'isolement en courant continu

Elle correspond principalement à la mesure de la conductivité superficielle de l'isolement et est utilisée dans la détection d'une faille imminente. Elle consiste à vérifier l'isolement entre enroulements, entre enroulement et cuve, entre cuve et masse.

- **Principe de mesure**

Consiste à court-circuiter toutes les bornes de l'enroulement essayé et y appliquer une tension de 5000 V avec un appareil de mesure appelé Mégohmmètre et les autres enroulements sont court-circuités et raccordés à la terre. Il est recommandable de s'assurer que la cuve et le noyau sont branchés à terre [14].

- **Interprétation**

Il existe deux méthodes d'interprétations.

1-Le rapport d'absorption

La mesure dure 1 minute .les lectures R_{15} et R_{60} sont respectivement prises 15 et 60 secondes après avoir connecté la tension, et pour comparer avec de future mesures il convient d'enregistrer (outre la résistance) la température, la tension et l'équipement de mesure.

Pour les valeurs de résistance d'isolement obtenues il n'y a pas des critères rigides d'acceptation, cependant comme règle générale aucun enroulement ne devra avoir moins de 200 M Ω et le rapport d'absorption $\frac{R_{60}}{R_{15}}$ [12].

2-Indice de polarisation

L'indice de polarisation PI est le rapport entre la mesure de la résistance d'isolement à 10 minutes et la résistance d'isolement à 1 minute [12].

$$PI = \frac{R_{10 \text{ min}}}{R_{1 \text{ min}}}$$

Les critères d'acceptation pour le PI sont :

Indice polarisation (Mohmio 10 min/1 min)	Critère
<1	Dangereux
<1.5	Pauvre
1.5 à 2	Douteux
2 à 3	Acceptable
3 à 4	Bon
>4	Excellent

Tableau I.9 : Domaine d'interprétation de PI

I.4.3 Mesures électriques

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont:

I.4.3.1 Mesure du courant d'excitation

Le courant d'excitation d'un transformateur est le courant consommé lorsque l'un des enroulements est alimenté à une tension alors que le second est ouvert. Ce courant total à vide à une composante de magnétisation et une composante de perte [10].

L'essai du courant d'excitation permet d'évaluer le circuit magnétisé du transformateur [12]:

- Ø problème associé au noyau (des tôles coupées, des joints défectueux).
- Ø problème associé aux bobines (des spires en court-circuité ou en circuit ouvert, des déficiences dans les dispositifs de commutation du régulateur en charge).

- **Principe de mesure**

La Technique d'essai consiste à injecter une tension alternative de valeur réduite (jusqu'à 12 kV) de différents niveaux, et réaliser une mesure du courant de magnétisation, en observant s'ils existent une non linéarité dans les valeurs observées qui identifient des problèmes potentiels dans le noyau [12].

I.4.3.2 Mesure de rapport de transformation

Il consiste à mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régulateur et les comparer avec les valeurs de conception pour valider les connexions intérieures. Des déviations indiquent des courts-circuits entre spires, un circuit ouvert, des problèmes de connexion ou un défaut dans le régulateur [10]

Les mesures sont effectuées :

- Ø A la mise en service.
- Ø Lors d'un entretien détaillé.
- Ø En cas d'une défaillance.
- Ø Après une réparation.

La technique d'essai consiste à injecter des tensions alternes dans le bobinage haute tension, en mesurant les tensions résultantes dans les autres [12].

I.4.3.2 Mesure de la résistance d'enroulements

La mesure de la résistance à pour objectif de déterminer l'existence des déviations sur les valeurs de conception des résistances dans chaque bobinages. Entre autre cette mesure détermine les pertes par effet joule dans les enroulements et les connexions.

La mesure est effectuée par l'application du courant continu sur le bobinage, en mesurant ensuite la chute de tension par conséquent sa résistance. En prenant le soin de relever la température des enroulements afin de pouvoir ramener les valeurs mesurées vers des valeurs à la température référence [10].

La résistance corrigée est calculé par l'équation suivante :

$$R_{COR} = R_m \left(\frac{\theta_F + \theta_{ref}}{\theta_F + \theta_m} \right)$$

R_m : Résistance mesuré

θ_F : 235 pour le cuivre et 225 pour aluminium

θ_{ref} : Température de référence

θ_m : Température des enroulements

Des valeurs supérieures peuvent indiquer:

L'existence de court-circuit entre spires.

- Ø Des irrégularités dans les circuits de régulation du transformateur (valeur de la résistance par prise).
- Ø Des connexions défectueuses.
- Ø Des échauffements anormaux dans les bobines et les conducteurs.

La mesure de la résistance des enroulements doit être effectuée en dernier lieu, puisqu'elle produit des problèmes de magnétisation du noyau en étant effectué l'essai avec du courant continu [12].

I.4.3.4 Mesure de la réactance de fuite

La mesure de la réactance de fuite ou impédance de court-circuit, permet par comparaison aux valeurs des mesures lors des essais en usine du transformateur de détecter des changements très importants ($> \pm 5\%$) qui devrait amener à des investigations plus importantes; un circuit ouvert ou des courts-circuits entre spires, ou entre enroulements et cuve.

I.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'intérêt des informations que peut apporter l'utilisation des techniques de diagnostic dans les transformateurs de puissance, dans le but de réduire la probabilité de défaillances ou de dégradation du service et d'augmenter l'espérance de vie du transformateur.

Il est alors possible en fonction des résultats d'analyse de gaz dissous dans l'huile, d'identifier la présence d'une anomalie de nature thermique, et de déterminer l'état de vieillissement de l'isolation huile et analyser sont degré de contamination.

Les mesures électriques et diélectriques permettent aussi de connaître l'état du transformateur et de diminuer les risques d'avaries imprévues.

Donc l'objet final du diagnostic est la surveillance du transformateur et le suivi de l'évolution des défauts dès leur premiers signes d'apparition, pour ensuite préconiser les actions correctives.

CHAPITRE II :

La technique FRA

II.1 Introduction

L'apparition d'un défaut dans le réseau électrique provoque la circulation de forts courants de court-circuit dans le transformateur, induisant des champs parasites dans celui-ci. Ces champs produisent des forces axiales et radiales sur les enroulements du transformateur.

La structure mécanique et les enroulements du transformateur sont donc soumis à de fortes sollicitations mécaniques. Les contraintes imposées aux transformateurs de puissance peuvent entraîner des déformations mécaniques ou des défauts dans leurs enroulements et leurs noyaux magnétiques [15]. Le diagnostic efficace de ce type de déformation peut être mis en évidence grâce à l'analyse de la réponse en fréquence (FRA) des enroulements du transformateur.

Le présent chapitre a pour objet de présenter la méthode de diagnostic basée sur la FRA, son principe, les moyens utilisés, la méthode de mesure et la façon d'interpréter les résultats.

II.2 L'équipement de mesure

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

a) Le FR Analyzer

Le FRAnalyzer est un analyseur de réponse au balayage en fréquence pour le diagnostic des enroulements de transformateur de puissance. Son concept matériel universel commandé par un logiciel opérant sur un PC fait du FR Analyzer un outil efficace et d'une grande souplesse d'emploi pour le diagnostic des enroulements et des noyaux magnétiques des transformateurs de puissance [15].

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

L'équipement standard FR Analyzer permet d'effectuer des mesures de la fonction de transfert de tension, par balayage de la fréquence [15].

Le FR Analyzer inclut un signal source DDS (synthèse numérique directe), de niveau et de fréquence réglables, pour exciter l'enroulement du transformateur, deux récepteurs

assurant le traitement de la réponse de l'enroulement et un microcontrôleur. Un convertisseur d'alimentation CC génère les tensions d'alimentation des circuits concernés [15].

b) Connecteurs et commandes

Le FR Analyzer présente les connecteurs et les commandes suivants [16] :

En face avant Fig. II.1:

- Connecteur OUTPUT (sortie du signal source)
- Connecteur REFERENCE (CH 1) (entrée du canal de référence)
- Connecteur MEASUREMENT (CH 2) (entrée du canal de mesure)



Fig. II.1 : Vue de la face avant du FR Analyzer

En face arrière Fig. II.2:

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

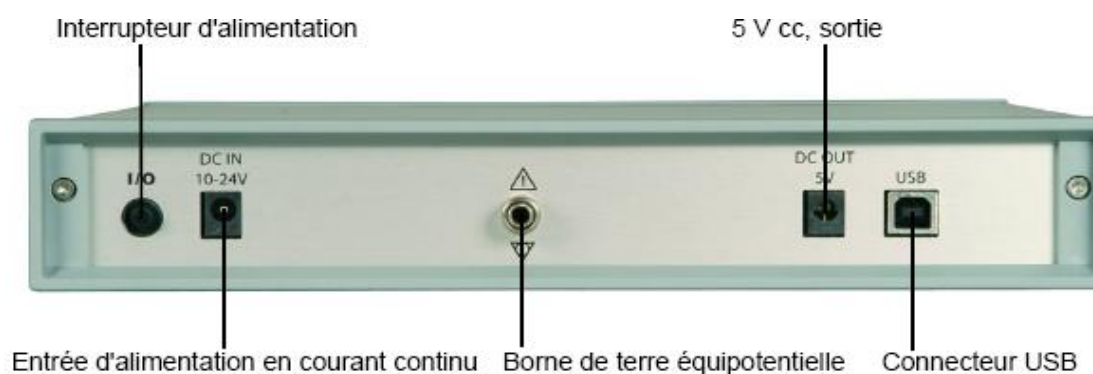


Fig. II.2 : Vue de la face arrière du FR Analyzer

c) Câbles pour les essais

L'approche recommandée consiste à utiliser trois câbles blindés haute fréquence (ayant une impédance caractéristique connue et constante) pour les mesures de FRA : un pour l'injection de tension, un pour la mesure de la tension de référence sur la borne d'entrée et un pour la mesure de la tension de réponse. La longueur des câbles haute fréquence doit être suffisante pour atteindre les bornes alors que l'équipement d'essai est installé au pied du transformateur. Il est nécessaire d'adapter l'impédance des câbles à haute fréquence afin d'éviter les réflexions. L'impédance est en générale adaptée à 50 ohms à l'entrée de l'appareil de mesure [17].

Pour diminuer l'inductance, il est recommandé d'avoir des rallonges de câbles aussi courtes que possible (sans faire de boucles) (voir Fig. II.3) et d'utiliser des tresses plates (de 20 mm de large au minimum) au lieu de fils [17].

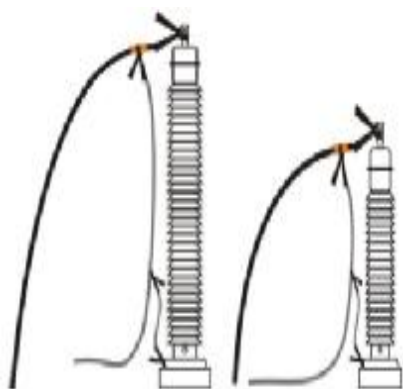


Fig. II.3.a : Bon raccordement à la terre

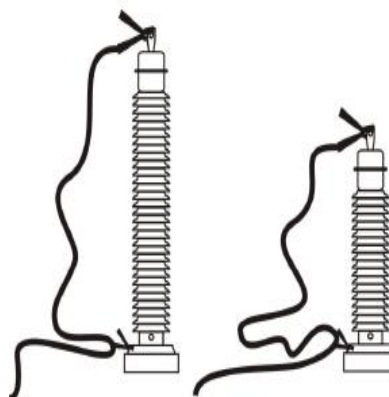


Fig. II.3.b : Mauvais raccordement à la terre

d) Le logiciel d'analyse et d'interprétation

Le logiciel de commande opère sur un PC est connecté au FR Analyzer via une interface USB, après avoir lancé le logiciel la fenêtre principale se présente comme suit Fig. II.4 [15].

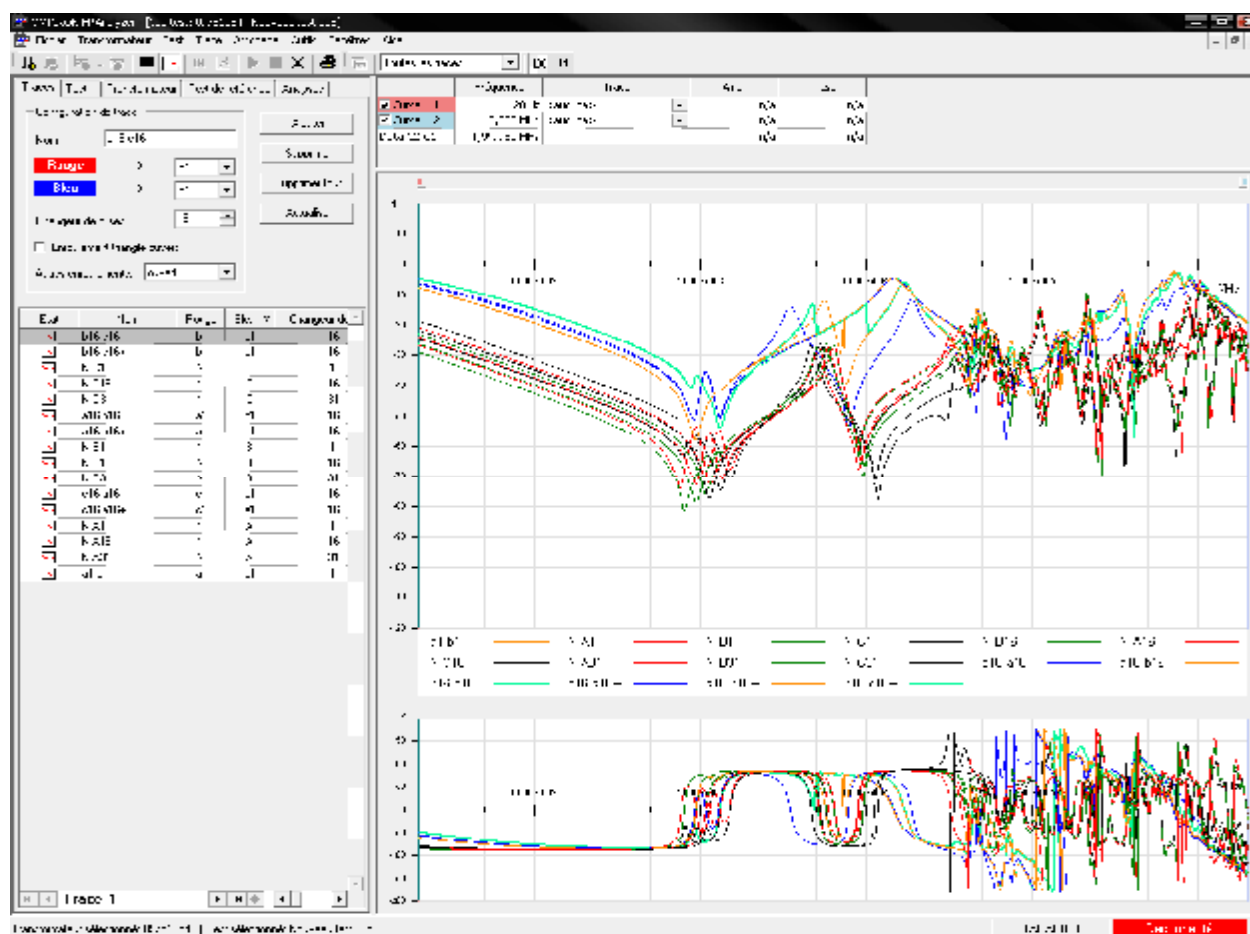


Fig. II.4 : Fenêtre principale du logiciel

Le logiciel FR Analyzer analyse les résultats du test en calculant la différence de deux traces de test comparables

II.3 Analyse de la réponse en fréquence (FRA)

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

II.3.1 Principe de la méthode

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductances et de résistances; un circuit très complexe (Fig. II.5) qui génère une empreinte digitale ou signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des réponses sont représentées sous forme de courbe [18].

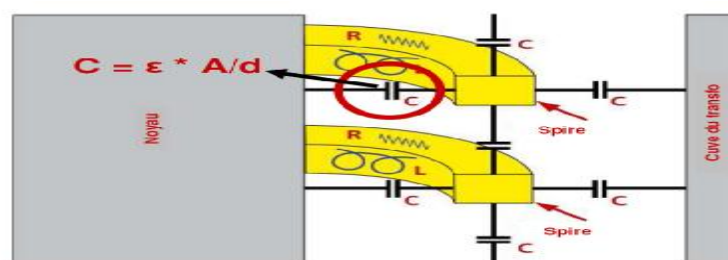


Fig. II.5 : Modèle d'un enroulement de transformateur

La capacitance est déterminée en fonction de la distance entre les conducteurs. Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacitances et modifieront ainsi la forme de la courbe [16].

Le principe de fonctionnement est d'injecter un signal d'excitation électrique sur l'un des enroulements et de mesurer le signal de réponse sur une large plage de fréquence (Méthode de balayage en fréquence). Le rapport de ces deux signaux donne la réponse exigée. Ce rapport s'appelle la fonction de transfert du transformateur à partir duquel la grandeur et la phase peuvent être obtenues.

II.3.2 Objectifs des mesures par FRA

Le principal intérêt des mesures par FRA sur les transformateurs est de détecter des déformations des enroulements qui peuvent résulter des forces électromagnétiques très importantes qui s'exercent du fait des surintensités apparaissant au moment de défauts directs, de défauts dans le régulateur, de mauvaises synchronisations [17].

La déformation d'un enroulement peut finalement provoquer un défaut dans le transformateur par suite d'une détérioration de l'isolement entre spires, chose qui provoque la diminution de la tenue diélectrique et aboutir à des spires court-circuitées. En outre, tout desserrage de la fixation d'un enroulement, suite à un amincissement de l'isolation dû au

vieillessement, augmente le risque de défaut par diminution de la tenue mécanique des assemblages de l'enroulement [17].

En plus du diagnostic des défauts à la suite de court-circuit, on remarque un intérêt croissant qui porte à la détection avant l'apparition de la panne, au moment des inspections programmées, de défauts liés à des déformations des enroulements, c'est à dire l'évolution de l'état mécanique permettant d'apprécier la fiabilité escomptée des transformateurs, en terme de susceptibilité accrue à des courts circuits futurs [17].

Un intérêt se manifeste également dans les mesures par FRA pour la détection de tout autre problème conduisant à une modification de la répartition des inductances et des capacités dans les transformateurs, par exemple des défauts sur le noyau ou des défauts de mise à la terre du noyau ou des écrans [17].

Une autre application des mesures par FRA est le contrôle de l'intégrité mécanique d'un transformateur après transport, fournissant un moyen fiable de confirmer que les assemblages du noyau et des enroulements n'ont subi aucune détérioration malgré les secousses répétée en cours de transport [17].

Les mesures par FRA peuvent donner des informations sur la tenue des structures géométriques des enroulements.

II.3.3 Quand faut-il faire un test FRA?

Généralement les mesures sur les transformateurs sont recommandées [18,19]:

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

II.3.4 Type d'essais par FRA

Les principaux types d'essais par FRA sont :

a) Essais entre extrémités

On injecte le signal tour à tour à une extrémité de chaque enroulement et l'on mesure le signal à l'autre extrémité (Fig. II.6) [18].

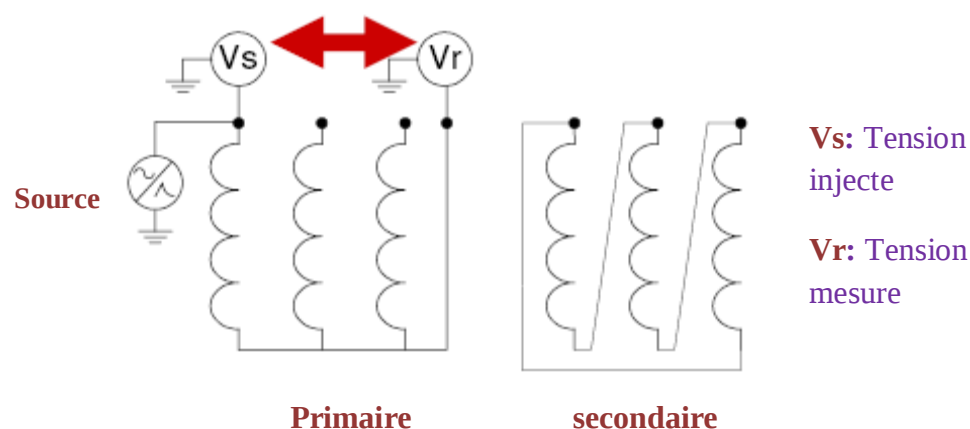


Fig. II.6 : Essai entre extrémités

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

b) Essais en court-circuit

Cet essai ressemble à la mesure entre extrémités mais avec un enroulement court-circuité sur la même phase (voir Fig. II.7) [18], de telles mesures permettent d'éliminer l'influence du noyau en dessous de 10-20 KHz environ du fait que la réponse en fréquence basse est caractérisée par l'inductance de fuite au lieu de l'inductance de magnétisation. La réponse pour des fréquences plus élevées est similaires à celle que l'on obtient en utilisant la mesure entre extrémité.

L'enroulement en court-circuit peut être laissé au potentiel flottant ou bien être mis à la terre. Pour les transformateurs triphasés, il ya deux niveaux de variations, soit avec un court-circuit par phase soit avec un court-circuit triphasé. En outre, les essais de court-circuit entre

extrémités peuvent être réalisés en raccordant la source soit à l'extrémité coté phase, soit à l'extrémité coté neutre [17].

On peut effectuer cet essai si l'on veut obtenir des informations concernant l'impédance de fuite à basse fréquence, ou à éliminer certaines incertitudes liées à l'analyse de l'influence du noyau lorsqu'il existe un magnétisme résiduel [17].

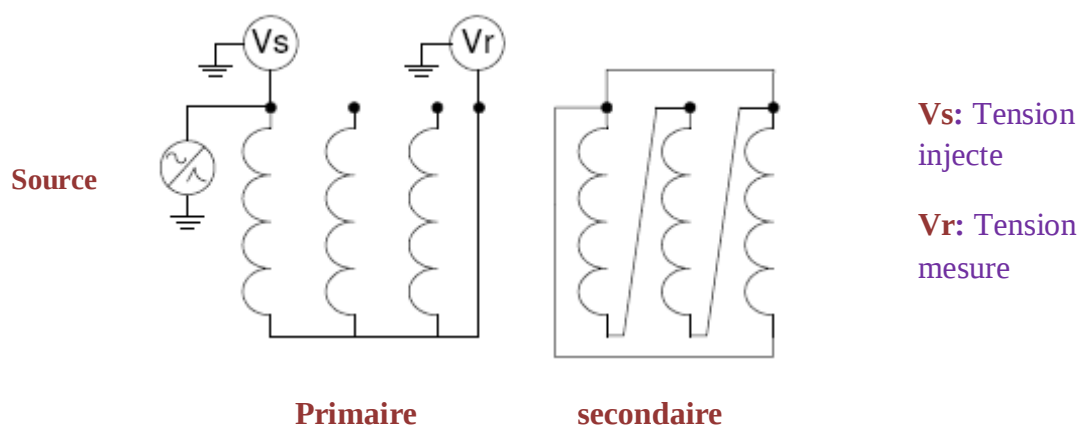


Fig. II.7 : Essai en court-circuit

c) Essai capacitif entre enroulements

On applique le signal à une extrémité d'un enroulement et l'on mesure la réponse à une extrémité d'un autre enroulement de la même phase (non relié au premier) Fig. II.8 [18].

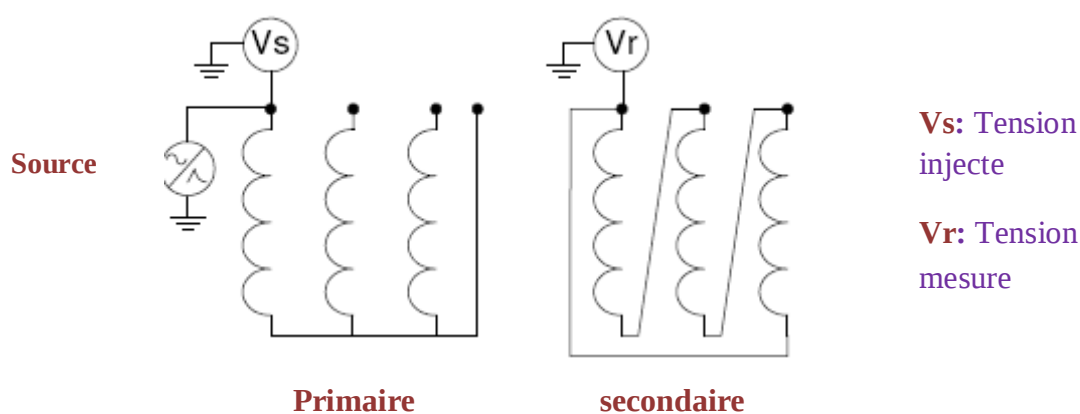


Fig. II.8 : Essai capacitif entre enroulements

d) Essai inductif entre enroulements

On injecte le signal sur une borne coté HT, et l'on mesure la réponse sur la borne correspondante coté BT, les autres extrémités des deux enroulements étant reliées à la terre (Fig. II.9) [18].

Pour cette mesure, la plage en basse fréquence est déterminée par le rapport des nombres de spires des enroulements.

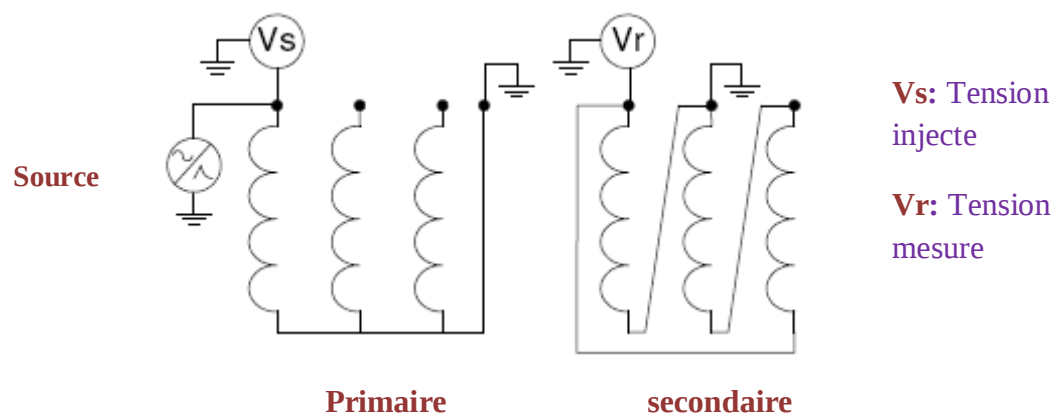


Fig. II.9 : Essai inductif entre enroulements

II.4 Méthodes d'interprétation

II.4.1 Interprétation Méthodologique

La FRA est une méthode comparative pour évaluer l'état des transformateurs de puissance. Pour évaluer les résultats de FRA, on compare, généralement par une simple observation visuelle des courbes, les informations actuelles avec les informations de référence [18].

Il ya trois approches pour obtenir des informations de références :

- Mesures préalables sur le même transformateur (Empreinte digitale)
- Mesures sur des transformateurs identiques (Jumeaux)
- Mesures sur des phases d'un même transformateur testé séparément.

a) Evaluation par les empreintes digitales

Une empreinte digitale est obtenue pendant le contrôle de réception d'usine, est peut-être le plus fiable des informations de référence pour l'évaluation du test de FRA. L'hypothèse d'une grande respectabilité du test technique, il est possible d'obtenir des résultats de FRA identiques s'il n'y a pas de changements électromécaniques dans le transformateur.

b) Comparaison entre des transformateurs jumeaux

Les résultats d'empreinte digitale ne sont pas toujours disponibles pour l'évaluation des résultats de la FRA. Les transformateurs identiquement conçus et identiquement assemblés

(jumeaux) montrent typiquement des courbes identiques de l'essai FRA. De légères déviations entre les transformateurs jumeaux sont produites exclusivement par des tolérances et des effets de fabrication de magnétisation de noyau.

c) Comparaison entre phases des Enroulements du Transformateur

Ce type de comparaison est utilisé en absence de l'empreinte de référence. La procédure consiste à comparer entre les phases du transformateur.

L'interprétation des résultats requiert assez d'expérience et une certaine habilité. Les indications de problèmes sur les enroulements sont les suivantes :

- Changements globaux dans l'aspect de la réponse
- Apparition ou disparition de fréquences de résonance non existantes
- Déplacements significatifs de fréquences existantes.

II.4.2 Domaine de fréquence pour les interprétations

Le Tableau II.1 [19] montre le domaine d'interprétation de FRA compte tenu des limites venant de la géométrie des installations d'essai et de certaines conditions d'incertitude liées à des flux rémanents.

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

$f < 2000 \text{ Hz}$	Déformations du noyau, magnétisme résiduel
$2000 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$	Court-circuit entre spires, circuits ouverts.
$20\text{kHz} < f < 200 \text{ kHz}$	Déplacements relatifs entre les enroulements.
$200\text{kHz} < f < 2 \text{ MHz}$	Déformations propres de l'enroulement.
$2 \text{ MHz} < f < 10 \text{ MHz}$	Disposition de couplages et câbles de mesure.

Tableau. II.1 : Domaine typique d'interprétation de FRA

Il faut remarquer que les recommandations indiquées dans le tableau ne doivent pas être considérées comme des limites strictes mais comme des guides généraux ayant seulement pour but de faire ressortir les liens généraux entre les paramètres correspondant.

II.5 Conclusion

L'analyse de la réponse en fréquence est une méthode de diagnostic pour l'évaluation de l'état mécanique des transformateurs de puissance. L'essai est non destructif et peut être employé comme outil autonome pour détecter des dommages d'enroulement, ou comme outil de diagnostic pour indiquer exactement des dommages détectés dans d'autres essais.

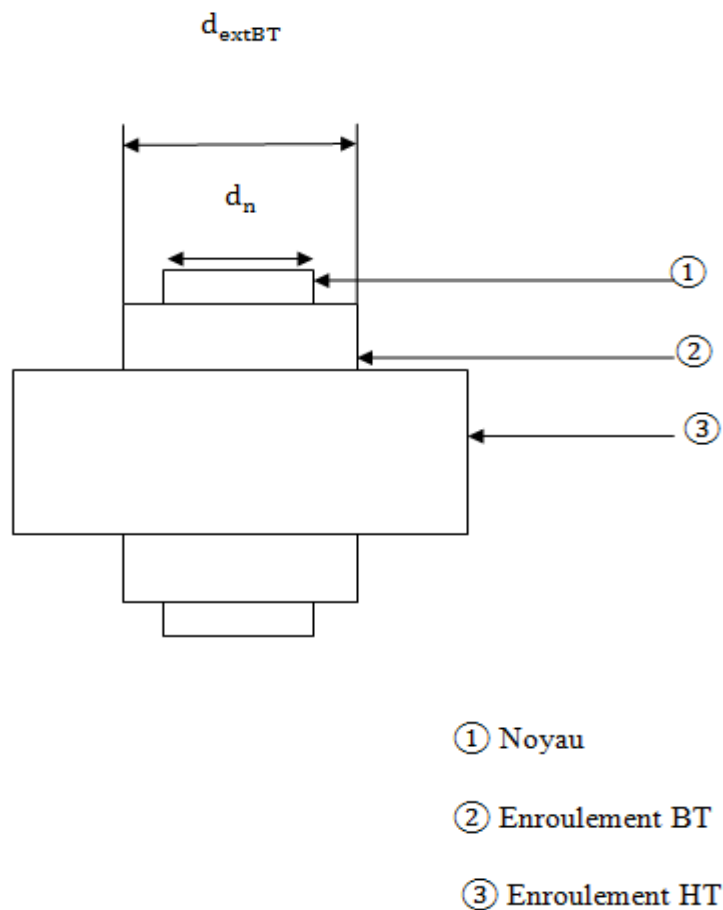
En particulier, l'essai de FRA est appliqué aux transformateurs de puissance toutes gammes confondues pour détecter le mouvement de noyau et d'enroulement et les déformations mécaniques, qui pourraient se produire durant toute la vie de l'équipement. Ces mouvements peuvent être provoqués par les forces sismiques ou par des conditions en service.

CHPITRE III :
***Modèle adopté et calculs des
paramètres***

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le modèle du transformateur de puissance adopté et calcul des paramètres, nous aborderons dans un premier temps, la disposition géométrique. Ensuite, nous présenterons le schéma équivalent complet des enroulements HT et BT du transformateur, les enroulements subdivisés en quatre éléments en série, cette approche permet de savoir le diagnostic de transformateur en HF. Mais, pour appliquer la méthode de diagnostic FRA dans le chapitre qui suit, on prend seulement l'enroulement HT afin de l'appliquer sur P-Spice. Enfin on calcule les paramètres de schéma équivalent de l'enroulement HT qui est subdivisés en six éléments en série. [20]

Le schéma suivant donne un aperçu général sur les dimensions géométriques du transformateur.



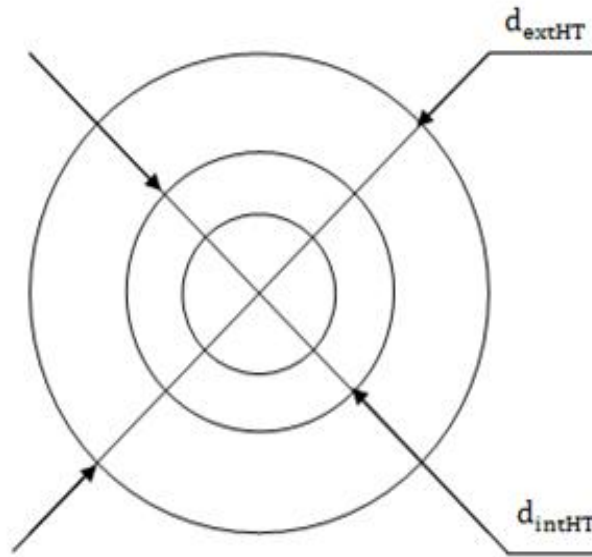


fig.III.1 : Disposition géométrique des enroulements du transformateur

III.2 Schéma équivalent complet des enroulements HT et BT du transformateur

Le modèle retenu est donné par la figure III.2 pour le transformateur, l'enroulement est subdivisé en quatre parties représentées par quatre éléments connectés en série.

Chaque élément du schéma représente un ou plusieurs éléments constitutifs de l'enroulement (galette, bobine, ou simplement groupe de spires selon la construction).

Les inductances propres et les coefficients des mutuelles, les capacités transversales (capacités équivalentes des capacités entre les enroulements, entre enroulements et cuve, enroulement et noyau) et les capacités longitudinales (entre éléments voisins) sont représentés respectivement par C_{HB} et $\frac{M_{HBIJ}}{L}$ entre les enroulements HT et BT par $R_H, L_H, \frac{M_{Bij}}{L}, C_H$ et K_H pour l'enroulement HT, par $R_B, L_B, \frac{M_{Hij}}{L}, C_B$ et K_B pour BT et C_{HB} en tenant compte de la haute fréquence de la tension appliquée.

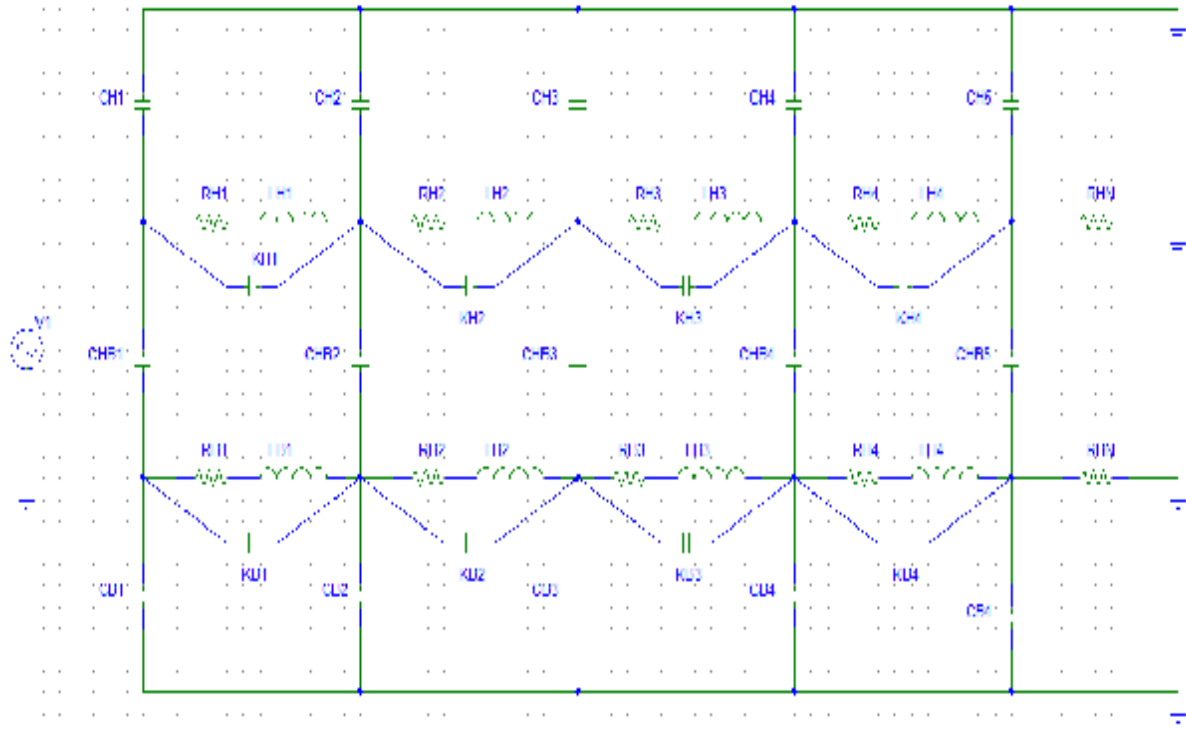


Fig. III.2 : Schéma équivalent complet des enroulements HT et BT du transformateur

III.3 Logiciel de simulation P.Spice

III.3.1 Choix des logiciels de référence

De nombreux logiciels de simulation de circuit électrique sont disponibles, dans le cadre de cette étude, on utilise **P-Spice 10.5**, très répandu et probablement le plus utilisé que ce soit dans l'industrie ou dans le monde éducatif. Celui-ci a fait ses preuves aussi bien dans son efficacité que dans la pertinence des résultats offerts. Il est disponible d'intégrer par la suite Orcad dans une version d'essai qui limite entre autre la taille des circuits simulables.

III.3.2 Simulation des enroulements HT et BT sur P-Spice

Le programme de simulation P-Spice exige la numérotation de chaque élément du circuit équivalent des enroulements de puis l'entrée, de telle sorte à insérer un ou des composantes (R, L, C, K ...) d'un élément, entre deux numéro consécutifs comme indique sur la figure III.2.[21]

Il faut calculer les valeurs des paramètres du schéma équivalent III.2: R_H, L_H, C_H, K_H $R_B, L_B, C_B, K_B, C_{HB}$, respectivement entre éléments du même enroulement HT, BT, entre les enroulements et les coefficients de mutuelles $\frac{M_{Hij}}{L}, \frac{M_{Bij}}{L}, \frac{M_{HBij}}{L}$

III.4 Calcul numérique des paramètres des enroulements HT et BT

Notre étude sera portée sur un transformateur de type TDU 125000/110, dont les caractéristiques électriques et géométriques sont les suivants :

III.4.1 Caractéristiques électrique du transformateur

- $S_n = 125 \text{ MV}$ (puissance apparente nominale)
- $U_{nHT} = 121 \text{ KV}$ (tension nominale de l'enroulement haute tension)
- $U_{nBT} = 13.8 \text{ kv}$ (tension nominale de l'enroulement basse tension)
- $\Delta P_0 = 70 \text{ KW}$ (pertes de puissances à vide)
- $\Delta P_{CC} = 400 \text{ KW}$ (pertes de puissance en court-circuit)
- $U_{cc} = 10.5$ (tension de court-circuit)
- $f = 50 \text{ HZ}$ (tension de service du transformateur)
- $I_0 = 0.55 \%$ (courant à vide)

III.4.2 Caractéristiques géométriques du transformateur

- $d_{extHT} = 1390 \text{ mm}$ (diamètre extérieur de l'enroulement haute tension)
- $d_{intHT} = 1157 \text{ mm}$ (diamètre intérieur de l'enroulement haute tension)
- $d_{extBT} = 1051 \text{ mm}$ (diamètre extérieur de l'enroulement basse tension)
- $d_{intBT} = 920 \text{ mm}$ (diamètre intérieur de l'enroulement basse tension)
- $d_{noy} = 860 \text{ mm}$ (diamètre du noyau)
- $d_{cuve} = 2390 \text{ mm}$ (diamètre de la cuve)
- $l = 2380 \text{ mm}$ (longueur de l'enroulement du transformateur)

La longueur d'un élément des deux enroulements est donc :

a : la distance entre les éléments (disque, bobines, spires, ... etc.)

b_{HT} : La distance entre l'enroulement haute tension et le noyau.

b_{BT} : La distance entre l'enroulement basse tension et le noyau.

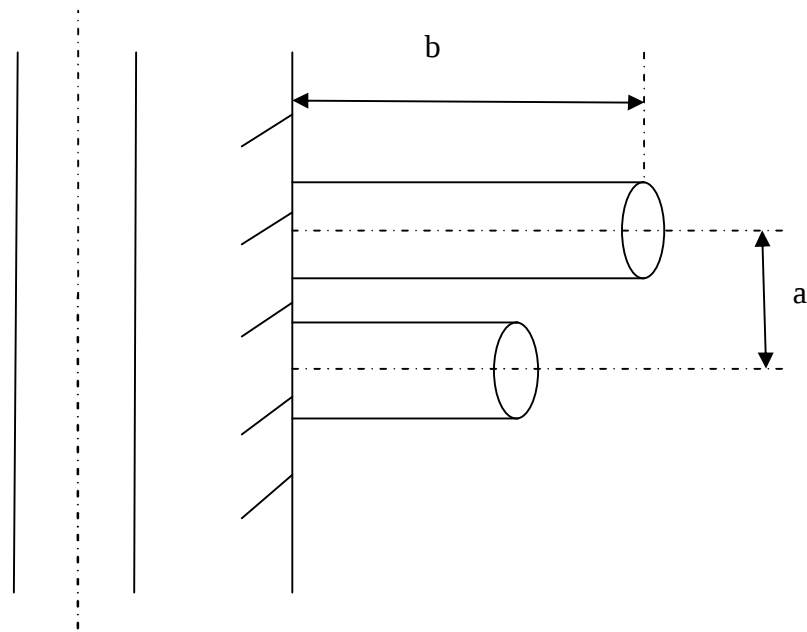


Fig. III.3 : disposition schématique des spires

$$a = \frac{L}{n} = \frac{2380}{4} = 595\text{mm} \quad a = 595\text{mm}$$

La valeur de b sera donnée par :

$$b_{HT} = r_{moyHT} - r_n \quad \text{Pour l'enroulement haute tension.}$$

$$b_{BT} = r_{moyBT} - r_n \quad \text{Pour l'enroulement basse tension.}$$

$$r_n = 430\text{mm} \quad \text{Rayon de noyau.}$$

$$r_{moyHT} = \frac{r_{extHT} + r_{intHT}}{2} = \frac{695 + 578,3}{2} = 637\text{mm}$$

$$r_{moyHT} = 637\text{mm}$$

$$b_{HT} = 636,75 - 430 = 206,75\text{mm}$$

$$b_{HT} = 206,75\text{mm}$$

$$r_{moyBT} = \frac{r_{extBT} + r_{intBT}}{2} = \frac{525,5 + 460}{2} = 492,75\text{mm}$$

$$r_{\text{moyBT}} = 492,75\text{mm}$$

$$b_{\text{BT}} = 492,75 - 430 = 63\text{mm}$$

$$b_{\text{BT}} = 63\text{mm}$$

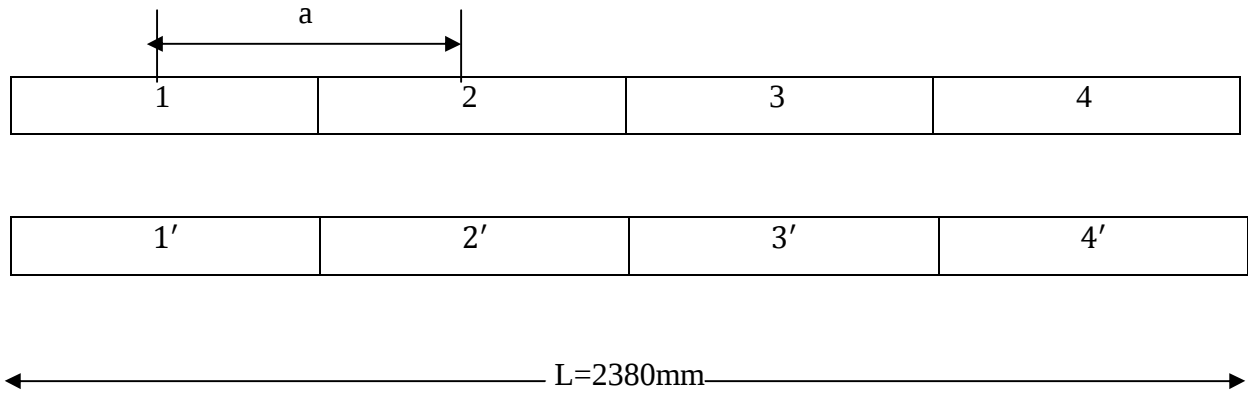


Fig. III.4 : subdivision des enroulements HT et BT

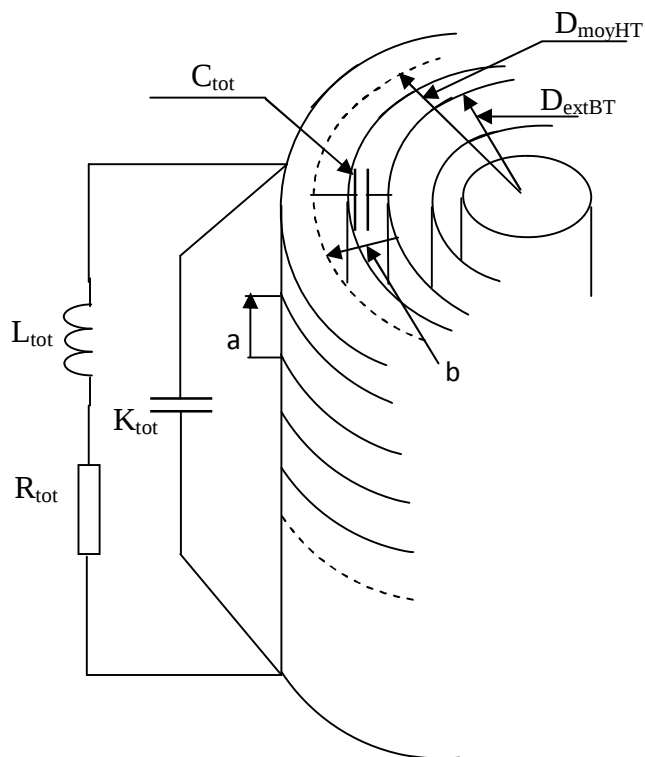


Fig. III.5 : Définition des paramètres du transformateur

III.4.3 Détermination de la résistance RH et RB

R_{1HT} : est la résistance de l'enroulement HT à la fréquence de 50 HZ calculée par :

$$R_{1HT} = \frac{\Delta P_{cc} \cdot U_{nHT}^2}{S_n^2}$$

$$R_{1HT} = \frac{400 \cdot 10^3 \cdot (121 \cdot 10^3)^2}{(125 \cdot 10^6)^2} = 0,3748\Omega$$

$$R_{1HT} = 0,3748\Omega$$

Comme l'enroulement est constitué de n éléments, donc la résistance d'un élément primaire est :

$$R_{HT} = \frac{R_{1HT}}{N}$$

$$R_{HT} = \frac{0,3748}{4} = 0,0937\Omega$$

R_0 : est la résistance de l'enroulement BT à la fréquence de 50 Hz calculée par :

$$R_{2BT} = \frac{\Delta P_{cc} \cdot U_{nBT}^2}{S_n^2}$$

$$R_{2BT} = \frac{400 \cdot 10^3 \cdot (13,8 \cdot 10^3)^2}{(125 \cdot 10^6)^2} = 0,0048\Omega$$

$$R_{2BT} = 0,0048\Omega$$

Comme l'enroulement est constitué de n éléments, donc la résistance d'un élément secondaire est :

$$R_{BT} = \frac{R_{2BT}}{N}$$

$$R_{BT} = \frac{0,0048}{4} = 0,0012\Omega$$

III.4.4 Calcul des inductances

En hautes fréquences, les inductances propres L_{HT} , L_{BT} des enroulements sont réduites aux inductances de fuite. L'inductance totale des enroulements en tenant compte de l'influence des autres inductances est donnée par l'expression suivante :

III.4.4.1. Inductances propre de l'enroulement HT

$$L_{tot} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_n^2}{S_n}$$

Avec la différence dans la tension nominale de service de chaque enroulement :

$$L_{1tot} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_{nHT}^2}{S_n}$$

$$L_{1tot} = \frac{1}{2\pi 50} \frac{10,5}{100} \frac{(121 \cdot 10^3)^2}{125 \cdot 10^6} = 0,039H$$

$$L'_{HT} = \frac{L_{1tot}}{N} = \frac{0,039}{4} = 0,00975H$$

$L'_{HT} = 9750\mu H$: l'inductance totale d'un élément de l'enroulement HT

III.4.4.2 Inductances propre de l'enroulement BT

$$L_{2tot} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_{nBT}^2}{S_n}$$

$$L_{2tot} = \frac{1}{2\pi 50} \frac{10,5}{100} \frac{(13,8 \cdot 10^3)^2}{125 \cdot 10^6} = 0,00051H$$

$$L'_{BT} = \frac{L_{2tot}}{N} = \frac{0,00051}{4} = 0,0001275H$$

$L'_{BT} = 127,5\mu H$: l'inductance totale d'un élément de l'enroulement BT

Remarque 1

Les inductances L'_{HT} , L'_{BT} sont les inductances d'un élément des enroulements comportant respectivement les inductances propres L_{HT} , L_{BT} , les inductances mutuelles entre les différents éléments de l'enroulement d'un côté et les mutuelles entre l'élément d'un enroulement primaire et les éléments du second enroulement.

Donc pour calculer L_{HT} et L_{BT} , on est dans l'obligation de passer par le calcul des coefficients des mutuelles σ_{ij}

Remarque 2

Le calcul des coefficients des mutuelles entre les éléments du même enroulement se fait en de : $\frac{a}{b_{HT}}$ (tableau N⁰(III.1)) pour le primaire, puis en fonction de $\frac{a}{b_{BT}}$ (tableau N⁰(III.2)) pour le secondaire, celles entre les éléments des deux enroulements en fonction de $\frac{a}{\sqrt{b_{HT} \cdot b_{BT}}}$ (tableau N⁰(III.3)).

III.4.5 Calcul de coefficients entre les éléments de l'enroulement HT

N ⁰	a	b _{HT}	$\frac{a}{b_{HT}}$	$\sigma_{HH} = \frac{M_{HH}}{L}$
1	595	207	2,874	0,05625435459472
2	1190	207	5,748	0,00316455241087
3	1785	207	8,623	0,00017801985345

Tableau. III.1

III.4.6 Calcul de coefficients entre les éléments de l'enroulement BT

N ⁰	a	b _{BT}	$\frac{a}{b_{BT}}$	$\sigma_{BB} = \frac{M_{BB}}{L}$
1	595	63	9,444	0,00076205896746017
2	1190	63	18,888	0,00005807338699. 10 ⁻⁴
3	1785	63	28,333	0,00000000442553. 10 ⁻⁴

Tableau .III.2

III.4.7 Calcul de coefficients entre les deux enroulements HT et BT

N°	a	b _{HT}	b _{BT}	$\frac{a}{\sqrt{b_{HT} \cdot b_{BT}}}$	$\sigma_{HB} = \frac{M_{HB}}{L}$
1	0	207	63	0	0,0053867840083
2	595	207	63	5,210	0,00002901727380
3	1190	207	63	10,420	0,0000001563093
4	1785	207	63	15,308	0,00000000084200

Tableau .III.3

Après le calcul de tous les coefficients de mutuelles, le calcul des inductances propres des enroulements se fera d'après les formules qui suivront :

$$L_{HT} = \frac{L'_{HT}}{1 \sum \sigma_{HH} + \sum \sigma_{HB}}$$

$$L_{BT} = \frac{L'_{BT}}{1 \sum \sigma_{BB} + \sum \sigma_{HB}}$$

Après tout calcul fait on aura :

$L_{HT} = 0,009189360H$: L'inductance propre d'un élément de l'enroulement primaire.

$L_{BT} = 1,266044318.10^{-4}H$: L'inductance propre d'un élément de l'enroulement secondaire.

III.4.5 Calcul des capacités transversales des enroulements primaire et secondaire

III.4.5.1 Calcul des capacités transversales C et longitudinales K

a) Capacités transversales C

Le calcul de la capacité entre l'enroulement primaire et la masse (cuve) se fera par la formule suivante :

$$C_{1\text{tot}} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot l \frac{d_{\text{cuv}} + d_{\text{exHT}}}{d_{\text{cuve}} - d_{\text{exHT}}}$$

Ou :

$\varepsilon_0 = 8,8510^{-12} \text{ F/m}$: est la permittivité absolue de l'air.

$\varepsilon_r = 3,9$: est la permittivité relative d'huile.

$$C_{1\text{tot}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9 \cdot \pi \cdot 2380 \cdot 10^3 \frac{2390 + 1390}{2390 - 1390}$$

$$C_{1\text{tot}} = 975 \cdot 10^{-12} \text{ F} \quad \text{ce qui donne } C_{1\text{tot}} = 975 \text{ PF}$$

La capacité transversale C_{HT} d'un élément entre l'enroulement primaire et le noyau est donnée par la formule suivante:

$$C_{\text{HT}} = \frac{C'_{1\text{tot}}}{\text{Nombre d'élément} + 1}$$

$$C_{\text{HT}} = \frac{975 \cdot 10^{-12}}{5} = 195 \cdot 10^{-12} \text{ F} \quad \text{ce qui donne } C_{\text{HT}} = 195 \text{ PF}$$

$$C_{\text{HT}} = 0,000195 \mu\text{F}$$

Le calcul de la capacité entre l'enroulement secondaire par rapport à la masse (le noyau) se fera par la formule suivante :

$$C_{2\text{tot}} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot l \frac{d_{\text{intBT}} + d_n}{d_{\text{intBT}} - d_n}$$

$$C_{2\text{tot}} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 2380 \cdot 10^3 \frac{920 + 860}{920 - 860}$$

$$C_{2\text{tot}} = 7652 \cdot 10^{-12} \text{ F} \quad \text{ce qui donne } C_{2\text{tot}} = 7652 \text{ PF}$$

La capacité transversale C_{BT} d'un élément entre l'enroulement secondaire et le noyau est donnée par la formule suivante :

$$C_{\text{BT}} = \frac{C'_{2\text{tot}}}{\text{Nombre d'élément} + 1}$$

$$C_{BT} = \frac{7652.10^{-12}}{5} = 1530,4.10^{-12}F \quad \text{ce qui donne } C_{BT} = 1530,4PF$$

$$C_{BT} = 0,0015304\mu F$$

La capacité totale C_{HBtot} entre les enroulements primaires et secondaires est donnée par la formule suivante :

$$C_{12tot} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot l \frac{d_{intHT} + d_{extBT}}{d_{intHT} - d_{extBT}}$$

$$C_{12tot} = 8,85.3,9.3,14.2380.10^3 \frac{1157 + 1051}{1157 - 1051} \quad \text{ce qui donne } C_{12tot} = 5373PF$$

La capacité transversale C_{HBT} d'un élément entre les enroulements primaires et secondaires est donnée par la formule suivante :

$$C_{HBT} = \frac{C'_{12tot}}{\text{Nombre d'élément} + 1}$$

$$C_{HBT} = \frac{5373.10^{-12}}{5} = 1074,6.10^{-12}F \quad \text{ce qui donne } C_{HBT} = 1074,6PF$$

$$C_{HBT} = 0,0010746\mu F$$

b) Capacités longitudinales des enroulements primaires et secondaire K

Connaissant les valeurs des capacités C_{HT} , C_{BT} et C_{HBT} , on peut passer facilement au calcul des capacités longitudinales K_{HT} , K_{BT} par la formule suivantes

$$K_{ntot} = \frac{C_{n\Sigma}}{\alpha^2}$$

Avec :

$$C_{1\Sigma} = C_{1tot} + \frac{C_{12tot}C_{2tot}}{C_{12tot} + C_{2tot}}$$

$$C_{2\Sigma} = C_{2tot} + \frac{C_{12tot}C_{1tot}}{C_{12tot} + C_{1tot}}$$

Mais pour ce la, il faut d'abord avoir la valeur de α calculée à partir de la fonction suivante :

$$F(\alpha) = \frac{\text{Sh}[\alpha(1-x)]}{\text{Sh}(\alpha.l)} \cdot U(x)$$

Le tableau qui suivra, résumera la répartition initiale des tensions, donnée par les fabricants des transformateurs de puissance et qui a été dressé pour un enroulement comportant 36 bobines.

N° Noëd	U(%)
A-0	100
2-0	83
4-0	51,6
6-0	42,1
8-0	34,6
10-0	29,6
12-0	25,6
14-0	23,3
16-0	21,3
18-0	19,5
20-0	18,3
22-0	17,0
24-0	16,4
26-0	15,1
28-0	14,1
30-0	13,2

Tableau .III.4

Après tout calcul fait, on aura $F(\alpha) = 0$ pour $\alpha = 3,62$

$$K_{1\text{tot}} = \frac{C_{1\Sigma}}{\alpha^2} \quad \text{avec:}$$

$$C_{1\Sigma} = 975 + \frac{5373.7652}{5373 + 7652} \quad \text{ce qui donne } C_{1\Sigma} = 4131,5\text{PF}$$

$$K_{1\text{tot}} = 315,28\text{PF}$$

La capacité longitudinale d'un élément de l'enroulement HT est donné par :

$$K_{HT} = K_{1tot} \cdot n$$

$$\text{ce qui donne } K_{HT} = 00,00126112\mu F$$

$$K_{2tot} = \frac{C_{2\Sigma}}{a^2} \quad \text{avec:}$$

$$C_{2\Sigma} = 7652 + \frac{5373.975}{5373 + 975}$$

$$\text{ce qui donne } C_{2\Sigma} = 8477,24PF$$

$$K_{1tot} = 646,9PF$$

La capacité longitudinale d'un élément de l'enroulement BT est donné par :

$$K_{BT} = K_{2tot} \cdot n$$

$$\text{ce qui donne } K_{BT} = 0,0025876\mu F$$

III.5 Schéma équivalent complet des enroulements HT du transformateur

Pour étudier la technique FRA dans le transformateur proposé, on l'applique sur l'enroulement HT, pour cela on calcule les paramètres du schéma équivalent de la figure III.6.

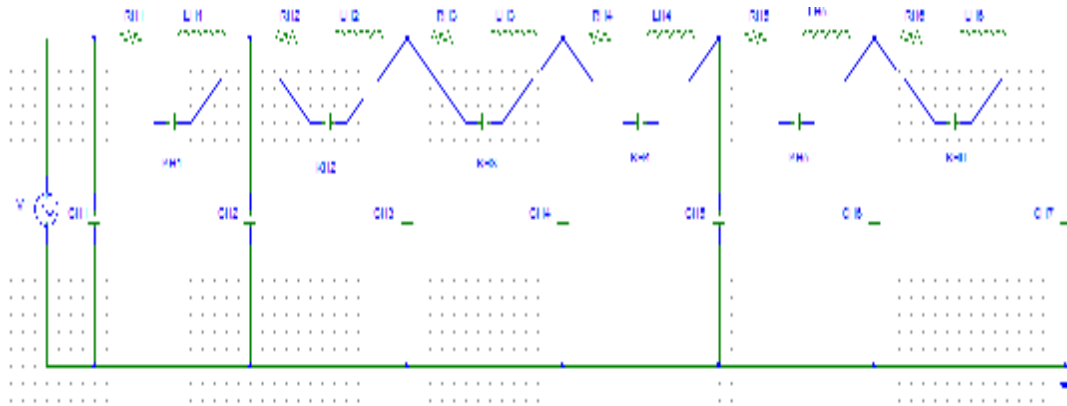


Fig.III.6 : Schéma équivalent complet des enroulements HT du transformateur

III.5.1 Détermination des paramètres de l'enroulement HT de transformateur de puissance

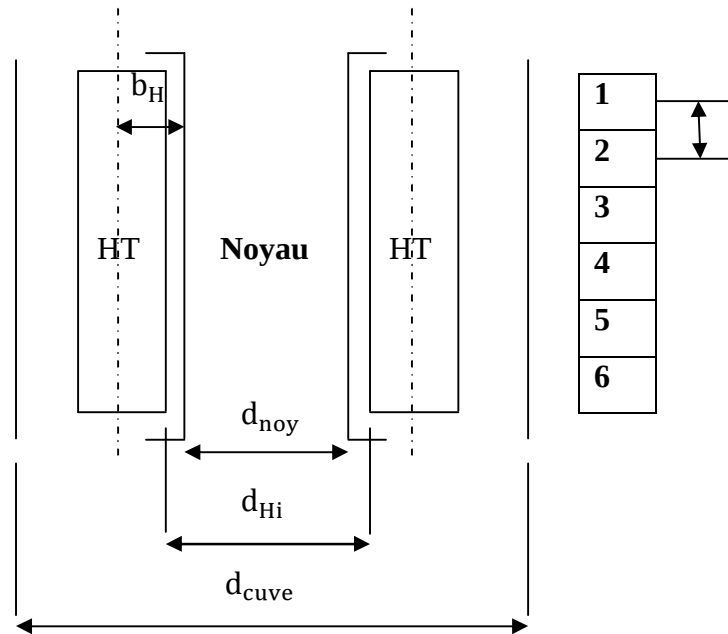


Fig. III.7 : schéma en coupe, de la disposition de l'enroulement autour du noyau et subdivisions de l'enroulement en élément

III.5.1.1 Détermination de la résistance R

R_0 : est la résistance de l'enroulement HT à la fréquence de 50 HZ calculée par :

$$R_0 = \frac{\Delta P_{cc} \cdot U_{nHT}^2}{S_n^2}$$

$$R_0 = \frac{400 \cdot 10^3 \cdot (121 \cdot 10^3)^2}{(125 \cdot 10^6)^2} = 0,3748 \Omega$$

$$R_0 = 0,3748 \Omega$$

La résistance R_{iHT} d'un élément (i) de l'enroulement est donnée par la relation suivante :

$$R_{iHT} = \frac{R_0}{\text{Nombre d'éléments}}$$

Les R_{iHT} pour les différents nombres d'élément sont donnés dans le tableau III.5 :

N	2	4	6	8	10
R_{iHT}	0,1874	0,0937	0,06246	0,04685	0,03748

Tableau III.5

III.5.1.2 Détermination de l'inductance propre L et les coefficients des mutuelles σ_{ij}

$$L_{tot} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_n^2}{S_n}$$

Avec la différence dans la tension nominale de service de chaque enroulement :

$$L_{tot} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_{nHT}^2}{S_n}$$

$$L_{tot} = \frac{1}{2\pi 50} \frac{10.5}{100} \frac{(121.10^3)^2}{125.10^6} = 0,039H$$

D'autre part, l'inductance d'un élément (i) de l'enroulement est calculée par la formule suivante :

$$L'_{iHT} = \frac{L_{tot}}{\text{Nombre d'éléments}}$$

$$L'_{iHT} = \frac{0,039}{6} = 0,0065$$

$$L'_{iHT} = 0,0065H$$

Dans le tableau III.6 sont rassemblées les valeurs de l'inductance L pour les différents nombres d'élément :

N	2	4	6	8	10
$L'_{iHT}(H)$	0,0195	0,00975	0,0065	0,00487	0,00039

Tableau III.6

L'inductance L'_{iHT} tient compte à la fois de l'inductance propre L_{iHT} et la somme des mutuelles M_{ij} , en d'autre terme :

$$L_{iHT} = L'_{iHT} + \sum_{j=1, j \neq i}^n M_{ij}$$

Ce qui revient à calculer les coefficients de mutuelles, elles sont données par la relation

$$\sigma_{ij} = \frac{M_{ij}}{L_{iHT}} = f\left(\frac{a}{b}\right), \text{ qui est représentée sur la figure III-5}$$

Ou :

$$a = \frac{\text{longueur de l'élément}}{\text{Nombre d'éléments}} : \text{est la distance entre les éléments de l'enroulement .}$$

$$b = \frac{d_{intH} + d_{intHT}}{4} : \text{est la distance entre l'élément et le noyau .}$$

$$a=396,66\text{mm}$$

$$b=636,75\text{mm}$$

Les résultats de calcul des coefficients des mutuelles pour $n=6$ sont dans le tableau III-5.

III.5.1.3 détermination des capacités transversales C_1, C_2

La capacité totale C_{1tot} entre l'enroulement et le noyau est donnée par :

$$C_{1tot} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \pi \cdot l \frac{d_{intHT} + d_n}{d_{intHT} - d_n}$$

$$C_{1tot} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 2380 \cdot 10^{-3} \frac{1157 + 860}{1157 - 860}$$

$$C_{1tot} = 1751,71 \cdot 10^{-12} \text{F}$$

$$\text{ce qui donne } C_{1tot} = 1751,71 \text{PF}$$

$$C_1 = \frac{C_{1tot}}{\text{Nombre d'élément} + 1}$$

$$C_1 = \frac{1751,71 \cdot 10^{-12}}{7} = 250,24 \cdot 10^{-12} \text{F}$$

$$\text{ce qui donne } C_1 = 250,24 \text{PF}$$

$$C_1 = 0,00025024 \mu\text{F}$$

$\frac{M}{L}$ compris entre 0 et 1

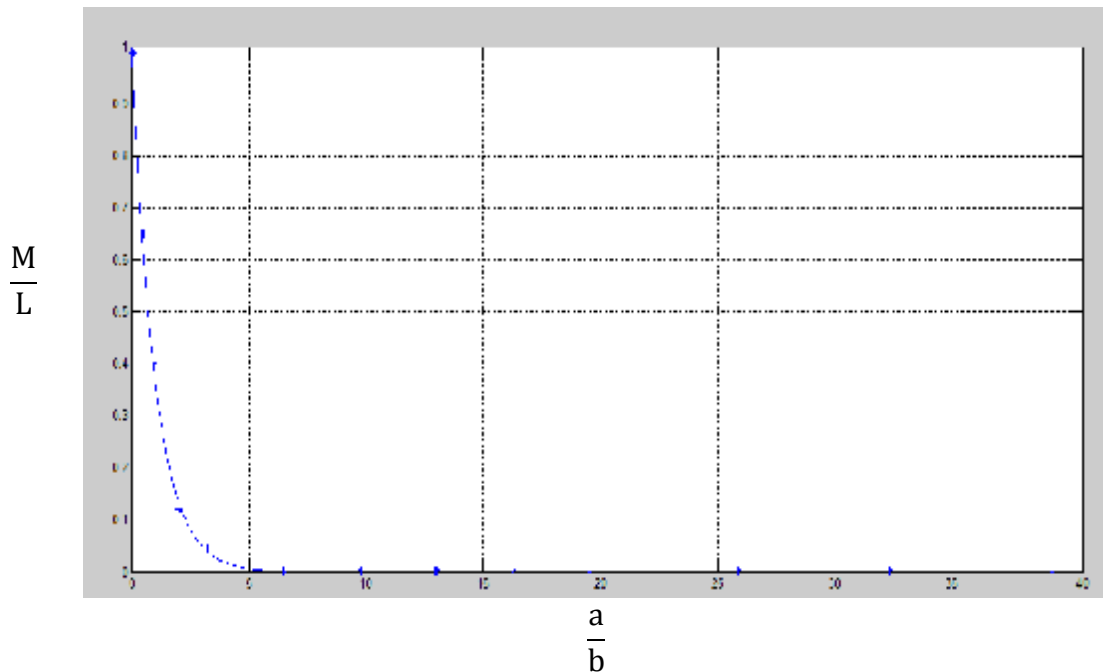


Fig.III.8 : représentation de la fonction $\frac{M}{L} = f\left(\frac{a}{b}\right)$

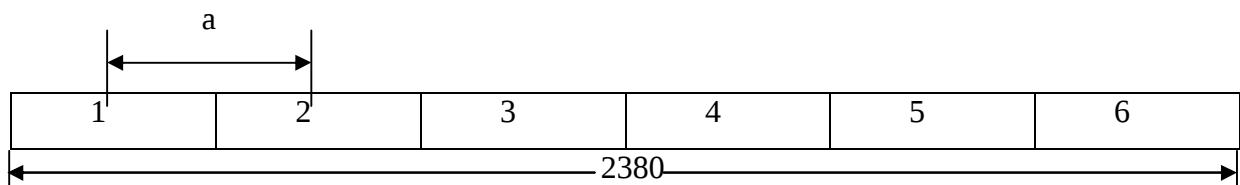


Fig. III .9 : subdivision de l'enroulement

Remarque

Le calcul de coefficients des mutuelles entre les éléments d'enroulement se fait en fonction de $\frac{a}{b_{HT}}$ (tableau N°(III.7))

III.5.1.4 Calcul de coefficient de mutuelle entre l'élément de l'enroulement

N ⁰	a	b	$\frac{a}{b_{HT}}$	$\sigma_{iHT} = \frac{M_{iHT}}{L_i}$
1	396,66	636,75	0,623	0.53635709882753
2	793,32	636,75	1,246	0.28767893746268
3	1190	636,75	1,868	0.15429864029127
4	1586,66	636,75	2,491	0.08275917105966
5	1983,3	636,75	3,115	0.04438846889093

Tableau III.7

Donc :

$L_{iHT} = 0,009189360H$: L'inductance propre d'un élément de l'enroulement

D'autre part, le tableau III.8 donne les valeurs de capacité transversale C_1 de l'enroulement en fonction du nombre d'éléments:

Nombre d'élément	2	4	6	8	10
C_1 (pF)	875,855	437,927	291,951	218,963	175,171

Tableau III.8

La capacité totale C_{2tot} entre l'enroulement et la cuve est donnée par :

$$C_{2tot} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot l \frac{d_{intHT} + d_{cuve}}{d_{intHT} - d_{cuve}}$$

$$C_{2tot} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9 \cdot 3,14 \cdot 2380 \cdot 10^{-3} \frac{2390 + 1157}{2390 - 1157}$$

$$C_{2tot} = 742 \cdot 10^{-12} F \quad \text{ce qui donne } C_{2tot} = 742 PF$$

$$C_2 = \frac{C_{2tot}}{\text{Nombre d'élément} + 1}$$

$$C_2 = \frac{742 \cdot 10^{-12}}{7} = 106 \cdot 10^{-12} F \quad \text{ce qui donne } C_2 = 106 PF$$

$$C_2 = 0,000106\mu\text{F}$$

De la même manière : le tableau III.9 donne les valeurs de capacité transversale C_2 de l'enroulement en fonction du nombre d'éléments:

Nombre d'élément	2	4	6	8	10
$C_2(\text{pF})$	371	185,5	123,66	92,75	74,2

Tableau III.9

La valeur de la capacité transversale C est la somme de C_1 et de C_2 .

D'où :

$$C = C_1 + C_2$$

Le tableau III.10 donne les valeurs de C

Nombre d'élément	2	4	6	8	10
$C = C_1 + C_2$	1246,855	623,427	415,611	311,713	249,371

Tableau III.10

III.5.1.5 Détermination de la capacité longitudinale K

La capacité longitudinale K est calculée d'après la valeur de facteur α :

D'où : $\alpha = 3,62$

D'autre part :

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{\text{tot}}}{K_{\text{tot}}}}$$

$$K_{\text{tot}} = \frac{C_{\text{tot}}}{\alpha^2}$$

Avec : $C_{\text{tot}} = (n+1).C = (n+1) (C_1 + C_2)$

Donc : $C_{\text{tot}} = 7(106 + 250,24)$

$C_{\text{tot}} = 2493,68\text{pF}$

$C_{\text{tot}} = 0,00249368\mu\text{F}$

et

$K_{\text{tot}} = 190,293\text{pF}$

$K_{\text{tot}} = 0,000190293\mu\text{F}$

La capacité longitudinale d'un élément (i) est :

$K = K_{\text{tot}} \cdot n$

n: nombre d'éléments

$K = 190,293 \cdot 6 = 1141,76\text{pF}$

$K = 0,00114176\mu\text{F}$

Le tableau III.11 donne les valeurs de capacité longitudinale K de l'enroulement en fonction du nombre d'éléments:

Nombre d'élément	2	4	6	8	10
K (pF)	380,586	761,172	1141,758	1522,344	1902,93

Tableau III.11

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a calculé les paramètres du modèle proposé du transformateur de puissance d'enroulement HT et BT, pour cela on a utilisé un programme dans MATLAB qui vérifie les résultats trouvés.

CHAPITRE IV :

Validation du modèle adopté par des essais et discussions des résultats

IV.1 Introduction

Ce chapitre consiste à étudier l'analyse de la réponse du gain en fréquence de l'enroulement HT sain et avec défaut, puis l'exploiter en vue de son diagnostic. L'objectif de ce travail est d'indiquer exactement les points des éléments endommagés et l'apparition de défaut sur une large plage de fréquence à la suite des différents types de défaillances qui peuvent survenir sur l'importe quel point de l'enroulement.

IV.2 Différents types de défaillances d'isolement dans un transformateur

Les défaillances internes se présentent sous les formes suivantes :

- Les défauts d'isolement entre spires d'un même enroulement (cas le plus fréquent).
- Les défauts entre enroulements
- Les défauts d'isolement entre l'enroulement sollicité et une partie conductrice proche (noyau ou cuve).

Les isollements externes des transformateurs immergés sont dimensionnés largement et on n'observe pas de cas de défaillance diélectrique externe sur ces transformateurs, hormis certains cas de transformateurs de réseaux aériens en zone particulièrement polluée. Les transformateurs secs peuvent donner lieu à des défaillances diélectriques externes en cas de pollution des surfaces isolantes. [22]

Le comportement associé à ces trois catégories de défaillances internes de défauts peut être décrit comme suit :

IV2.1 Défauts entre spires

Les défauts entre spires de l'enroulement haute tension correspondent au mode de défaillance le plus fréquent et également le plus difficile à détecter. Ils résultent de la dégradation locale de l'isolant du conducteur, par contrainte thermique ou diélectrique. La manifestation immédiate se réduit à une faible augmentation du courant primaire, du fait de la modification du rapport de transformation d'une part, et de l'apparition d'un phénomène de spire en court circuit sur l'enroulement concerné. Cette spire en défaut se comporte comme un enroulement secondaire et est le siège d'un courant limité seulement par son impédance propre et par la résistance au point de défaut selon le courant qui va parcourir cette spire, l'évolution du défaut va être plus ou moins rapide. En cas de courant important,

l'échauffement local va entraîner la détérioration des spires avoisinantes et le défaut va s'étendre rapidement. [22]

IV.2.2 Défauts entre enroulements

Enroulements HT Les défauts entre enroulements HT sont rares mais peuvent donner lieu à des courants de défaut élevés, jusqu'au courant de court-circuit du réseau en cas de défaut au niveau des bornes, avec des manifestations très importantes. Certaines localisations particulières, comme un défaut entre enroulements au voisinage des connexions de point neutre d'un couplage étoile, s'apparentent à un défaut entre spires car les points venant en contact ne sont pas à des tensions très différentes. [23]

IV.2.3 Défauts à la masse et influence du régime de neutre

Les défauts entre enroulement HT et la masse ont comme origine la plus fréquente une rupture d'isolement suite à surtension. Toutefois, ils peuvent également être la conséquence de défauts de type mécanique ou de l'évolution d'un défaut électrique comme vu précédemment. Les caractéristiques d'un défaut à la masse, ainsi que les capacités à le diagnostiquer, dépendent du mode de mise à la terre du réseau d'alimentation et de l'emplacement du défaut dans le transformateur.

Dans le cas d'un réseau haute tension à neutre relié à la terre par une impédance et non distribué, le défaut fera apparaître un courant à la terre fonction de l'impédance du neutre et de la position du défaut sur l'enroulement. Dans le cas d'un courant de défaut très faible, on retrouve un risque de montée en pression lente comme pour les défauts entre spires.

Dans le cas d'un réseau à neutre accordé (mis à la terre par une bobine de Petersen), le défaut d'isolement d'un transformateur immergé va présenter un caractère auto-extincteur récurrent. La faible valeur du courant de défaut permet son extinction spontanée dans l'huile et la réapparition progressive de la tension, caractéristique d'un réseau à neutre accordé, entraîne un claquage quelques centaines de millisecondes plus tard. La fréquence du phénomène va augmenter s'il y a dégradation progressive par les claquages successifs entraînant une baisse de tenue diélectrique.

Dans le cas d'un réseau à neutre relié directement à la terre et distribué (réseau à 4 conducteurs), la présence d'un courant de neutre est normale, du fait de l'existence de charges monophasées, et l'apparition d'un défaut va augmenter le courant dans le neutre et ceci en fonction de l'impédance du tronçon d'enroulement non court-circuité. [24]

IV.2.4 Défauts liés à la technologie

Les défaillances internes aux transformateurs sont majoritairement la conséquence de sollicitations externes (surtensions, surintensités). Nous avons vu précédemment les différents modes de défaillance et la manière dont la situation peut évoluer. Toutefois, d'autres possibilités de défaillance sont envisageables selon les technologies de transformateurs.

a) Transformateurs immergés

Ø Une fuite de diélectrique non diagnostiquée à temps aboutira à un défaut électrique par perte d'isolation en haut des bobinages. Une telle fuite peut être initiée par la corrosion de la cuve, ou par un choc par exemple.

Ø La pollution du diélectrique, par présence de particules issues de la cuve, du noyau ou des isolants.

b) Transformateurs à isolation solide

Ø Des contraintes mécaniques anormales (chocs, efforts de serrage de connexions...) peuvent fissurer l'isolant, permettant des amorçages entre spires ou vers des masses avoisinantes.

Ø La fissuration d'isolant peut également être la conséquence d'un vieillissement thermique anormal lié à une mauvaise utilisation du transformateur.

Ø Des imperfections de moulage de l'isolation solide peuvent donner naissance au phénomène de décharges partielles, si des bulles sont présentes dans l'isolant à des endroits à champ électrique élevé. Ce phénomène provoque une dégradation interne de la matière jusqu'à l'apparition d'un défaut majeur.

Ø La présence de polluants externes (poussières) sur de tels transformateurs perturbe la répartition des contraintes diélectriques en surface jusqu'à l'apparition de défauts d'isolement.

Ø L'approche de masses métalliques à une distance inférieure à la distance prescrite par le constructeur peut créer localement une contrainte excessive pour l'isolation.

Une synthèse des contraintes en exploitation et de leurs conséquences est présentée tableau IV.1.5 [25]

Contrainte	Cause possible	Défaillance la plus probable	Manifestations initiales
Surintensions	*Choc de foudre proche. *Manœuvres du réseau.	*Claquage entre spires HT *Claquage entre enroulement et masse	*Dégagement gaz ou fumée. *Faible augmentation du courant de phase
Surintensité faible	*Surcharge *Défaut impédant sur réseau BT	*Destruction enroulements aux points les plus chauds avec court-circuitage de spires	*Dégagement gaz ou fumée *Faible augmentation du courant de phase
Surintensité violente	*Défaut BT proche	*Destruction enroulements aux points les plus chauds avec court-circuitage de spires et déplacements de bobines	*Evolution rapide et aléatoire vers un défaut d'enroulements
Vieillessement	*Cumul des contraintes antérieures	*Claquage entre spires HT *Evolution possible à la terre	*Dégagement gaz ou fumée *Faible augmentation du courant de phase *Courant à la terre

Tableau IV.1 : synthèse des contraintes en exploitation et conséquences.

IV.3 Schéma équivalent à l'enroulement HT et BT adopté

Le schéma équivalent à l'enroulement HT et BT d'un transformateur 121/110 kV-125 MVA-50Hz, de fabrication russe ce transformateur fonctionnant en élévateur dans une centrale électrique. Le schéma équivalent est donné par la figure IV.1

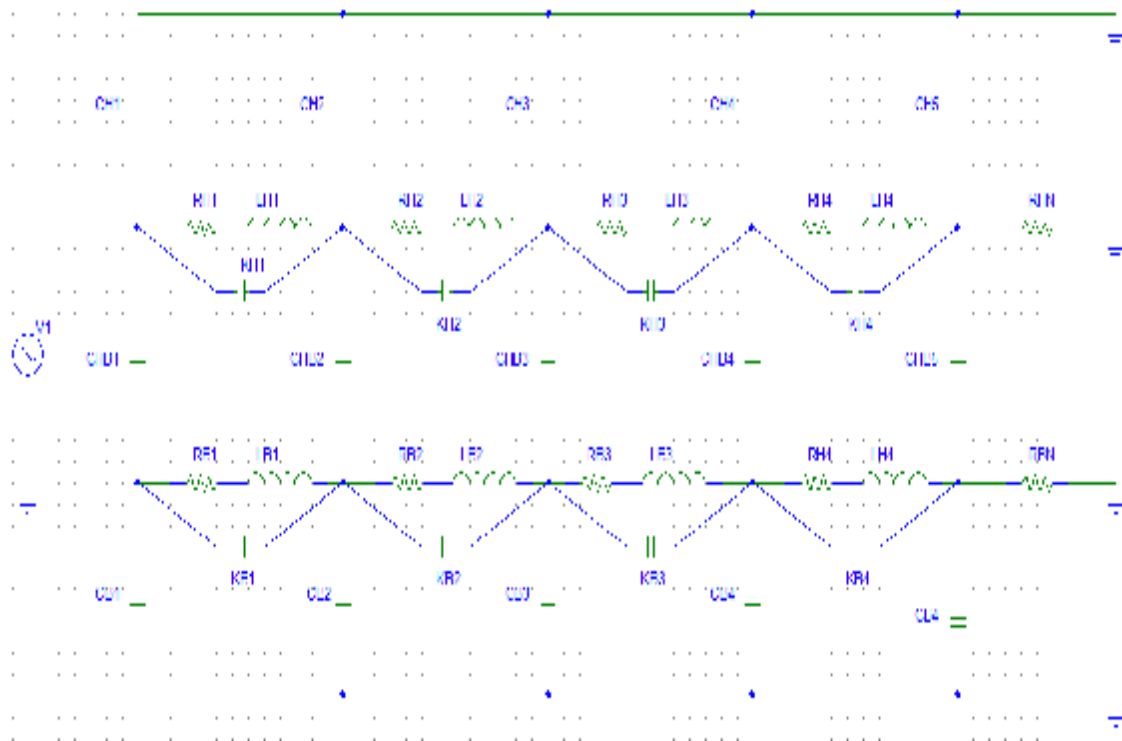


Fig. IV.1 : schéma équivalent complet des enroulements HT et BT du transformateur

IV.3.1 Validation du modèle adopté

IV.3.1.1 Injection d'une tension sinusoïdale

Afin de valider le schéma équivalent de la figure IV.1, une tension sinusoïdale d'amplitude 98.790 kV est appliquée au primaire (fig. IV.2). On relève une tension de 8.57 kV sur la partie qui correspond au secondaire (fig. IV.3), cette valeur est la tension secondaire du transformateur considéré.

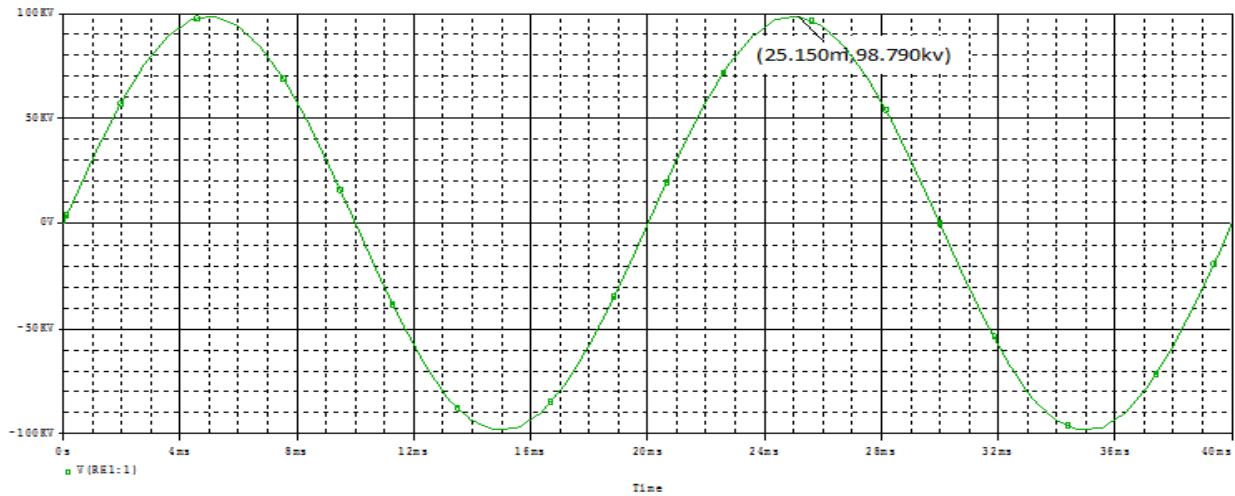


Fig. IV.2 : Tensions sinusoïdales appliquées au primaire

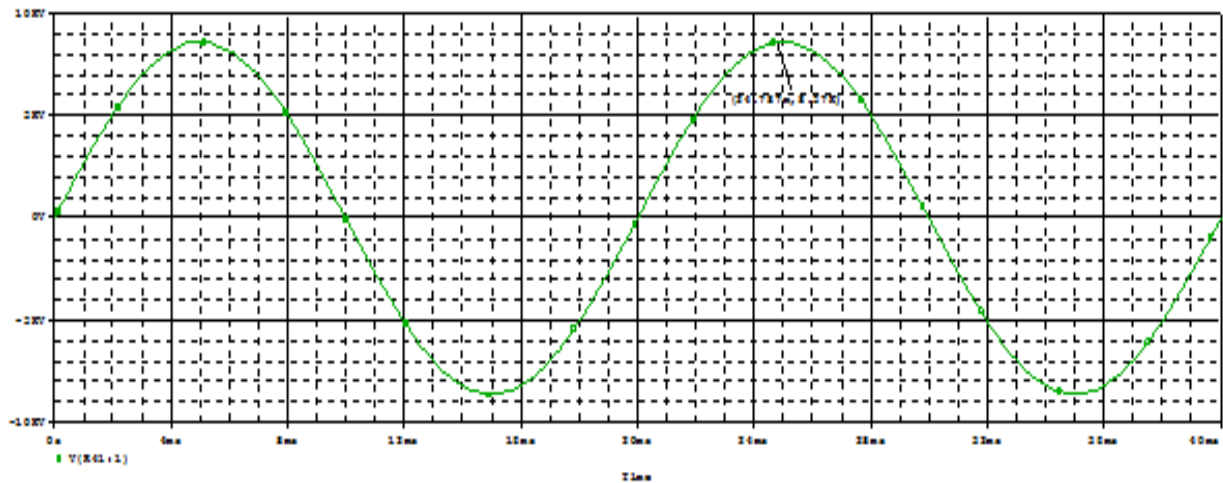


Fig. IV.3 : Tension sinusoïdal relevée au secondaire

IV.4 Etude de la réponse fréquentielle du gain de l'enroulement suite à des sollicitations sinusoïdales à fréquence variable

Après avoir validé le schéma équivalent en régime sinusoïdal, on remplace la sollicitation sinusoïdale par une tension test d'amplitude 2V et de fréquence variable, en réalisant divers défauts sur le schéma équivalent de l'enroulement haute tension (fig.IV.4) et interprétation des résultats obtenus par simulation sous P-spice 10.5.

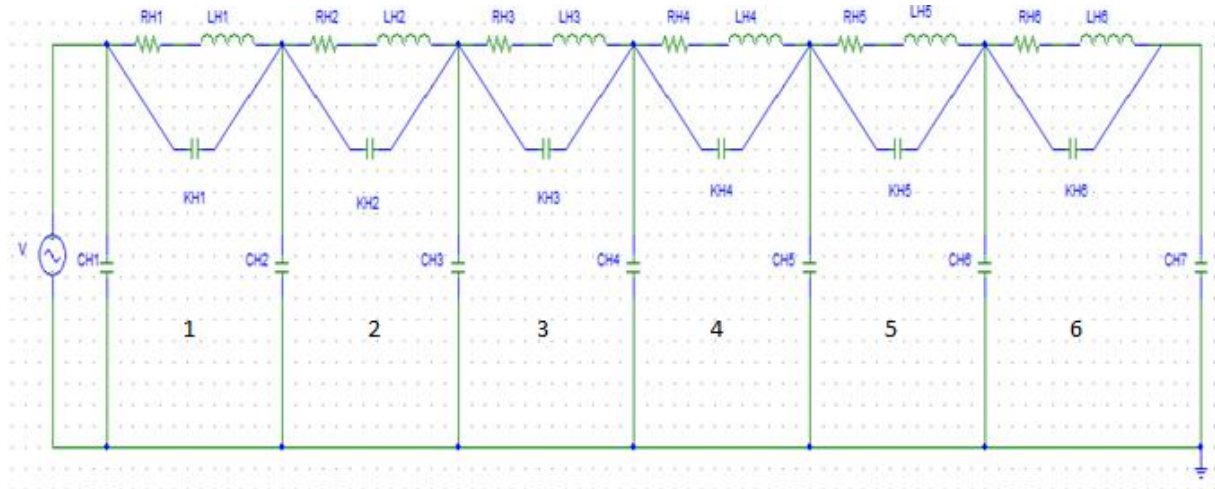


Fig. IV.4 : Schéma équivalent complet des enroulements HT du transformateur

Pour étudier les différentes défaillances de l'enroulement avec la technique d'analyse fréquentielle, on a fait varier les paramètres du modèle d'un enroulement supposé sain. Les modifications des valeurs de ces paramètres dépendent du défaut à analyser

Les défauts simulés sont les suivants

- Court-circuit entre spires.
- Circuits ouverts.
- Déformations propres de l'enroulement.
- Défaut entre partie active et la masse.

IV.4.1.1 Réponse en fréquence du gain de l'enroulement HT sans défaut (sain)

La fig. IV.5, représente la réponse de l'enroulement HT supposé sain, suite à une application d'une tension 2V de fréquence variable à son entrée.

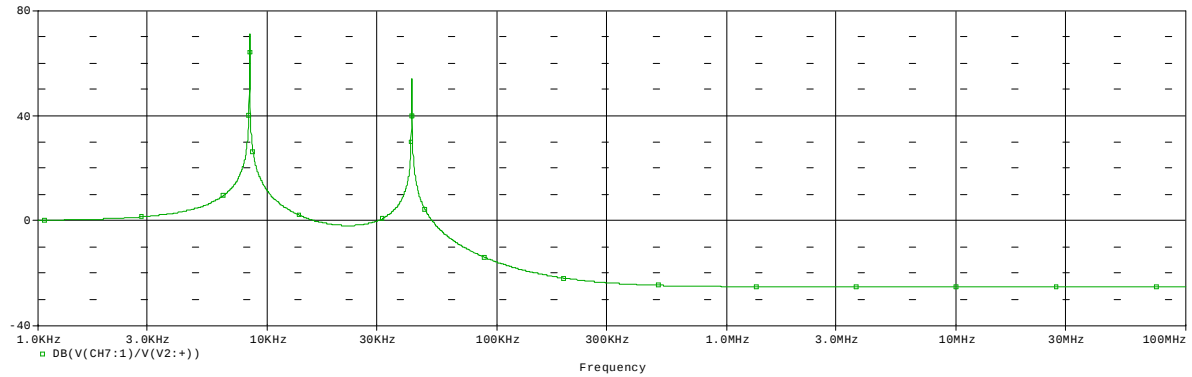


Fig. IV.5 : La réponse fréquentielle de l'enroulement HT sans défaut

IV.4.2. La réponse fréquentielle de l'enroulement HT avec défaut

Les simulations effectuées permettent d'avoir les empreintes engendrées par les différents défauts considérés, en suite ces dernières sont comparées à celle issue d'un enroulement supposé sain, afin d'analyser les perturbations sur les réponses en fréquence suite à ces anomalies simulées pour enfin déduire les plages de fréquences où les ces signatures sont affectées et associer chaque gamme de fréquence à un défaut bien déterminé.

IV.4.2.1 Court-circuit entre spires

IV.4.2.1.1 Défaut entre une seule spire

1.1. a) La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (1)

La figure IV.6.a, montre le gain d'une réponse fréquentielle d'un défaut entre la spire (1).

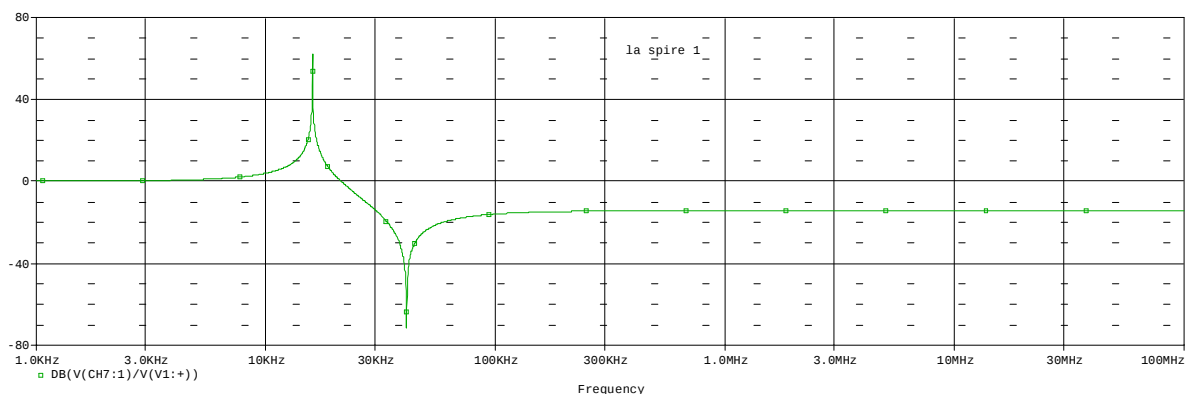


Fig. IV.6.a : La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (1)

L'application de la technique FRA donne des informations sur la tenue des structures géométriques et mécaniques des enroulements, la mesure de la réponse en fréquence de l'enroulement HT sur une large gamme de fréquence et comparer cette réponse à celle qu'on

obtient pour un enroulement sain. La FRA permet de détecter de nombreux types de défaut déferents, cette approche à pour but la localisation exacte des défauts de l'enroulement cela illustrée par les figures de simulation obtenue.

L'application de court-circuit entre la première spire, nous indique la forme de la réponse en fréquence, on voit que le pic de résonance de défaut apparait dans la plage de fréquence (20kHz-80kHz), on remarque lors de ce défaut la forme de la réponse est différente à celle obtenue sur l'enroulement sain comme le montre la figure IV.6.a.

1.1.b) La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (2)

La fig. IV.6.b, représente la réponse de l'enroulement HT, suite à une application d'un défaut entre la spire (2).

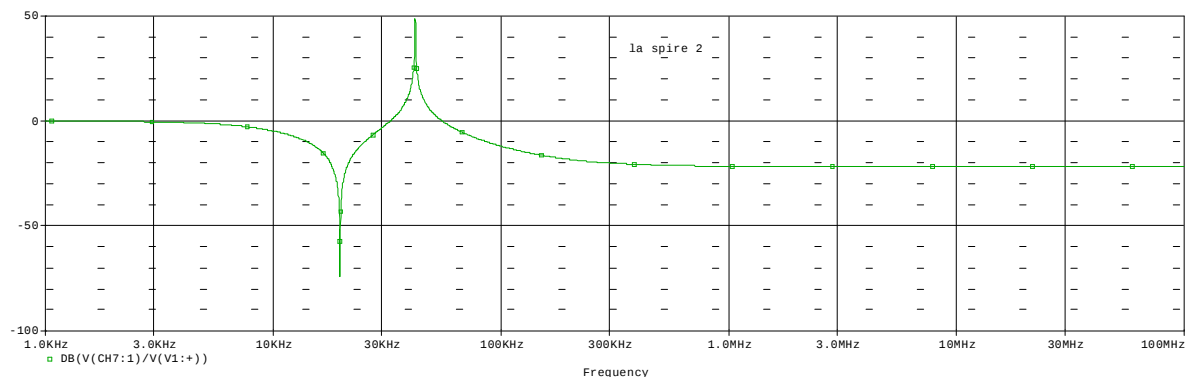


Fig. IV.6.b : La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (2)

1.1.c) La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (3)

La fig. IV.6.c, représente la réponse de l'enroulement HT, suite à une application d'un défaut entre la spire (3).

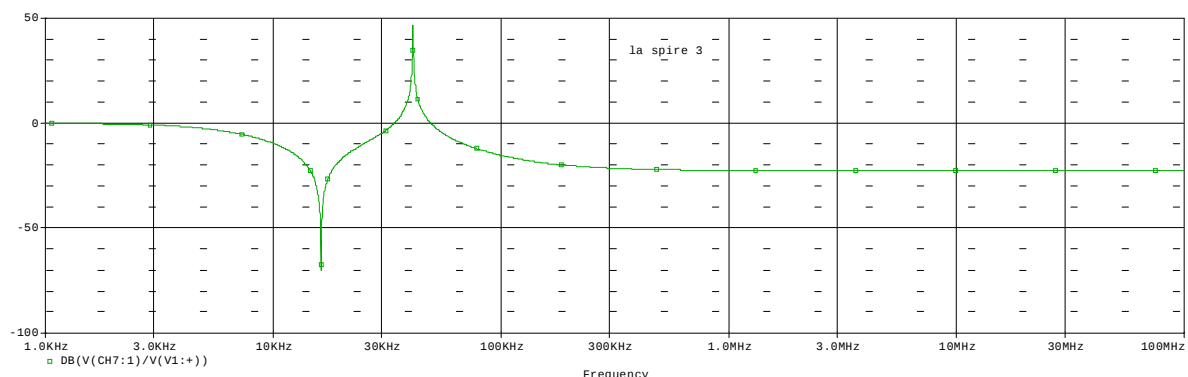


Fig. IV.6.c : La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (3)

1.1.d) La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (4)

La fig. IV.6.d, représente la réponse de l'enroulement HT, suite à une application d'un défaut entre la spire (4).

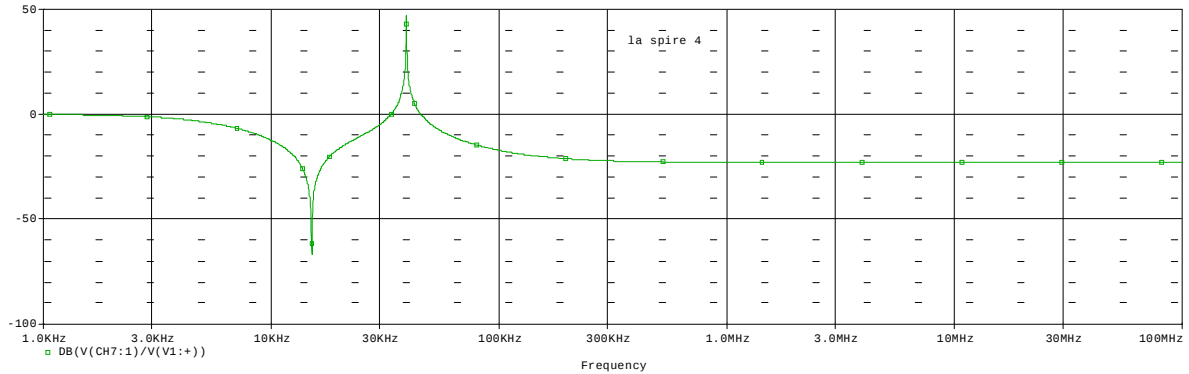


Fig. IV.6.d : La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (4)

1.1.e) La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (5)

La fig. IV.6.e, représente la réponse de l'enroulement HT, suite à une application d'un défaut entre la spire (5).

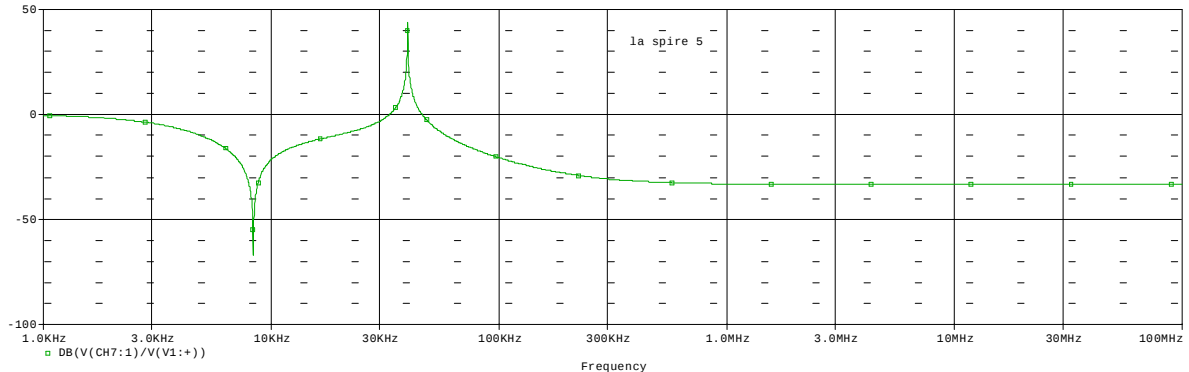


Fig. IV.6.e : La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (5)

1.1.f) La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (6)

La fig. IV.6.f, représente la réponse de l'enroulement HT, suite à une application d'un défaut entre la spire (6).

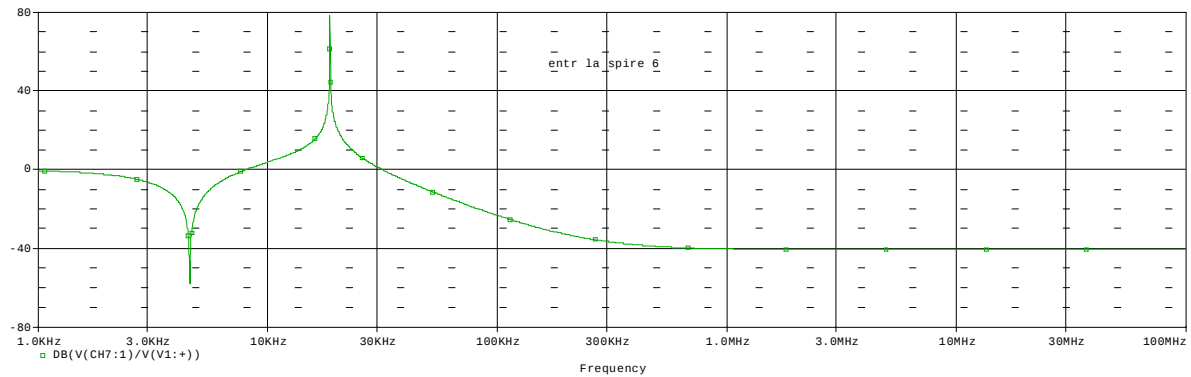


Fig. IV.6.f : La réponse fréquentielle d'un défaut entre spire (6)

Pour les figures IV.6.b.c.d.e.f, on constate le déplacement des pics de resonnces dans la plage de fréquence (3KHz-50KHz) avec le déplacement de défaut crée entre les diffirentes spires le long de l'enroulement HT

IV.4.2.1.2 Défaut entre deux spires(2)

1.2.a) La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (1 et 2)

La fig. IV.7.a, représente la réponse fréquentielle de l'enroulement HT, lors d'un défaut appliqué entre les spires (1 et 2).

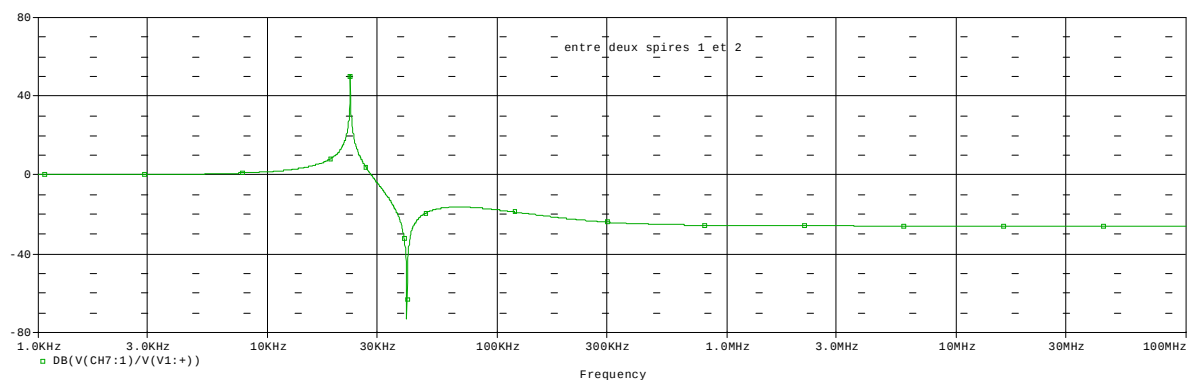


Fig. IV.7.a : La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (1 et 2)

De la réponse en fréquence de l'enroulement affecté par un court-circuit entre les deux premières spires, on remarque l'apparition de la panne, disparition de pic de résonance existante et l'apparition de nouveau pic de résonance dans la plage de fréquence (25KHz-80KHz) par contre de (1kHz-25KHz) et (80KHz-100MHz) l'allure de la réponse ne change pas comparativement à celle obtenu d'un l'enroulement comme indique la figure IV.7.a.

1.2.b) La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (2 et 3)

La fig. IV.7.b, représente la réponse fréquentielle de l'enroulement HT, lors d'un défaut appliqué entre les spires (2 et 3).

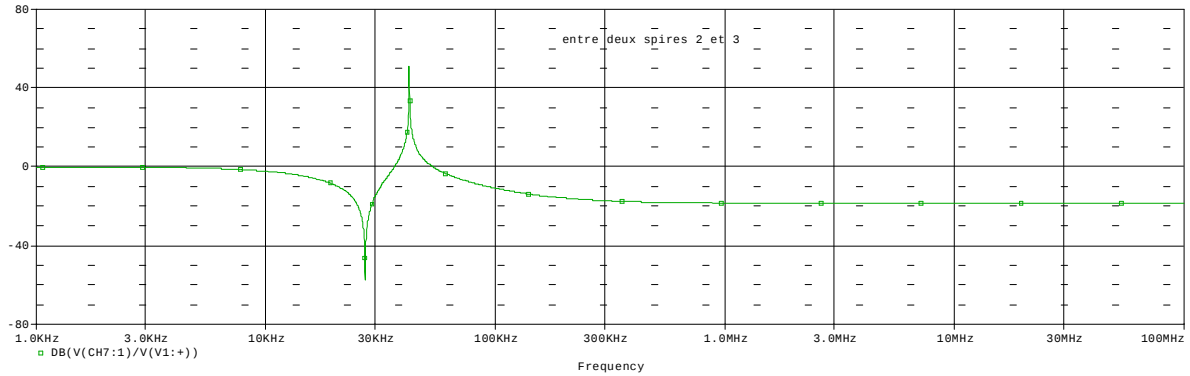


Fig. IV.7.b : La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (2 et 3)

1.2.c) La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (3 et 4)

La figure IV.7.c, représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut au niveau des spires (3 et 4).

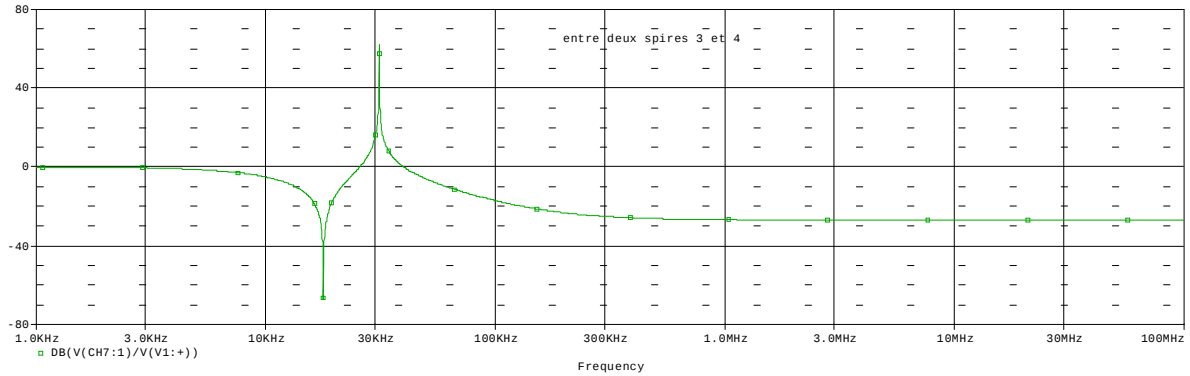


Fig. IV.7.c : La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (3 et 4)

1.2.d) La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (4 et 5)

La figure IV.7.d, représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut au niveau des spires (4 et 5).

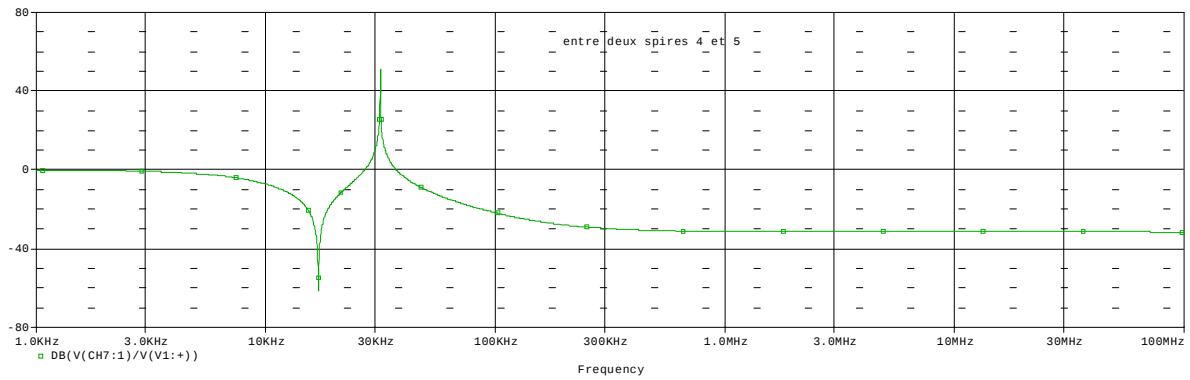


Fig. IV.7.d : La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (4 et 5)

1.2.e) La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (5 et 6)

La figure IV.7.e ,représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (5 et 6).

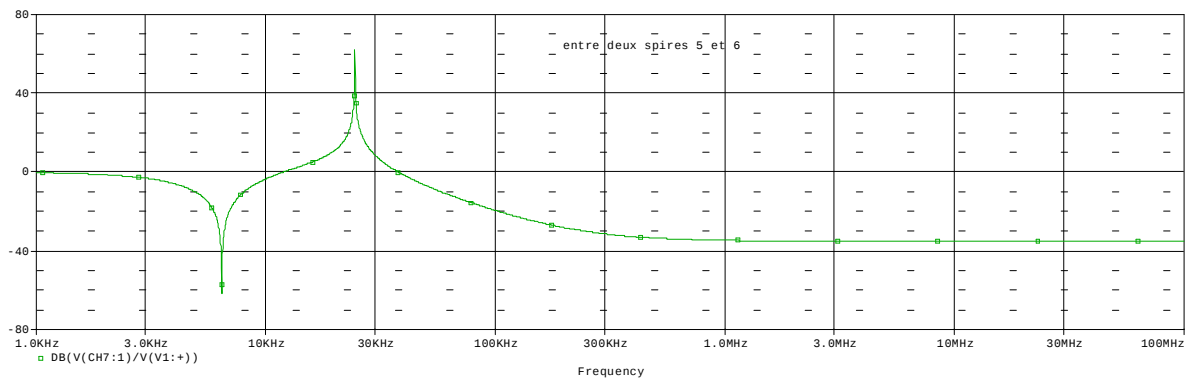


Fig. IV.7.e : La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (5 et 6)

Les tests de simulation FRA pour les autres défauts entre deux spires différentes sont représentés sur les figures IV.7.b, c, d et e, les graphes de simulation indiquent le changement de la forme de la réponse fréquentielle qui se manifeste par le déplacement des pics de résonance dans l'intervalle (2KHz-50KHz). À partir de 100KHz la réponse garde la même forme, on constate que les amplitudes des réponses ont tendance à décroître selon le déplacement du défaut le long de l'enroulement respectivement.

IV.4.2.1.3 Défaut entre trois spires

1.3.a) La réponse fréquentielle d'un défaut entre trois spires (1 et 3)

La figure IV.8.a ,représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (1 et 3).

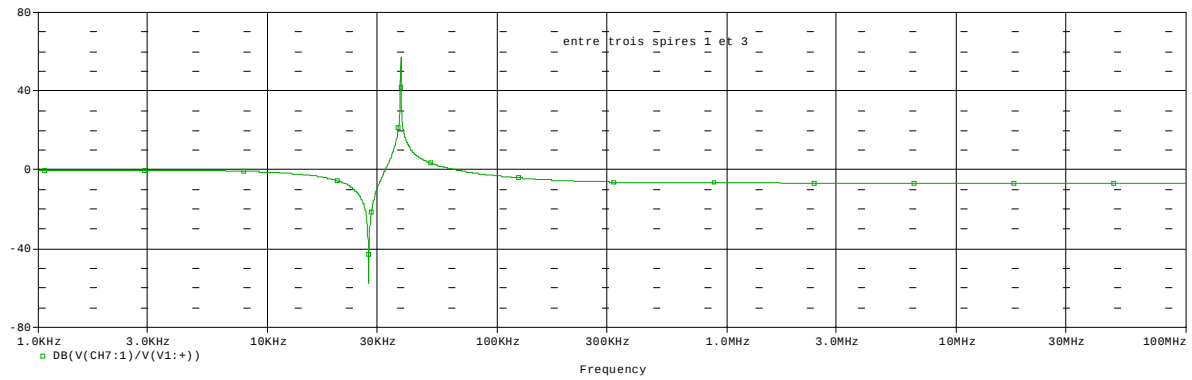


Fig. IV.8.a : La réponse fréquentielle d'un défaut entre trois spires (1 et 3)

1.3.b) La réponse fréquentielle d'un défaut entre trois spires (2 et 4)

La figure IV.8.b ,représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (4 et 5).

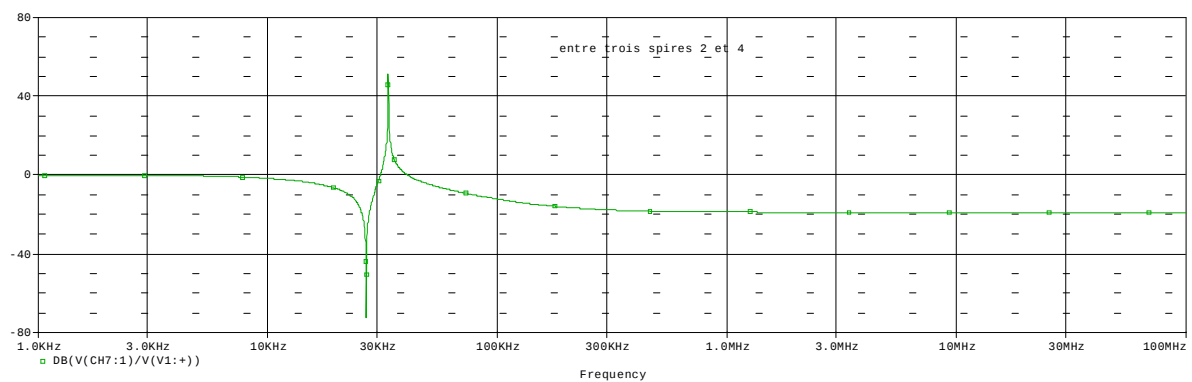


Fig. IV.7.b : La réponse fréquentielle d'un défaut entre trois spires (2 et 4)

1.3.c) La réponse fréquentielle d'un défaut entre trois spires (3 et 5)

La figure IV.7.c ,représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (3 et 5).

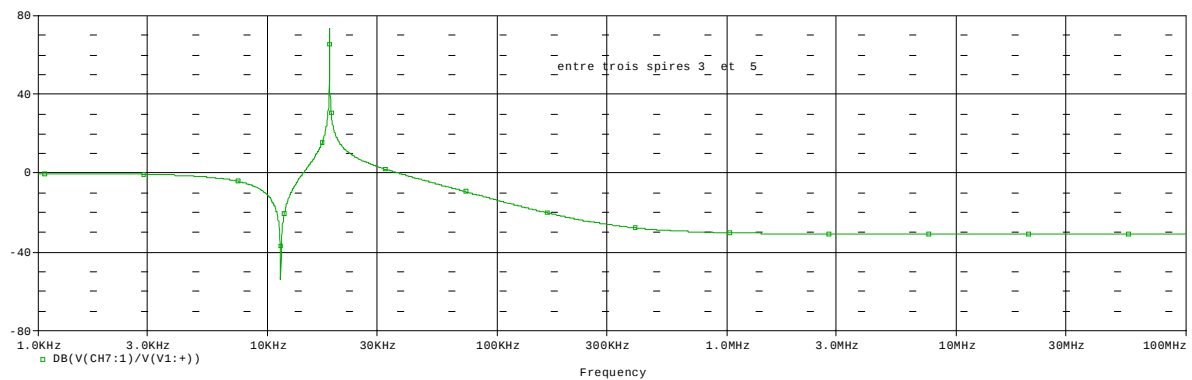


Fig. IV.7.c : La réponse fréquentielle d'un défaut entre trois spires (3 et 5)

1.3.d) La réponse fréquentielle d'un défaut entre trois spires (4 et 6)

La figure IV.7.c ,représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (4 et 6).

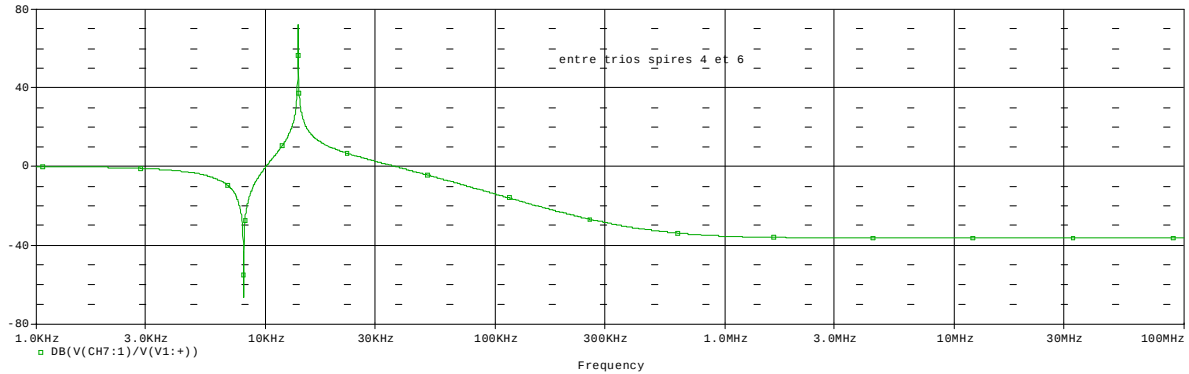


Fig. IV.7.d la réponse fréquentielle d'un défaut entre trois spires (4 et 6)

On remarque que l'apparition des pics de résonances dans la zone de gamme (3KHz-50KHz) et leurs déplacements avec la translation du défaut. La déformation de la forme de la réponse en fréquence par rapport à la réponse de l'enroulement sain est bien vérifiée. Mais dans l'intervalle (1KHz-3KHz ,100KHz-100MHz) la forme de la réponse ne change pas sauf que les amplitudes diminuent selon le défaut appliqué le long de l'enroulement comme le montre les figures IV.7.a, b, c et d

IV.4.2.1.4 Défaut entre quatre spires

1.4.a) La réponse fréquentielle d'un défaut entre quatre spires (1 et 4)

La figure IV.7.a ,représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (1 et 4).

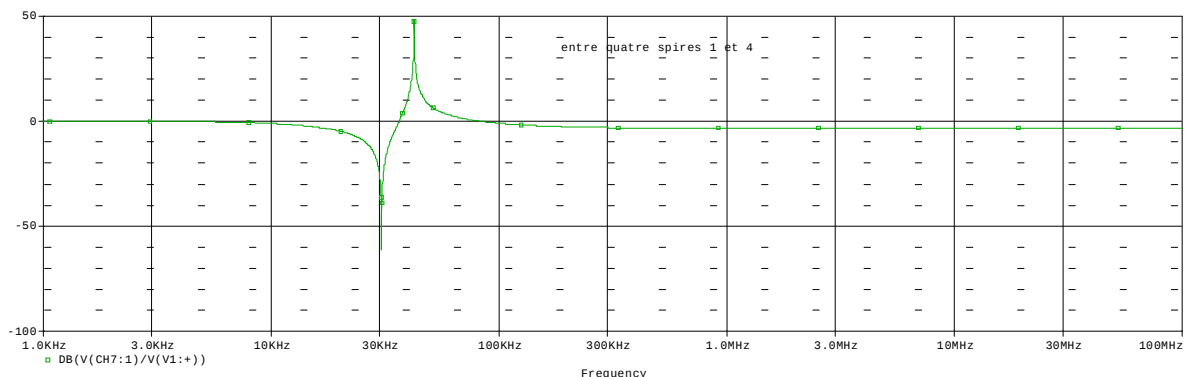


Fig. IV.8.a : La réponse fréquentielle d'un défaut entre quatre spires (1 et 4)

1.4.b) La réponse fréquentielle d'un défaut entre quatre spires (2 et 5)

La figure IV.7.b ,représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (3 et 5).

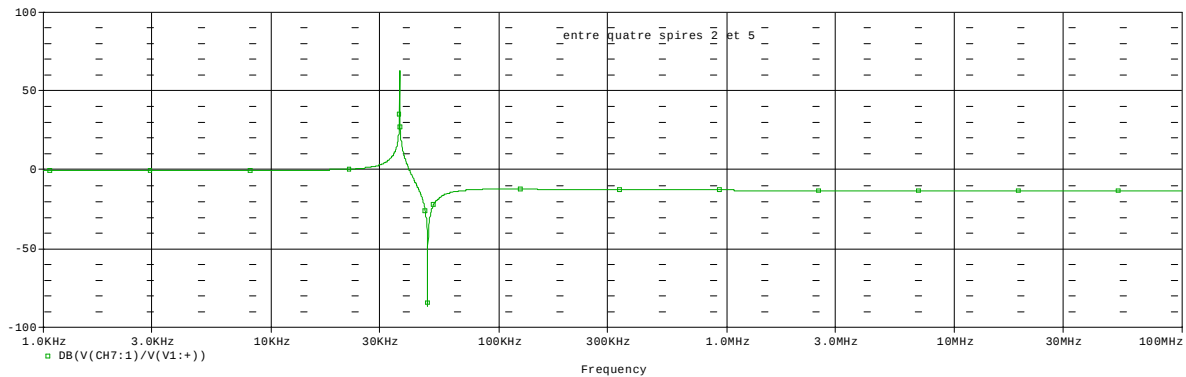


Fig. IV.8.b : La réponse fréquentielle d'un défaut entre quatre spires (2 et 5)

1.4.c) La réponse fréquentielle d'un défaut entre quatre spires (3 et 6)

La figure IV.7.c ,représente la réponse de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (3 et 6).

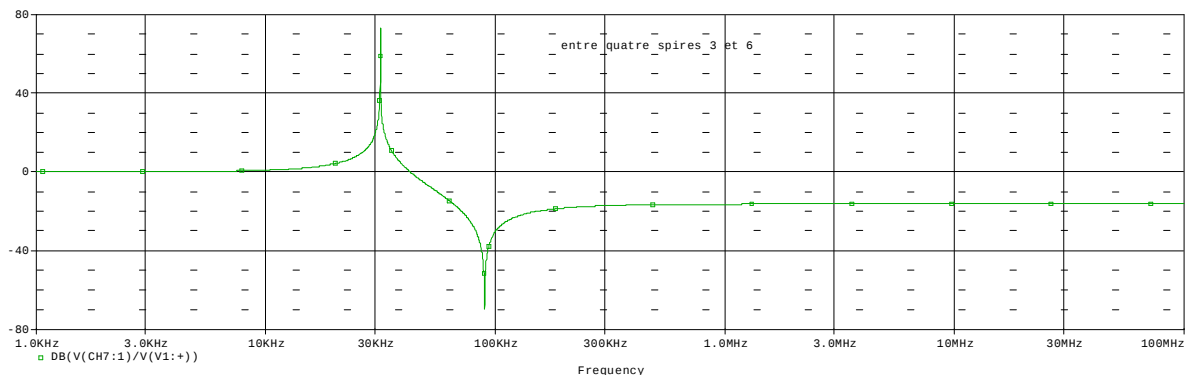


Fig. IV.8.c : La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (3 et 6)

On remarque que l'apparition de pic de résonance dans la zone de gamme (8KHz-30KHz) lors de court-circuit au niveau de la première spire (fig. IV.8.a), et déplacements des pics avec le déplacement de défaut qui apparaît dans la large de fréquence (50KHz-200KHz) , on constate la déformation de la forme de la réponse en fréquence par rapport à la réponse de l'enroulement sain. Dans l'intervalle (1KHz-25KHz ,300KHz-100MHz) la forme de la réponse ne change pas sauf que les amplitudes atténuent selon le défaut appliqué le long de l'enroulement comme la montre les figures IV.7. b.c.

IV.4.2.1.5 Défaut entre cinq spires

1.5.a) La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (1 et 5)

La figure IV.7.c ,représente la réponse fréquentielle de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (4 et 6).

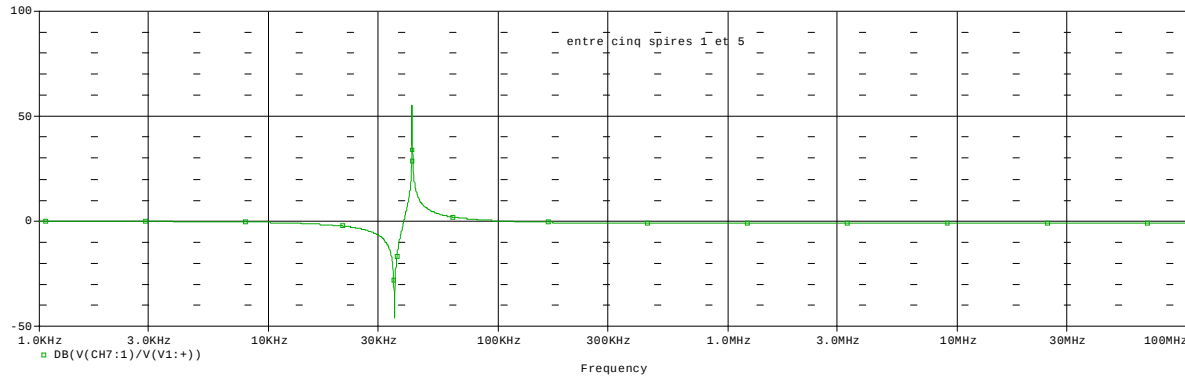


Fig. IV.9.a : La réponse fréquentielle d'un défaut entre cinq spires (1 et 5)

1.5.b) La réponse fréquentielle d'un défaut entre cinq spires (2 et 6)

La figure IV.7.b ,représente la réponse fréquentielle de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (2 et 6).

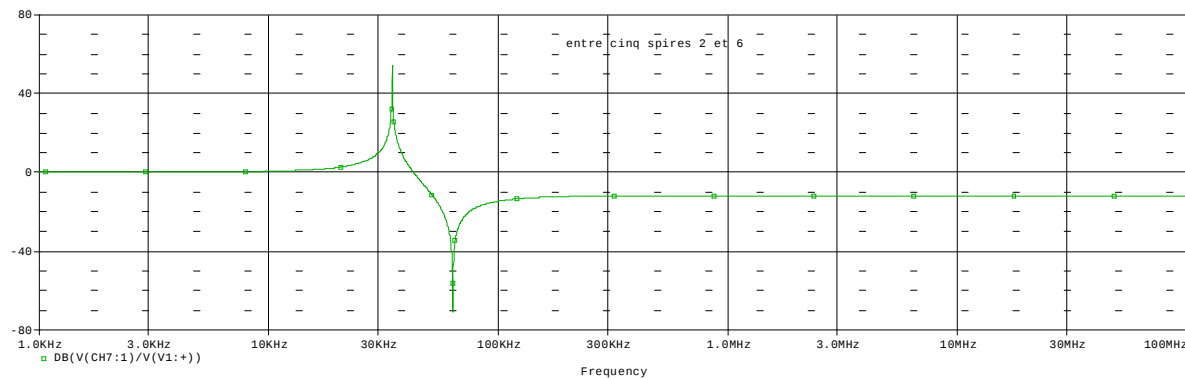


Fig. IV.9.b : La réponse fréquentielle d'un défaut entre cinq spires (2 et 6)

Lors de court-circuit entre les cinq premières spires la mesure de FRA nous indique l'appariation de pic de résonance dans la plage de fréquence (20KHz-50KHz) figure IV.9.a par contre la figure IV.9.b nous montre que la FRA détecte le défaut dans l'intervalle (50KHz-100KHz).

IV.4.2.1.6 Défaut entre six spires

1.6.a) La réponse fréquentielle d'un défaut entre six spires (1et 6)

La figure IV.10. ,représente la réponse fréquentielle de l'enroulement HT soumise à un défaut entre les spires (1 et 6).

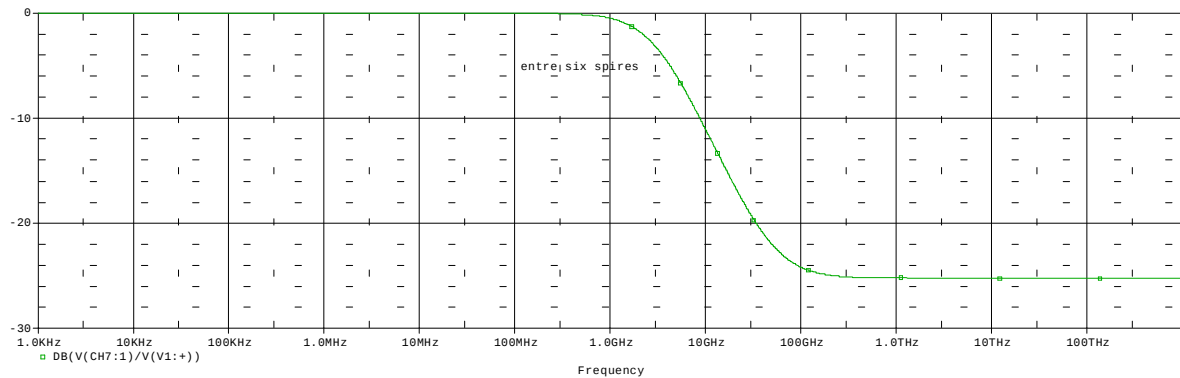


Fig. IV.10 : La réponse fréquentielle d'un défaut entre deux spires (1et 6)

On court-circuit l'enroulement complet, la réponse en fréquence donnée sur la figure IV.10, indique un changement global dans l'allure de la réponse, disparition de fréquences de résonance, l'enroulement se comporte comme un filtre passe bas avec une fréquence de coupure de l'ordre de 5 GHz.

IV.4.2.2 Circuits ouverts

2.a) La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (1)

Le défaut lié au circuit ouvert ou à la coupure de spire (1) est représenté sur la figure IV.11.a.

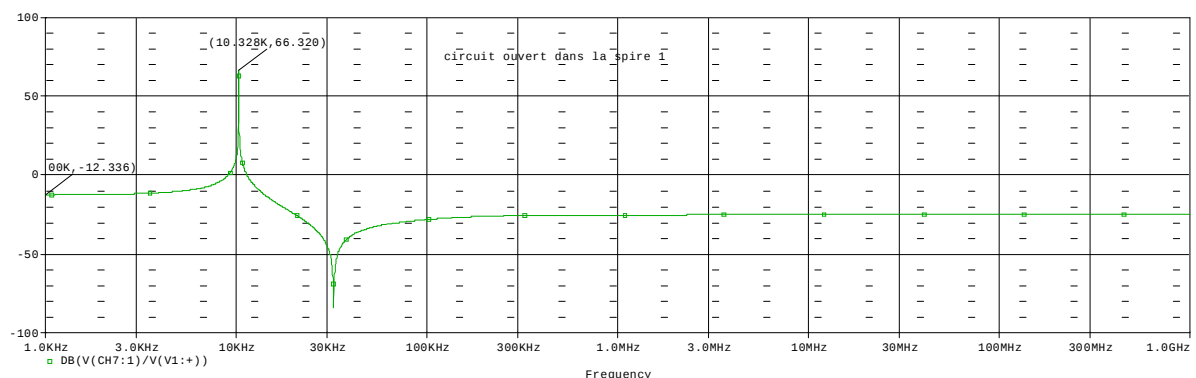


Fig. IV.11.a : La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (1)

Lors de défaut lié au circuit ouvert ou à la coupure de la spire (1) de l'enroulement HT, la FRA nous indique l'apparition de pic de résonance dans la plage de fréquence (1kHz-8kHz et 20kHz-100kHz).

2.b) La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (2)

Le défaut lié au circuit ouvert ou à la coupure de spire (2) est représenté sur la figure IV.11.b.

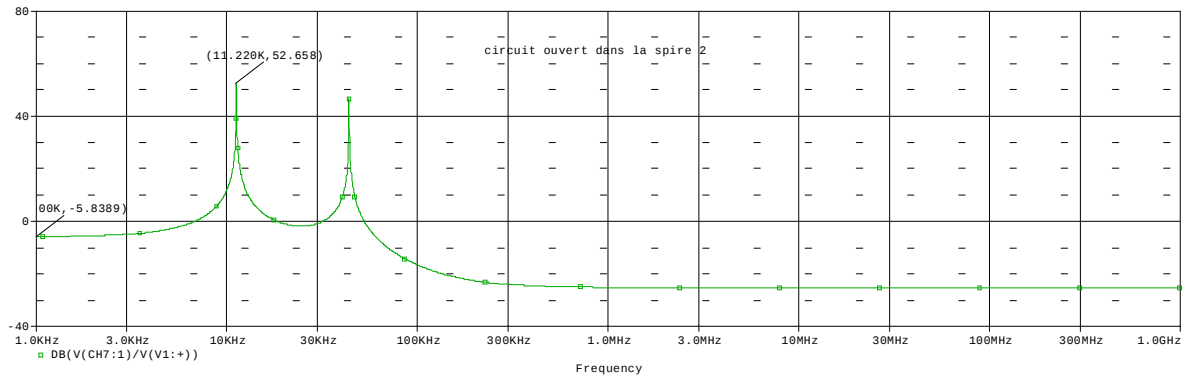


Fig. IV.11.b : La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (2)

2.c) La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (3)

Le défaut lié au circuit ouvert ou à la coupure de spire (3) est représenté sur la figure IV.11.c.

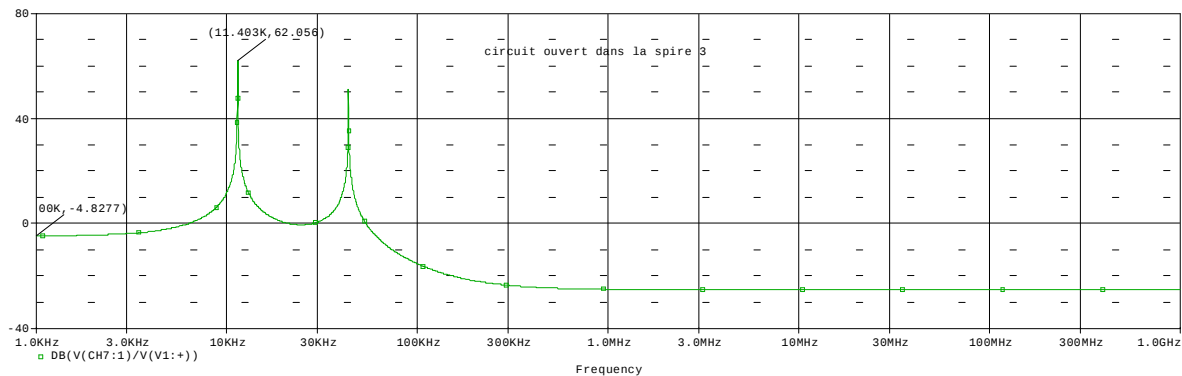


Fig. IV.11.c : La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (3)

2.d) La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (4)

Le défaut lié au circuit ouvert ou à la coupure de spire (4) est représenté sur la figure IV.11.d.

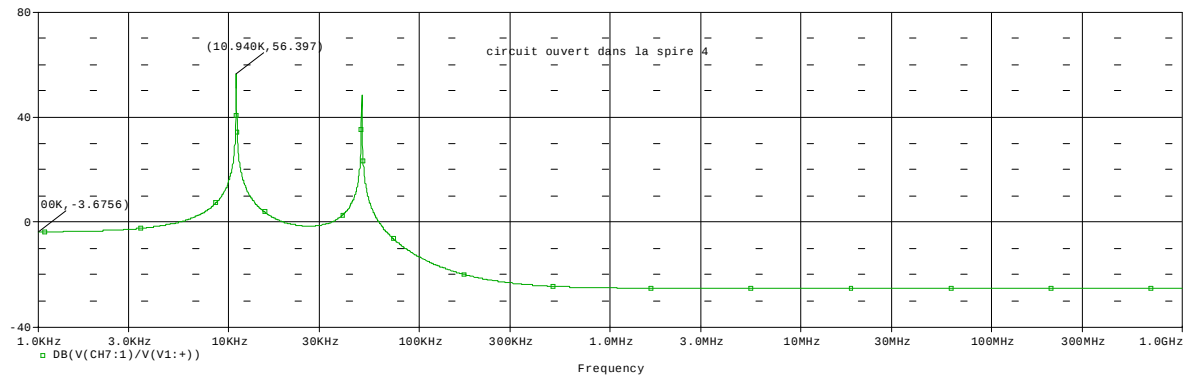


Fig. IV.11.d : La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (4)

2.e) La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (5)

Le défaut lié au circuit ouvert ou à la coupure de spire (5) est représenté sur la figure IV.11.e.

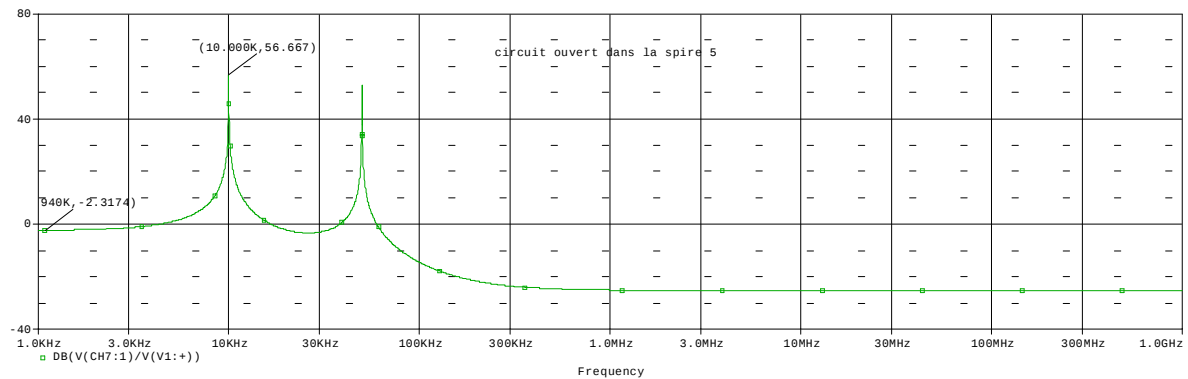


Fig. IV.11.e : La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (5)

2.f) La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (6)

Le défaut lié au circuit ouvert ou à la coupure de spire (6) est représenté sur la figure IV.11.f.

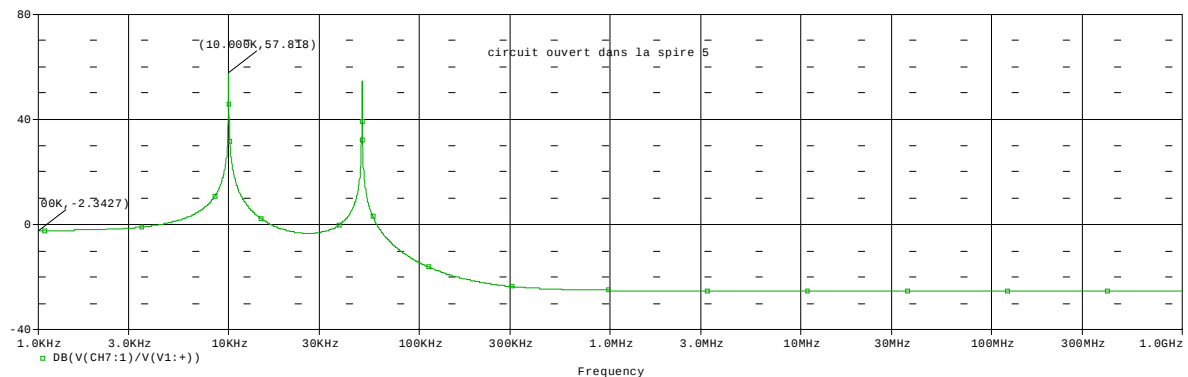


Fig. IV.11.f : La réponse fréquentielle d'un circuit ouvert entre la spire (6)

Les défauts liés aux circuits ouverts ou aux coupures des spires le long de l'enroulement HT sont représentés sur les figures IV.11.b, c, d, e, f. D'après les simulations effectuées, on a constaté l'apparition des déformations de la réponse en gain même aux faibles fréquences. Ces perturbations sont significantes dans la plage de fréquence (1KHz-8KHz). Mais, la réponse en fréquence garde la même forme que la réponse de l'enroulement sain dans la plage (100KHz-100MHz).

IV.4.2.3 Déformations propres de l'enroulement

3.a) La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (1)

La réponse fréquentielle liée à la déformation propre de l'enroulement au niveau de la spire (1) est représentée sur la figure IV.12.a.

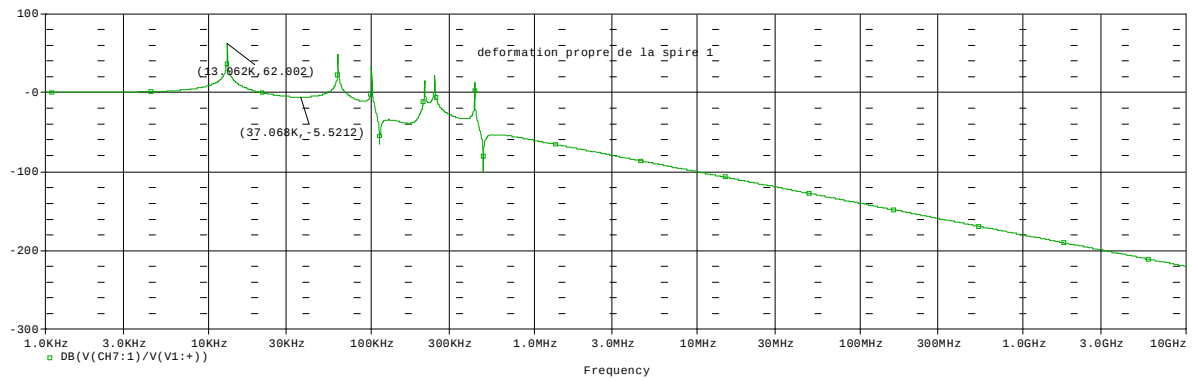


Fig. IV.12.a : La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (1)

3.b) La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (2)

La réponse fréquentielle liée à la déformation propre de l'enroulement au niveau de la spire (2) est représentée sur la figure IV.12.b.

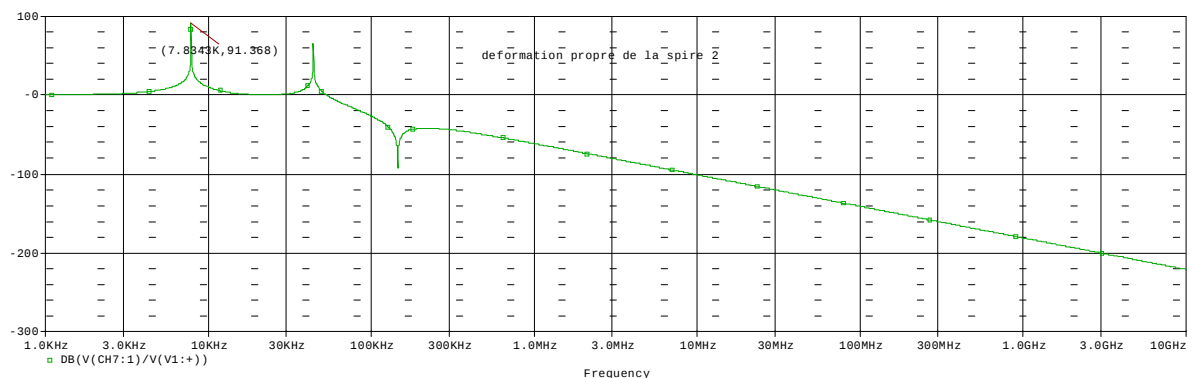


Fig. IV.12.b: La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire(2)

3.c) La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (3)

La réponse fréquentielle liée à la déformation propre de l'enroulement au niveau de la spire (3) est représentée sur la figure IV.12.c.

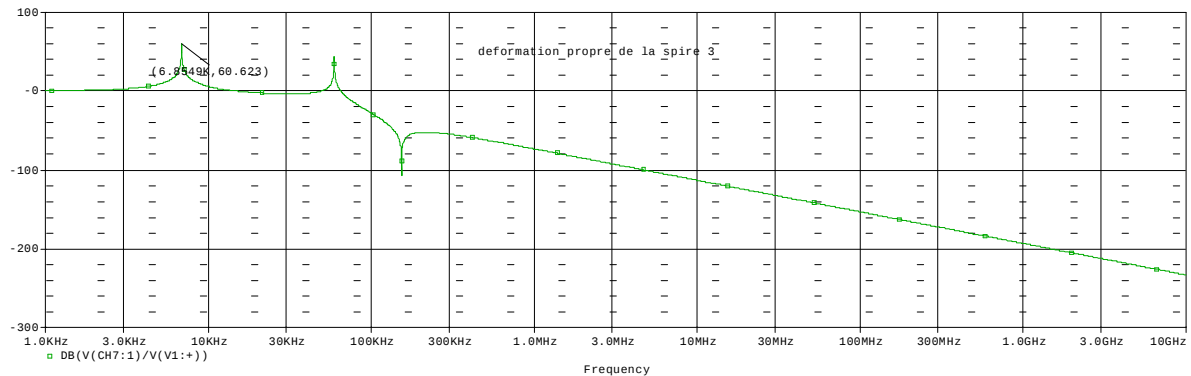


Fig. IV.12.c: La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (3)

3.d) La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (4)

La réponse fréquentielle liée à la déformation propre de l'enroulement au niveau de la spire (4) est représentée sur la figure IV.12.d.

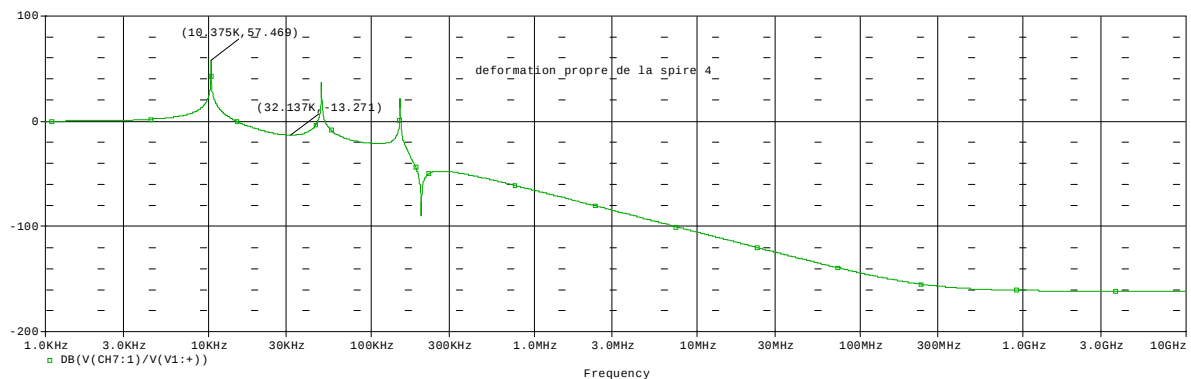


Fig. IV.12.d: La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (4)

3.e) La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (5)

La réponse fréquentielle liée à la déformation propre de l'enroulement au niveau de la spire (5) est représentée sur la figure IV.12.e.

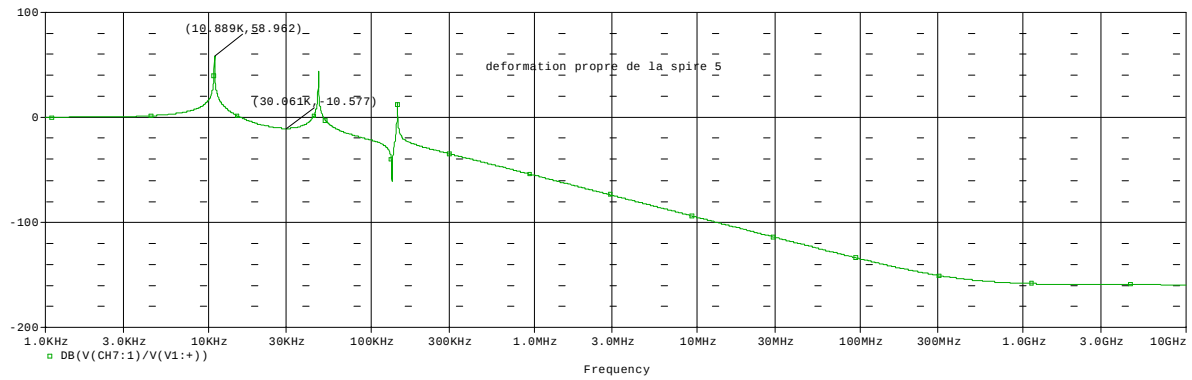


Fig. IV.12.e : La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire(5)

3.f) La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (6)

La réponse fréquentielle liée à la déformation propre de l'enroulement au niveau de la spire (6) est représentée sur la figure IV.12.f.

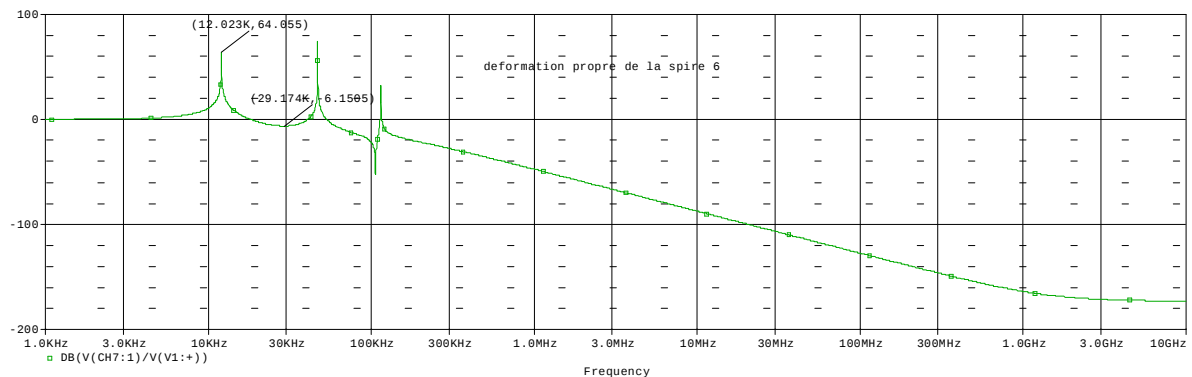


Fig. IV.12.f: La réponse fréquentielle à la déformation propre de l'enroulement de la spire (6)

Les réponses fréquentielles liées aux déformations propres de l'enroulement sont représentées sur les figures IV.12 a. b. c. d. e. f, les déformations se manifestent par des pics de résonances dans (100KHz-2MHz), le déplacement des pics est lié à celui des déformations de la spire le long de l'enroulement.

IV.4.2.4 Défaut entre partie active et la masse

4.a) La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (1) et la masse

La figure IV.13.a, montre la réponse liée au défaut entre la partie active (1) et la masse.

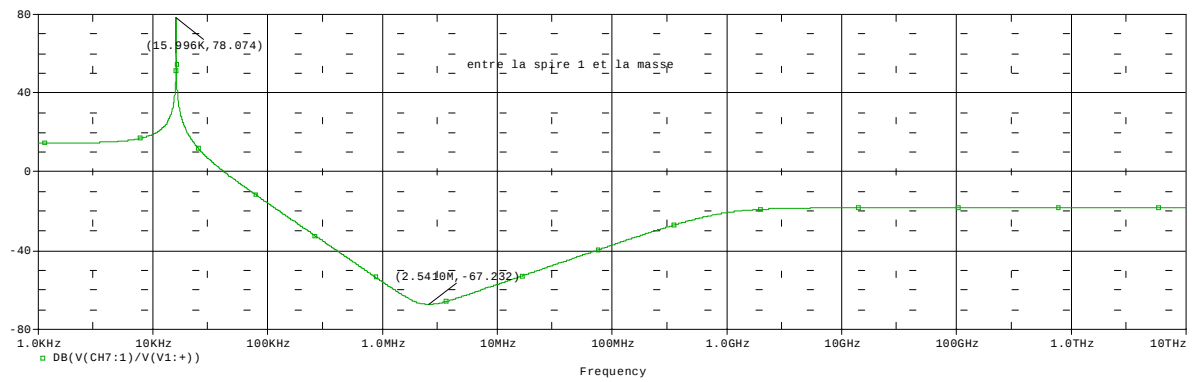


Fig. IV.13.a : La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (1) et la masse

4.b) La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (2) et la masse

La figure IV.13, b, montre la réponse liée au défaut entre la partie active (2) et la masse.

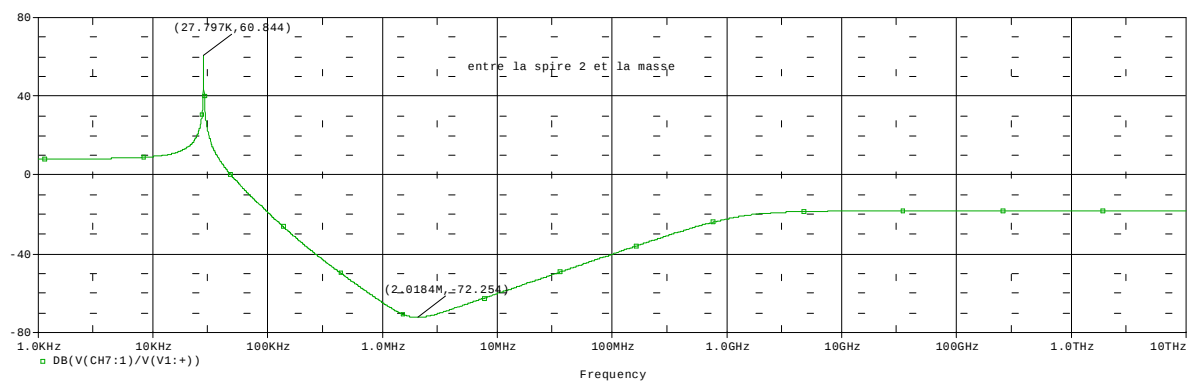


Fig. IV.13.b : La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (2) et la masse

4.c) La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (3) et la masse

La figure IV.13.c, montre la réponse liée au défaut entre la partie active (3) et la masse.

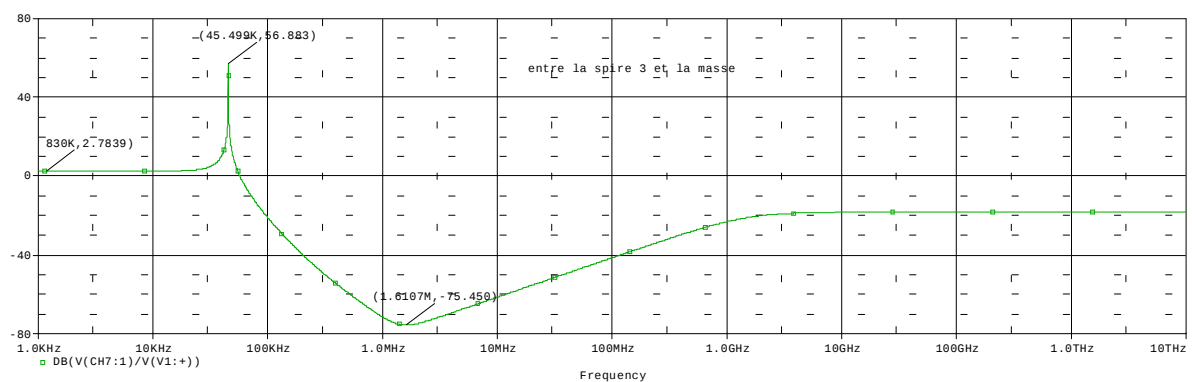


Fig. IV.13.c : La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (3) et la masse

4.d) La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (4) et la masse

La figure IV.13.d, montre la réponse liée au défaut entre la partie active (4) et la masse.

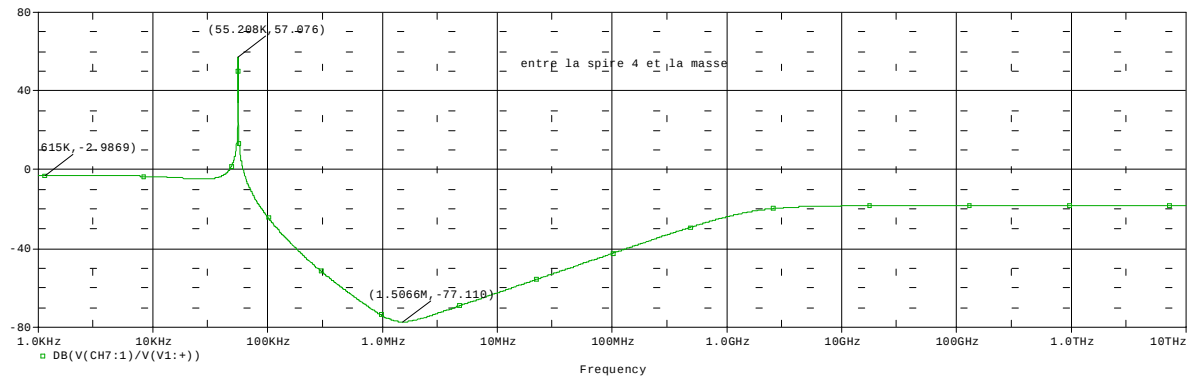


Fig. IV.13.d : La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (4) et la masse

4.e) La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (5) et la masse

La figure IV.13.e, montre la réponse liée au défaut entre la partie active (5) et la masse.

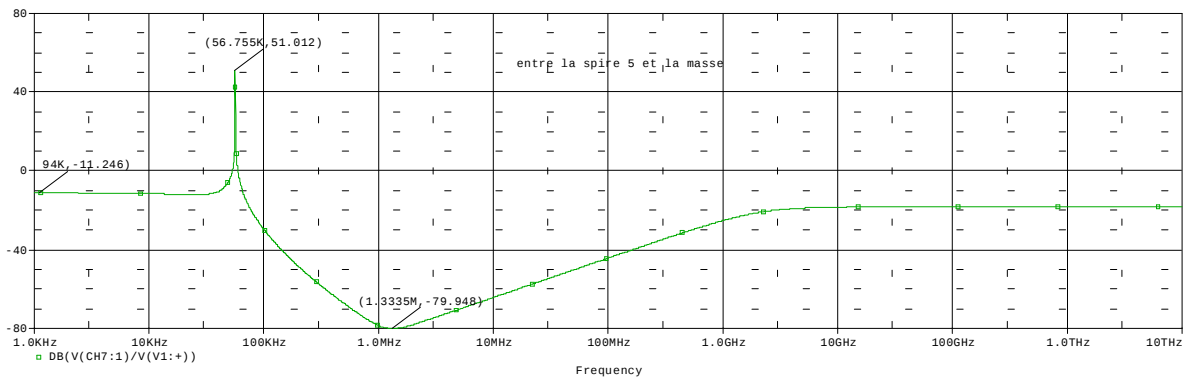


Fig. IV.13.e : La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (5) et la masse

4.f) La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (6) et la masse

La figure IV.13.f, montre la réponse liée au défaut entre la partie active (6) et la masse.

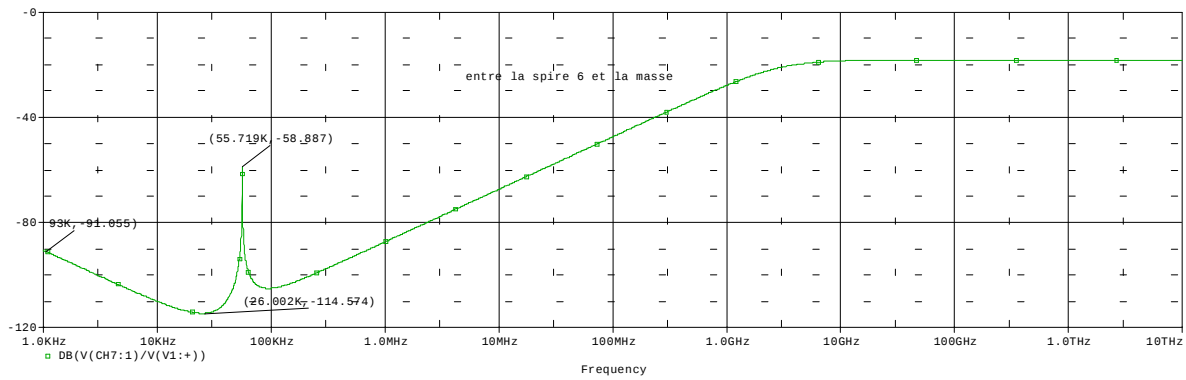


Fig. IV.13.f : La réponse fréquentielle d'un défaut entre partie active (6) et la masse

Les figures IV.13 a. b. c. d. e. f, montrent les réponses liées aux défauts entre la partie active et la masse. Les réponses fréquentielles ainsi obtenues, nous indique l'apparition des perturbations même aux faibles fréquences et l'apparition des pics de résonances dans la gamme de fréquence (100KHz-10MHz).

IV.5 Conclusion

D'après l'investigation menée dans ce chapitre nous a tiré les conclusions suivantes :

- La réponse fréquentielle de l'enroulement d'un transformateur sain est différente de celle qu'on a obtenue d'un enroulement défectueux.
- Les indications des problèmes sur les enroulements peuvent être déduites des changements de l'allure de la réponse, de l'apparition, déplacement ou disparition des pics de résonance selon le déplacement du défaut le long de l'enroulement et la nature de court-circuit.
- En plus du diagnostic des défauts à la suite de court-circuit, on a constaté l'intérêt croissant qui porte à la détection de la panne et la localisation exacte des défauts sur l'enroulement cela est illustrée par les figures de simulation obtenues. Défauts liés à des déformations des enroulements, nous indique l'évolution de l'état mécanique, géométrique et le comportement de transformateur.
- Les gammes de fréquences où les déformations de la réponse de l'enroulement pour les différentes anomalies simulées, sont concordantes avec celles assignées par les normes appliquées en pratique (Mesure par Frequency Analyser) utilisées par la société de Gestion des Réseaux de Transport d'Energie (GRTE, SONELGAZ).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'étude menée dans ce mémoire, est consacrée à l'analyse de réponse du gain en fréquence des enroulements d'un transformateur de puissance en vue de son diagnostic.

Le diagnostic des machines électriques, est science à part entière qui est exploitée dans le domaine du contrôle non destructif des dispositifs électrotechniques, afin de contribuer aux procédures de maintenance et d'entretien entreprises par les techniciens. Il existe une panoplie de méthodes de diagnostic des transformateurs cependant celle traitée dans le cadre de ce travail est l'une des plus performantes, souples et récentes, entre autre l'analyse de la réponse en fréquence des enroulements du transformateur.

Après l'application de méthode en question, sur un transformateur de puissance utilisée dans les centrales électriques (élévateur) 110/10.5kV-125MVA 50Hz ; on a pu tirer les conclusions suivantes :

- Les défauts de court-circuit entre spires, se manifestent par des pics de résonance dans la plage (3kHz-100kHz), et on a constaté le déplacement de ces pics avec le déplacement des défauts le long de l'enroulement.
- Les défauts liés aux ouvertures ou aux coupures de spires de l'enroulement apparaissent comme des perturbations sur la réponse en gain même aux faibles fréquences, ces perturbations sont significatives dans la plage de fréquence (1kHz-100kHz)..
- Les défaillances liées aux déformations propres de l'enroulement se manifestent par des pics de résonances dans (100kHz-2MHz).
- Les réponses liées aux défauts entre la partie active et la masse, se manifestent par des pics de résonances dans la plage de fréquence (100kHz-10MHz)
- Les résultats de simulation du modèle simplifié, adopté, sont concordants avec ceux assignés par les normes d'essais pratiques avec l'appareil FRA (frequency analyser).
- Les perturbations sont insignifiantes en HF.

Comme perspectives pour ce travail, nous suggérons :

- Un calcul plus affiné des paramètres des éléments du modèle équivalent en tenant compte de la variation paramétrique en fonction de la fréquence et de la température.
- Etude de l'empreinte suite au déplacement relatif entre les deux enroulements HT et BT .

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] : **TRAN Anh Tuan** : << Modélisation de la propagation des signaux HF dans le réseau d'énergie électrique >> . Thèse doctorat, l'école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, année 2006

- [2]: **A.Morched, L.Marti, J Ottevangers**<< A high frequency transformer model for EMTP >>. *IEEE Transaction on Power Delivery* Vol. 8, No. 3, July 1993.

- [3]: **F.Leon, A. Semlyen** <<Time domain modelling of eddy current effects for transformer transients >>. *IEEE Transaction on Power Delivery* Vol. 8, No 1, January 1993.

- [3]: **F.Leon, A. Semlyen** <<Complete transformer model for electromagnetic transients >>, *IEEE Transaction on Power Delivery* Vol. 9, No. 1, January 1995.

- [4]: **S. Chimklai, J. R.Marti**, <<Simplified three-phase transformer model for electromagnetic transients >>. *IEEE Transaction on Power Delivery* Vol. 10, No. 3, July 1995.

- [5]: **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.

- [6]: **C.Andrieu, E. Dauphant D. Boss**, << A Frequency-Dependant Model For a MV/LV Transformer>> *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Budapest, Hungary, June 20-24, 1999.

- [7]: **B.Gustavsen, A. Semlyen**. << Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients >>. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, No. 3, July 1998.

- [8]: **Technique de l'ingénieur**

Bibliographie

- [9]: **Xose M. L.F and Casimiro A.M.**, « Computation method for transients in power transformers With lossy windings. » IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, N°. 3, march 2009, pp 1863-1866

- [10]: **Tran-Anh. T**, « Modélisation de la propagation des signaux HF dans le réseau d'énergie électrique », Ecole Centrale de Lyon, 2006. Thèse de doctorat

- [11]: **N.Aouchar, C.Bekhaled** « Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur », Projet de fin d'études, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.

- [12]: **M. Belkacem** « Comportement de l'huile de transformateur 'Borak 22' sous tension alternative 50 Hz », Mémoire de Magister, Département du Génie Electrique, Option : Réseaux Electriques et Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Soutenu publiquement le 16/05/2007.

- [14]: **SONELGAZ** Doctrine de maintenance du réseau de transport, Cahier N°2 :« Les transformateurs de puissance », GRTE, Région de transport de l'électricité d'Alger 08-09-2008.

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

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

- [17]: **PAUWELS** «Formation générale au transformateurs », Mars 2009.

- [18]: **OMICRON electronics** « FRAnalyzer Manuel d'utilisation »Référence -VESD0662 Version du manuel : FRA.FR.1, 2006.

- [19]: **Megger** « FRAX 101 Analyseur de réponse de la fréquence de balayage », FRAX101_DS_fr_V01.

Bibliographie

- [20]: **MUFIDZADA N.A, OTMANE-CHRF**, <<Etude de l’Influence du Noyau sur les Surtensions Impulsionnelles dans les Enroulements du Transformateur>> , N°1 page 23, 2009
- [21]: **MUFIDZADA N.A** <<précision de calcul des surtensions dans les enroulements d’un transformateur >> N° 2, page 50,2003.
- [22]: **Didier FULCHIRON** , Cahier Technique Schneider n°192 édition avril 1998, NF C 52-726 : Transformateurs de puissance de type sec.
- [23]: Tenue des transformateurs en cas de défauts internes, Raux / Leconte / Gibert, CIREN 89.
- [24]: Les schémas de liaison à la terre en haute tension (régimes de neutre), Cahier Technique n°172, B. Lacroix et R.Calvas
- [25]: Protection contre les défauts dans les transformateurs de distribution HT/BT, Bruggemann / Daalder / Heinemeyer / Blower,CIREN 91.