

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULoud MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique

OPTION : Réseaux Electriques

THEME:

**LOCALISATION DE DEFAUTS DANS UN TRANSFORMATEUR
DE PUISSANCES**

Encadré par :

Mr. OTMANE CHRIF .T

Mr.HOUASSINE HAMZA

Réalisé par :

Mr. ZAIDI RAMDANE

Mr. HADDADI ABD EL KADER

Promotion:

2010 - 2011

REMERCIEMENTS

Louange à notre seigneur " ALLAH " qui nous a doté de la merveilleuse faculté de raisonnement. Et qui a incité à acquérir le savoir. C'est à lui que nous adressons toute notre gratitude en premier lieu. En second lieu, nous voudrions adresser nos vifs remerciements et considérations à nos parents et puis à nos enseignants qui ont contribué à notre formation. Nous tenons à remercier notre encadreur **Mr. OTMANE CHRIF** et en particulier **Mr.HOUASSINE HAMZA** qui ont toujours été disponibles malgré leurs nombreuses occupations, et dont les encouragements et les conseils judicieux nous ont été d'une très grande utilité.

Nos vifs remerciements vont aux différents membres de jury.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin afin de réaliser ce modeste travail.

Dédicace :

Je dédie ce travail :

A ma chère mère et mon cher père pour l'éducation et le grand amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance. Et pour leurs patiences et leurs sacrifices.

A mes chers oncle, tante et grands-parents

A mes chers frères

A mes chères sœurs

A la mémoire de mon cher frère Yacine

A tous ceux qui me sont chers

A Mr : HOUASSINE HAMZA pour sa précieuse contribution

A Mr : OTHMANE CHRIF pour sa disponibilité

A mon cher binôme RAMDANE qui a contribué à
la réalisation de ce modeste travail.

HADDADI ABD EL KADER

Dédicace :

Je dédie ce travail :

A ma chère mère et mon cher père pour l'éducation et le grand amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance. Et pour leurs patiences et leurs sacrifices.

A mes chers frères

A mes chères sœurs

A mes neveux

A mes nièces

A tous ceux qui me sont chers

A Mr : HOUASSINE HAMZA pour sa précieuse contribution

A Mr : OTHMANE CHRIF pour sa disponibilité

A mon cher binôme ABD EL KADER qui a
Contribué à la réalisation de ce modeste travail.

ZAIDI RAMDANE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES TRANSFORMATEURS	
I/1. Introduction	3
I/ 2. Le rôle d'un transformateur.....	5
I/3. Principe de fonctionnement	5
I/4. Description d'un transformateur	7
a- Le circuit magnétique	7
b- Les enroulements	7
I/5. Les différents types de transformateurs	8
I/5.1. Autotransformateur	8
I/5.2. Transformateur variable.....	9
I/5.3. Transformateur d'isolement.....	10
I/5.4. Transformateur d'impédance.....	10
I/5.5. Transformateur de mesure.....	12
a- Transformateur d'intensité.....	12
b- Transformateur de tension.....	12
I/6. Transformateur haute fréquence.....	13
I/6.1. Circuit magnétique des transformateurs HF.....	13
I/6.2. Transformateur d'impulsions.....	13
I/7. Transformateur triphasé.....	13
I/8. Les transformateurs (hautes tensions).....	14
I/8.1. Transformateur à colonnes.....	14

SOMMAIRE

a- Les bobinages.....	15
b- Le circuit magnétique.....	16
c- Le couplage.....	17
d- Limitations des transformateurs à colonnes.....	18
I/8.2. Transformateur cuirassé.....	18
a- Les bobinages.....	19
b- La cuve.....	19
b- Les écrans électrostatiques.....	20
I/8.3. Transformateur en « double T ».....	21
a- Les bobinages.....	21
b- Le circuit magnétique.....	22
I/8.4. Autres transformateurs.....	22
I/9. L'isolation dans les transformateurs de puissances.....	23
I/9.1.Isolation cellulosique.....	23
I/9.2. Isolation liquide.....	23
I/10. Pertes dans les transformateurs.....	24
I/10.1. Les pertes par effet joule.....	24
I/10.2. Les pertes magnétiques.....	24
I/10.3. Mesure des pertes.....	24
I/11. Conclusion.....	25

CHAPITRE II : LA FRA ET LES TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC

II/1. Introduction	26
II/2. Les techniques de diagnostic.....	26
II/2.1. Analyse d'huile	26

SOMMAIRE

II/2.2. Les analyses physico-chimiques.....	27
II/2.3. Analyse des furanes	29
II/2.4. Analyse des gaz dissous dans l'huile	30
a- Formation de gaz dissous dans l'huile lors de défaut	30
b- Méthodes d'interprétation des résultats	31
II/2.5. Mesures diélectriques	39
a- Mesure du facteur de puissances et de la capacité	39
b- Mesure de résistance d'isolement en courant continu	41
II/2.6. Mesures électriques	43
a- Mesure du courant d'excitation.....	43
b- Mesure du rapport de transformation.....	44
c- Mesure de la résistance d'enroulement.....	44
d- Mesure de la réactance de fuite.....	45
II/3. Analyse de la réponse en fréquence (FRA).....	45
II/3.1. Principe de la méthode.....	46
II/3.2. Objectifs des mesures par FRA.....	46
II/3.3. Quand faut-il faire un test FRA ?.....	47
II/3.4. Types d'essais par FRA.....	48
a- Essais entre extrémités.....	48
b- Essais en court circuit.....	48
c- Essai capacitif entre enroulements.....	49
d- Essai inductif entre enroulements.....	50
II/3.5. L'équipement de mesure.....	50
a- Le FR Analyser.....	50

SOMMAIRE

b- Connecteurs et commandes.....	51
c- Câbles pour les essais.....	52
II/3.6. Procédure d'essais.....	53
a- Consignation du transformateur.....	53
b- Mise en service du FR Analyzer.....	54
c- Paramétrage des mesures grâce au logiciel FR Analyzer.....	55
d- Raccordement du FR Analyzer à un transformateur de puissances.....	55
II/3.7. Méthodes d'interprétation.....	57
a- Interprétation méthodologique.....	57
b- Domaine de fréquences pour les interprétations.....	57
II/4. Conclusion.....	58
 CHAPITRE III : MODELISATION DES TRANSFORMATEURS	
III/ 1. Introduction.....	59
III/ 2.Principaux modèles des transformateurs de puissance.....	59
III/ 2.1 Modèle à 50 Hz.....	59
III/ 2.2 Généralité sur le modèle haute fréquence (HF).....	61
a- Modèle détaillé.....	61
b- Modèle entrée-sortie.....	62
III/ 2.3 Modèle HF dans la littérature (haute fréquence).....	62
a- Modèle de Morched [18].....	62
b- Modèle de Leon	64

SOMMAIRE

c- Modèle de Chimklai [20].....	66
d- Modèle de Gustavsen [6].....	67
e- Modèle d'Andrieu [5].....	68
f- Modèle de Noda	69
III/ 3.Modèle adopté.....	70
III/ 4.Conclusion.....	71

CHAPITRE IV : LOCALISATION DES DEFAUTS

IV/ 1.Introduction.....	72
IV/ 2.Modèle adopté pour l'enroulement de transformateur.....	72
IV/ 3.Equations du schéma équivalent adopté.....	73
IV/ 3.1.Equations des tensions.....	73
IV/ 3.2 Equations des courants	74
IV/ 3.3 Représentation matricielle des équations du modèle.....	75
IV/ 4.Caractéristiques électriques et géométriques du transformateur étudié.....	76
IV/ 5.Synthétisation du circuit de référence.....	77
IV/ 6.Calcul des paramètres du modèle adopté	78
IV/ 6.1. Détermination des paramètres du schéma équivalent.....	78
IV/ 7. Exploitation du modèle en vue d'une étude de diagnostic	82
IV/ 8. Localisation des défauts le long de l'enroulement	84
IV/ 8.1 les différents défauts étudiés.....	84
IV/ 8.2 études de la réponse fréquentielle de l'impédance	84

SOMMAIRE

IV.8.2.1 Défauts entre spires.....	84
a- Court circuit entre les spires.....	84
b- Ouverture de spires.....	88
c- Comparaison entre le court circuit et ouverture de spires.....	91
IV/ 8.2.2 Déformations propres de l'enroulement.....	92
IV/ 9. Conclusion.....	95
CONCLUSION GENERALE.....	96
BIBLIOGRAPHIE.....	98
ANNEXE.....	102

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Les transformateurs sont des machines électriques statiques dont la fonction est d'élever ou d'abaisser les valeurs de la tension et de l'intensité d'entrée. Depuis leur apparition; leur utilisation a pris de l'importance, surtout au niveau industriel, où ils sont imposés comme un élément majeur, au point où ils sont diversifiés, tel qu'on trouve plusieurs types de transformateurs selon l'utilisation.

Les transformateurs comme tous les appareils électriques peuvent présenter des défaillances à cause de certains facteurs intérieurs et extérieurs.

Par conséquent, nous essayant de présenter la capacité de réduire la possibilité de présence d'une défaillance ou une dégradation au rendement et l'assurance d'une longue vie du transformateur et cela en utilisant les techniques de diagnostic.

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

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.

Les signaux mesurables tels que les courants, les tensions, les vibrations ou bien encore la température peuvent fournir des informations significatives sur les défauts et ainsi servir à déterminer un ensemble de paramètres représentant les signatures de défauts du transformateur.

A partir de ces paramètres, la mise en place de méthodes convenables peut permettre de concevoir des systèmes de diagnostic performants.

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.

L'objectif de ce travail est de localiser les différents défauts dans les transformateurs de puissance. Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités de fonctionnement et de constitution du transformateur de puissance.

La FRA et les techniques de diagnostic des défauts dans les transformateurs ont été traités dans le second chapitre.

Le troisième chapitre a pour objet de présenter les principaux modèles de transformateurs existant dans la littérature en précisant le modèle qui semble le plus adéquat à la problématique posée.

Quant au dernier chapitre de notre étude, il est consacré à la localisation des défauts dans les enroulements du transformateur ainsi que la validation du modèle adopté et son exploitation pour une étude de diagnostic.

En réalisant plusieurs défauts sur l'enroulement du transformateur, en utilisant le logiciel p-spice les résultats obtenus sont enfin discutés en fin de chapitre.

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

I/ 1. Introduction

Les transformateurs sont des machines électriques statiques dont la fonction est d'élever ou d'abaisser les valeurs de la tension et de l'intensité d'entrée. Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique à distance, en transformant les valeurs de la tension et l'intensité auxquelles, est abordable techniquement et économiquement le transport depuis les centres de production aux centres de consommation. Comme premier chapitre, nous avons fait une description générale sur les transformateurs citant les différents composants et puis nous avons distingué et défini les types de cette machine.

On distingue les transformateurs statiques et les commutatrices. Dans un transformateur statique, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits. Dans une commutatrice, l'énergie est transmise de manière mécanique entre une génératrice et un moteur électrique.

- **Invention**

Les principes du transformateur ont été établis en 1831 par Michael Faraday, mais celui-ci ne s'en servit que pour démontrer le principe de l'induction électromagnétique et n'en prévint les applications pratiques.

Lucien Gaulard , jeune électricien français, présente à la Société française des électriciens, en 1884, un « générateur secondaire », dénommé depuis transformateur.

En 1883, Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs réussissent à transmettre pour la première fois, sur une distance de 40 km, du courant alternatif sous une tension de 2 000 volts à l'aide de transformateurs avec un noyau en forme de barres.



Fig.(I.1): Transformateur (Déry-Bláthy-Zipernovskí, Budapest 1885.)

En 1884, Lucien Gaulard met en service une liaison bouclée de démonstration (133 Hz) alimentée par du courant alternatif sous 2 000 volts et allant de Turin à Lanzo et retour (80 km). On finit alors par admettre l'intérêt du transformateur qui permet d'élever la tension délivrée par un alternateur et facilite ainsi le transport de l'énergie électrique par des lignes à haute tension. La reconnaissance de Gaulard interviendra trop tardivement.

Entre-temps, des brevets ont été pris aussi par d'autres. Le premier brevet de Gaulard en 1882 n'a même pas été délivré en son temps, sous prétexte que l'inventeur prétendait pouvoir faire « quelque chose de rien » ! Gaulard attaque, perd ses procès, est ruiné, et finit ses jours dans un asile d'aliénés. Le transformateur de Gaulard de 1886 n'a pas grand-chose à envier aux transformateurs actuels, son circuit magnétique fermé (le prototype de 1884 comportait un circuit magnétique ouvert, d'où un bien médiocre rendement) est constitué d'une multitude de fils de fer annonçant le circuit feuilleté à tôles isolées.

Ainsi, en 1885, les Hongrois Károly Zipernowsky, Miksa Déry et Otto Titus Bláthy mettent au point un transformateur avec un noyau annulaire commercialisé dans le monde entier par la firme Ganz à Budapest. Aux États-Unis, W. Stanley développe des transformateurs.

- **Constitution**

Il est constitué de deux parties essentielles, le circuit magnétique et les enroulements.

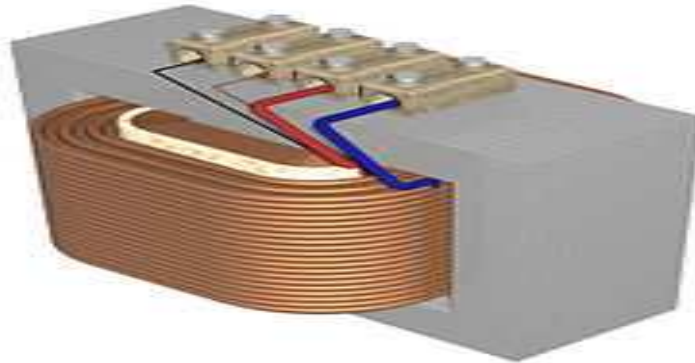


Fig. (I.2) : Exemple de constitution d'un transformateur

I/ 2. Le rôle d'un transformateur

Un transformateur électrique est un convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative en un système de tension et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme. Il est constitué d'un noyau ferromagnétique, sur lequel sont bobinés deux enroulements. L'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique. [1]

I/ 3. Principe de fonctionnement

- **Transformateur parfait ou idéal**

On appelle transformateur idéal un transformateur virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels. Ces derniers sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances. Dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux magnétique sont négligées, le rapport du nombre de spires primaires (N_1) au

nombre de spires secondaires (N_2) détermine totalement le rapport de transformation du transformateur. [1] :

$$U_1/U_2 = N_1/N_2 \quad (I.1)$$

Avec U_1 la différence de potentiel aux bornes du primaire, et U_2 la différence de potentiel aux bornes du secondaire. Les pertes étant négligées, la puissance est transmise intégralement. Si on note I_1 le courant du primaire et I_2 le courant du secondaire, on a :

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (I.2) \text{ et:}$$

$$U_1/U_2 = I_2/I_1 \quad (I.3)$$

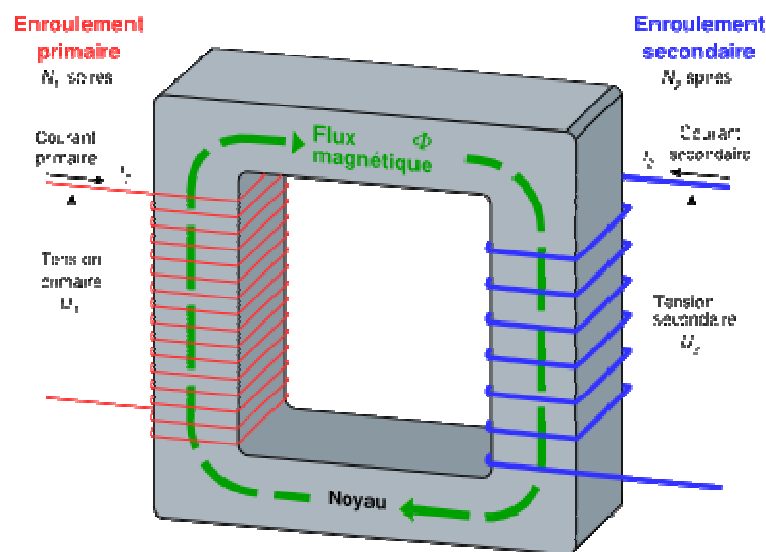


Fig. (I.3) : Flux magnétique entre les enroulements

I/ 4. Description d'un transformateur

Dans le cas d'un transformateur monophasé, le circuit magnétique, formé de tôles magnétiques empilées, porte deux enroulements conducteurs en cuivre. [1]

a- Le circuit magnétique :

Il est composé essentiellement de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, contenant 3% de silicium. Le circuit magnétique est formé de deux parties dans le but de faciliter la mise en place lors de la construction : le noyau et les culasses. Le noyau, de section carrée ou circulaire suivant le type de transformateur et la forme adoptée pour les bobines, est constitué de tôles mises en paquets de cinq à dix millimètres d'épaisseur. Des canaux de refroidissement à l'intérieur des noyaux sont prévus sur les gros transformateurs. Les culasses sont situées au-dessus et en-dessous des noyaux et permettent de fermer le circuit magnétique. Elles sont imbriquées dans les tôles magnétiques du noyau. [2]

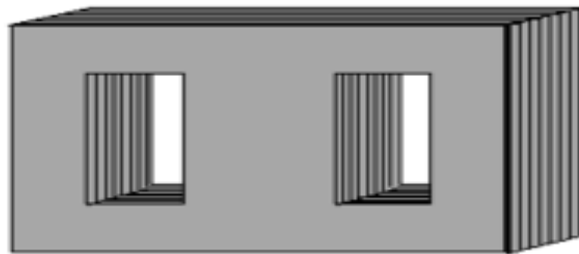


Fig.(I.4) :Schéma de la carcasse d'un transformateur monophasé

bas de gamme.

b- Les enroulements

Les enroulements sont en général concentriques pour minimiser les fuites de flux.

Le conducteur électrique utilisé dépend des applications, mais le cuivre est le matériau de choix pour toutes les applications à fortes puissances. Les fils électriques de chaque tour doivent être isolés les uns des autres afin que le courant circule dans chaque tour. Les fils

conducteurs sont isolés entre eux par du papier Kraft, dénommé papier d'enrubannage ou de guipage. Pour des petites puissances, il suffit d'utiliser des conducteurs amagnétiques émaillés pour assurer cette isolation ; dans les applications à plus fortes puissances mais surtout à cause d'une tension d'utilisation élevée on entoure les conducteurs de papier diélectrique imprégné d'huile minérale. Pour des fréquences moyennes et hautes on utilise des conducteurs multibrins pour limiter l'effet de peau ainsi que les pertes par courants de Foucault, tandis que pour les fortes puissances on cherche à minimiser ces pertes induites dans les conducteurs par l'emploi de fils méplats de faible épaisseur voir de véritables bandes de cuivre ou d'aluminium.

Les enroulements du primaire et du secondaire sont rassemblés autour du même noyau pour limiter les fuites magnétiques. Chaque enroulement du primaire doit être correctement isolé des enroulements du secondaire. De ce fait, des écrans protecteurs (généralement en carton) sont disposés entre les enroulements.

I/ 5. Les différents types de transformateurs

Ces distinctions sont souvent liées aux très nombreuses applications possibles des transformateurs.

I/ 5.1. Autotransformateur

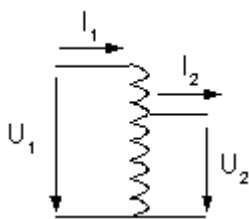


Fig. I.5 : Symbole d'un autotransformateur.

1 indique le primaire ; 2 le secondaire.

Il s'agit d'un transformateur sans isolement entre le primaire et le secondaire.

Dans cette structure, le secondaire est une partie de l'enroulement primaire. Le courant alimentant le transformateur parcourt le primaire en totalité et une dérivation à un point donné de celui-ci détermine la sortie du secondaire. Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie est identique à celui du type isolé.

À puissance égale, un autotransformateur occupe moins de place qu'un transformateur ; cela est dû au fait qu'il n'y a qu'un seul bobinage, et que la partie commune du bobinage unique est parcourue par la somme algébrique des courants primaire et secondaire. L'autotransformateur n'est intéressant que lorsque les tensions d'entrée et de sortie sont du même ordre de grandeur : par exemple, 230V/115V, plus le rapport de la tension d'entrée sur la tension de sortie se rapproche de 1 plus l'autotransformateur sera de faible importance en termes de masse et encombrement. Une de ses principales applications est pour utiliser dans un pays un matériel électronique prévu pour un pays où la tension du secteur est différente (États-Unis, Japon...). Il présente cependant l'inconvénient de ne pas présenter d'isolation galvanique entre le primaire et le secondaire (c'est-à-dire que le primaire et le secondaire sont directement connectés), ce qui peut présenter des risques du point de vue de la sécurité des personnes.

En France, l'autotransformateur est systématiquement utilisé pour le raccordement entre le réseau 225kV et 400kV.

Un type particulier d'autotransformateur triphasé est utilisé pour le démarrage des moteurs asynchrones en permettant de limiter la pointe d'intensité et le couple au démarrage.

De même on utilise un autotransformateur appelé "diviseur de tension" pour créer un neutre artificiel dans un réseau triphasé.

I/ 5.2. Transformateur variable

Il s'agit d'une variété d'autotransformateur, puisqu'il ne comporte qu'un seul bobinage. La dérivation de sortie du secondaire peut se déplacer grâce à un contact glissant sur les spires du primaire.

I/ 5.3. Transformateur d'isolement

Le transformateur d'isolement est uniquement destiné à créer un isolement électrique entre plusieurs circuits pour des raisons bien souvent de sécurité ou de résolution de problèmes techniques. Tous les transformateurs à enroulement primaire isolé du (des) secondaire(s) devraient être considérés comme des transformateurs d'isolement ; toutefois, en pratique, ce nom désigne des transformateurs dont la tension de sortie a la même valeur efficace que celle de l'entrée.

Le transformateur d'isolement comporte deux enroulements presque identiques au primaire et au secondaire :

- le nombre de spires du secondaire est souvent très légèrement supérieur au nombre de spires du primaire afin de compenser la faible chute de tension en fonctionnement,
- en théorie les sections de fil au primaire et au secondaire sont identiques car l'intensité des courants est la même, mais en pratique l'enroulement intérieur (ou près du noyau) sera de section plus importante pour minimiser les pertes Joule car cet enroulement dissipe moins bien les calories, emprisonné qu'il est entre le noyau et l'enroulement extérieur.

Ils sont, par exemple, largement utilisés dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut qui y apparaîtrait n'engendre des dysfonctionnements dans une autre salle.

Un autre intérêt est de pouvoir changer de régime de neutre (cas d'utilisation de matériel informatique et/ou d'équipements électroniques sensibles dans une installation IT).

I/ 5.4. Transformateur d'impédances

Le transformateur est toujours un transformateur d'impédance, mais les électroniciens donnent ce nom aux transformateurs qui ne sont pas utilisés dans des circuits d'alimentation.

Le transformateur d'impédance est principalement destiné à adapter l'impédance de sortie d'un amplificateur à sa charge.

- Ce genre de transformateur était en particulier employé dans la restitution sonore, pour adapter la sortie d'un amplificateur audio à lampes (haute impédance), avec les haut-parleurs destinés à la restitution du son et caractérisés par une impédance basse.
- En électronique audio professionnelle, on utilise toujours des transformateurs pour les entrées et sorties d'appareils haut de gamme, ou bien dans la fabrication de « Di-box » ou boîte de direct. Le transformateur est alors utilisé, non seulement pour adapter l'impédance et le niveau de sortie des appareils (synthétiseurs, basse électrique, etc.) aux entrées micro de la console de mixage mais en outre pour symétriser la sortie des appareils connectés.
- En technique des hautes fréquences, on utilise également des transformateurs dont le circuit magnétique est en ferrite ou sans circuit magnétique (aussi appelé *transformateur sans noyau*) pour adapter les impédances de sortie d'un amplificateur, d'une ligne de transmission et d'une antenne. En effet, pour un transfert optimal de puissance de l'amplificateur vers l'antenne, il faut que le taux d'ondes stationnaires (TOS) soit égal à 1.

De tels montages présentent en outre l'avantage de rendre les appareils connectés beaucoup plus résistants aux perturbations électromagnétiques par une augmentation significative du CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) ou taux de réjection du mode commun.

I/ 5.5. Transformateur de mesure



Fig. (I.6) : Un ancien transformateur électrique dans une usine reconvertie.

Les transformateurs de mesure font l'interface entre le réseau électrique et un appareil de mesure. La puissance disponible au secondaire est définie en fonction des besoins de l'appareil de mesure.

a- Transformateur d'intensité

Ce type de transformateur, appelé aussi transformateur de courant, est dédié à l'adaptation des courants mis en jeu dans des circuits différents mais fonctionnellement interdépendants.

Un tel transformateur autorise la mesure des courants alternatifs élevés. Il possède une spire au primaire, et plusieurs spires secondaires : le rapport de transformation permet l'usage d'un ampèremètre classique pour mesurer l'intensité au secondaire, image de l'intensité au primaire pouvant atteindre plusieurs kilos Ampères (kA).

b-Transformateur de tension

Ce transformateur est l'un des moyens pour mesurer des tensions alternatives élevées. Il s'agit d'un transformateur qui a la particularité d'avoir un rapport de transformation étalonné avec précision, mais prévu pour ne délivrer qu'une très faible charge au secondaire, correspondant à un voltmètre. Le rapport de transformation permet de mesurer des tensions primaires s'exprimant en kilovolts (kV). On le rencontre en HTA et HTB. D'autres technologies existent, comme celle du diviseur capacitif.

I/ 6. Transformateur haute fréquence

I/ 6.1. Circuit magnétique des transformateurs HF

Les pertes par courants de Foucault au sein du circuit magnétique sont directement proportionnelles au carré de la fréquence mais inversement proportionnelles à la résistivité du matériau qui le constitue. Afin de limiter ces pertes, le circuit magnétique des transformateurs HF est réalisé à l'aide de matériaux ferromagnétiques isolants :

- les ferrites douces : oxydes mixtes de fer et de cuivre ou de zinc ;
- les matériaux nanocristallins.

I/ 6.2. Transformateur d'impulsions

Ce type de transformateur est utilisé pour la commande des thyristors, triacs et des transistors. Il présente, par rapport à l'opto-coupleur, les avantages suivants : fonctionnement possible à fréquence élevée, simplification du montage, possibilité de fournir un courant important, bonne tenue en tension

I/ 7. Transformateur triphasé

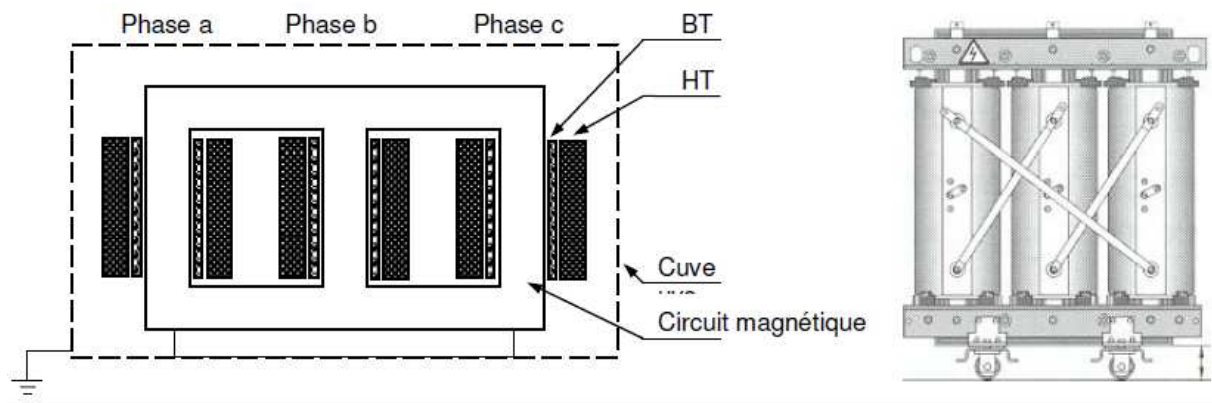


Fig. I.7 : Exemple d'un transformateur triphasé

Dans les réseaux électriques triphasés, on pourrait parfaitement envisager d'utiliser 3 transformateurs, un par phase. Dans la pratique, l'utilisation de transformateurs triphasés (un seul appareil regroupe les 3 phases) est généralisée : cette solution permet la conception de transformateurs bien moins coûteux, avec en particulier des économies au niveau du circuit magnétique. Les transformateurs monophasés ne sont en fait guère utilisés, sauf pour de très grosses puissances apparentes (typiquement supérieures à 500 MVA), où le transport d'un gros transformateur triphasé est problématique et incite à l'utilisation de 3 unités physiquement indépendantes.

I/ 8. Les transformateurs (hautes tensions)

Il existe deux technologies de transformateur utilisées dans la haute tension : la technologie «colonne» et la technologie «cuirassé».

I/ 8.1. Transformateur à colonnes

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Les conducteurs sont de dimensions variables et de topologies multiples, selon les puissances mises en jeux.

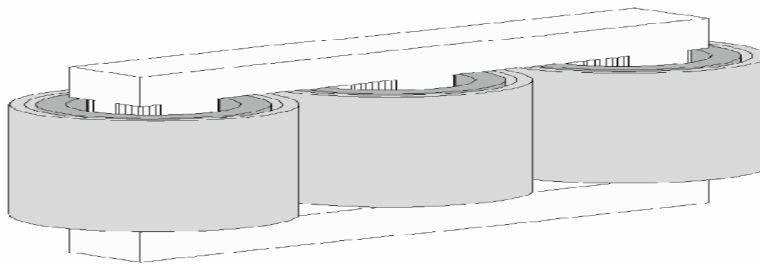


Fig. (I.8) : Transformateur à colonnes à flux forcé. [2]

Le transformateur triphasé ainsi constitué est donc composé de trois paires de bobinages indépendantes et par la suite connectées entre elles selon différents schémas récurrents. Ces couplages permettent notamment l'adaptation des niveaux de courant et de tension aux caractéristiques nominales du transformateur au sein de son réseau. On retrouve ainsi des couplages dits en "étoile", en "triangle", ou en "zig-zig", voire d'autres, dérivés de ceux-ci et permettant la compensation de certains courants harmoniques. [2]

a- Les bobinages

Les enroulements sont conçus par une juxtaposition de couches radiales et successives, composées elles mêmes de multiples spires jointives ou de feuillets. Pour des contraintes électriques et économiques, les couches extérieures et intérieures sont généralement et respectivement associées aux bobinages haute et basse tensions. Les nombres de spires primaire et secondaire sont quant à eux imposés, par les niveaux de tension utilisés, en corrélation avec la valeur d'induction dans le circuit magnétique, la section de celui-ci, la fréquence et le rapport de transformation. Ce dernier est ajustable selon les conditions d'utilisation au moyen d'un jeu de prises de raccordement situées à différentes hauteurs du bobinage primaire [2]. Les conducteurs sont en cuivre ou en aluminium pour les puissances plus importantes. Ces matériaux sont ainsi préférés à d'autres pour leurs bonnes propriétés conductrices, thermiques, massiques et économiques. Ils se présentent sous différents aspects selon la puissance du transformateur. On les retrouve sous la forme de fils massifs, de section circulaire, carrée ou de type méplat, ou encore laminés en fines feuilles.

Pour des gammes de petites puissances, l'emploi de conducteurs filaires et de faibles sections autorise un cintrage plus facile. Les spires s'aménagent alors en sections rectangulaires, agencées le plus proche possible du noyau, afin de minimiser le volume de matériau utilisé. La topologie de la spire rectangulaire n'est pas envisageable sur certains plus gros transformateurs. En effet, le cintrage important engendrerait des diminutions de section, voire des microfissures au niveau de coudes. Des points chauds à ces endroits pourraient alors provoquer une défaillance prématurée des isolants.

Le rayon de courbure des conducteurs est pour ces cas plus grand et conduit à des spires de sections circulaires composant un enroulement essentiellement cylindrique. Dans ces conditions, l'utilisation d'un noyau de type cruciforme limite l'augmentation volumique excessive de matériaux conducteurs.[2] Lorsque la puissance du transformateur augmente, les flux de fuite magnétique ainsi que la section du conducteur suivent la même évolution. Par conséquent, à fréquence nominale, le comportement de l'impédance interne du transformateur devient majoritairement inductif. Un compromis fixe alors le dimensionnement des conducteurs ainsi que l'organisation des bobinages. Ce compromis repose sur une chute de tension acceptable à charge nominale, une limitation du pouvoir de coupure des protections amont, une valeur acceptable du courant d'appel, une densité de courant raisonnable dans les conducteurs, ainsi qu'un refroidissement suffisant des bobinages.[2] Pour les transformateurs de forte puissance, des tirants permettent de contenir les efforts électrodynamiques intervenant lors de surcharges ou de manœuvres d'enclenchement. Des brides similaires associées à des plaques de serrage se retrouvent au niveau du circuit magnétique pour en préserver la tenue mécanique et limiter les forces magnétostrictives. [2]

b- Le circuit magnétique

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques à cristaux orientés, isolées électriquement entre elles, afin de limiter le développement des courants de Foucault. Leur épaisseur de quelques dixièmes de millimètres ainsi que leurs découpes astreignantes conduisent à un assemblage fastidieux dont dépendent les performances du futur noyau. Des joints enchevêtrés et orthogonaux effectuent la liaison entre les colonnes et les culasses sur les transformateurs de petite puissance. Des coupes obliques leurs sont préférées pour des transformateurs plus puissants. L'espace délimité par deux colonnes successives et les culasses est dénommé "fenêtre magnétique" et accueille donc les bobinages. Il existe des circuits à trois colonnes pour un fonctionnement à "flux forcé" ou à cinq colonnes lors d'une utilisation à "flux libre" permettant de réduire la hauteur des culasses pour un volume de fer identique, ce qui facilite notamment le transport.[2]

Les tôles utilisent des matériaux dits de type "doux". Ainsi ils présentent un cycle d'hystérésis peu prononcé, pour réduire les pertes associées. Dans les dernières décennies, de gros progrès ont été réalisés sur les alliages, pour minimiser les pertes massiques globales

malgré des plus grandes valeurs d'induction atteintes. Ainsi l'induction dans le noyau est généralement comprise entre des valeurs de 1.3 à 2 Teslas et le point de fonctionnement se situe alors plus ou moins dans le coude de saturation de la caractéristique d'aimantation du matériau.[2]

c- Le couplage

Le triangle (D), l'étoile (Y), ou le zig-zig (Z), sont les connexions couramment utilisées dans les réseaux électriques. Plusieurs combinaisons distinctes de ces couplages sont disponibles pour les enroulements primaires et secondaires. Les plus courantes pour le continent européen sont les couplages Yy0, Dy11, Yz11, Yd11 où le nombre traduit l'indice horaire, image du déphasage entre les tensions primaires et secondaires. Il en est sensiblement de même pour le continent américain avec des variantes sur les indices horaires utilisés.[2] Le couplage triangle offre l'intérêt de piéger des harmoniques de séquence homopolaire et ainsi d'empêcher leur propagation sur le réseau électrique. De plus, en cas de détérioration d'un des enroulements, le transformateur reste opérationnel. Son fonctionnement, dénommé en "triangle ouvert", ne dispose plus cependant que de 58% de la puissance nominale. Le couplage étoile permet, quant à lui, de disposer d'un conducteur de neutre.[2] Lorsqu'il est utilisé au primaire et sans conducteur de neutre distribué, celui-ci peut créer des problèmes lors de l'alimentation de charges déséquilibrées. Dans ce cas, le point neutre peut se déplacer entraînant alors des surtensions modérées mais prolongées aux bornes des enroulements. Le couplage zig-zag est une combinaison des deux précédents couplages. Il est réalisé grâce à l'utilisation d'enroulements fractionnés, selon un rapport permettant d'ajuster l'indice horaire. Comme le couplage étoile, un neutre est disponible et par rapport au couplage triangle, les courants harmoniques de séquence homopolaire sont ici directement éliminés. A l'instar du couplage en zig-zag, il existe également des transformateurs possédant des enroulements multiples, dont une association judicieuse permet un filtrage des courants harmoniques jusqu'à des rangs élevés.[2]

Certaines de ces connexions sont également mises à contribution lors d'applications industrielles spécifiques telles que des transformateurs de mise à la terre.

Les différents type de couplage exposés précédemment sont également applicables à des transformateurs triphasés cuirassés.[2]

d- Limitations des transformateurs à colonnes

La reluctance du circuit magnétique des transformateurs à colonnes est plus grande que celle d'un type cuirassé et diffère selon la phase considérée. Par conséquence, le nombre de spires et le rapport volumique entre les matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont plus importants. De plus, dans ces transformateurs, l'organisation géométrique employée pour les enroulements provoque un gradient de tension important entre les couches successives. Les sollicitations diélectriques résultantes sont donc importantes et justifie alors l'utilisation d'une topologie d'enroulement différente pour des niveaux de tension importants.[2]

I/ 8.2. Transformateur cuirassé

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement le bobinage, ce qui lui confère un fonctionnement à "flux libre". La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. En contrepartie, le confinement résultant rend plus difficile le refroidissement de l'ensemble. [2]

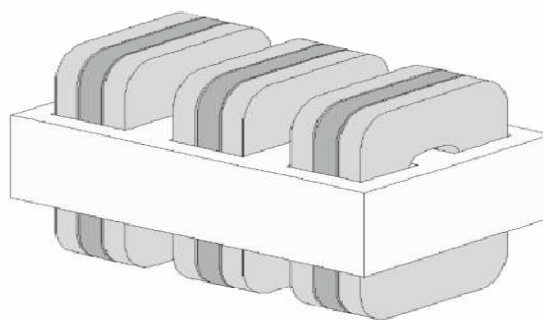


Fig. (I.9) : Transformateur cuirassé. [2]

Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes, voire dévastateurs de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages. [2]

a- Les bobinages

Les enroulements sont répartis en plusieurs sous groupes de bobines. Ces bobines sont appelées "galettes" ou "disques" à cause de leur géométrie en forme de spires concentriques et de faibles hauteurs. Les galettes sont alternées entre la haute et la basse tension afin de diminuer les fuites magnétiques et le gradient de tension. En outre cette topologie offre l'avantage d'engendrer des forces en opposition entre chaque galette lors du court-circuit.

b- La cuve

En plus de son rôle de réservoir au liquide diélectrique, la cuve assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. Elle épouse naturellement le contour de la partie active et minimise ainsi le volume d'huile donc également les coûts et la masse du transformateur. Enfin, à la base de celle-ci des shunts magnétiques permettent de canaliser partiellement les flux de fuites.[2]

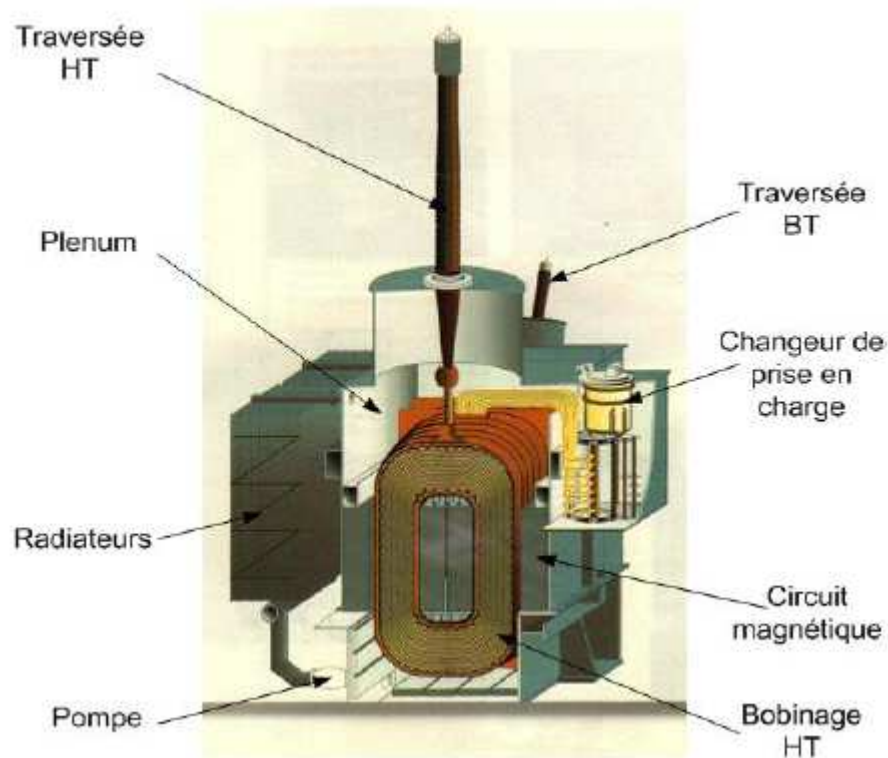


Fig. (I.10) : Constitution du Transformateur cuirassé. [2]

c- Les écrans électrostatiques

Des feuilles métalliques à haute résistivité et de faible épaisseur sont employées pour réduire les contraintes entre les spires. Celles-ci sont insérées entre les feuilles isolantes des bobines haute tension. L'effet capacitif, uniformément distribué de cette manière, permet alors de mieux répartir la tension sur toute la longueur de la bobine lors d'une onde de choc.

Les deux types de transformateurs que nous venons de présenter ne sont néanmoins pas les seuls. Ainsi, sur le continent nord-américain, un autre type de transformateur dénommé en "double T" se rencontre dans les réseaux de distribution basse tension. Celui-ci est triphasé mais présente la particularité de n'utiliser que deux noyaux magnétiques distincts.[2]

I/ 8.3. Transformateur en "double T" Le transformateur en "double T" équivaut à placer en série deux transformateurs utilisant la connexion Scott afin de réaliser une conversion électrique, de triphasée à diphasée et vice versa. Il existe trois types de connexions disponibles selon l'indice horaire souhaité : Tt0, Tt1 et Tt11. [2]

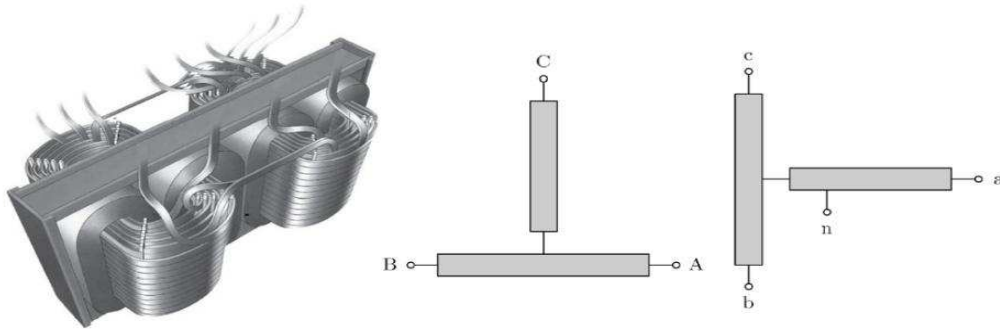


Fig. (I.11) : Transformateur Tt11. [2]

Il est de plus possible de superposer les deux noyaux magnétiques de manière à obtenir un transformateur de type "colonnes" apprécié sous certaines contraintes de pose et d'encombrement.

a- Les bobinages

Les conducteurs utilisés restent semblables à ceux utilisés sur un transformateur à colonnes. Cependant, chacun des bobinages présente une dissymétrie dans l'imbrication des enroulements primaire et secondaire (figure I.3). Ce déséquilibre inhérent à la conception se retrouve donc au niveau de l'échauffement du transformateur, ainsi qu'au niveau de ses impédances internes par phase. L'inégalité est certes faible mais peut engendrer certains désagréments, comme par exemple, un courant de séquence inverse additionnel dans le cas de l'alimentation d'une machine asynchrone, ou encore une différence de la durée d'empiètement

par phase lors de l'alimentation de redresseur. [2] Enfin, contrairement à un transformateur triphasé à colonnes ou cuirassé la puissance nominale ne se répartit pas de manière égale sur chacune des phases. Le transformateur en "double T" doit donc être surdimensionné (7.75%) par rapport à la puissance réelle nominale.

b- Le circuit magnétique

Un autre mode de conception du circuit magnétique que celui par assemblage de tôles prédécoupées est également possible. Ainsi, chacun des deux noyaux est composé d'un empilement de tôles en ruban formant un double anneau ferromagnétique englobant les bobinages.

Les problèmes d'entrefer inhérents au niveau des jonctions de tôles obliques ou orthogonales que l'on retrouve sur un transformateur "classique" sont ainsi supprimés. De plus, le flux parcourt toujours le circuit magnétique dans le sens du laminage pour une perméabilité d'usage maximale. Les pertes à vide sont moindres et donc des coûts d'utilisation réduits. [2]

I/ 8.4. Autres transformateurs

Les différents modes de conception présentés précédemment pour ces trois types de transformateur ne leurs sont pas systématiquement réservés. Il est par exemple possible de rencontrer des transformateurs à colonnes pour lesquels les enroulements sont bobinés en disque, ou encore des circuits magnétiques de transformateurs cuirassés composés de tôles enrubannées. Quelque soit la topologie de transformateur et malgré tous les efforts des différents manufacturiers, les transformateurs demeurent des équipements imparfaits. Ils sont le siège de pertes qui restent acceptables lors d'un fonctionnement en régime linéaire, mais croissent pour des applications modernes générant des distorsions et des non linéarités. [2]

I/ 9. L'isolation dans les transformateurs de puissances

I/ 9.1. Isolation cellulosique

Les matériaux isolants solides appliqués tels que le papier, le papier comprimé, le cylindre isolant et le carton sont faits à partir des matériaux cellulosiques qui constituent le meilleur compromis technico-économique de l'isolation du système imprégné dans les transformateurs de puissance. Dans la plupart des applications industrielles, les isolations cellulosiques sont rarement utilisées en dehors de l'imprégnation avec un autre matériel isolant. Le but principal de l'imprégnation est de protéger l'isolation diélectrique de la cellulose contre les effets diélectriques de l'humidité absorbée et d'augmenter son BIL (Basic Impulse Level). Pour l'utilisation en basse tension comme dans le cas du fonctionnement de certains moteurs électriques et condensateurs, les papiers isolants sont souvent imprégnés avec de la cire et le vernis. Quand ils sont utilisés pour l'équipement à haute tension, ils seront imprégnés avec des isolants liquides tels que les huiles diélectriques. [3]

I/9.2.Isolation-liquide

L'huile de transformateur est souvent une huile minérale qui est faite d'un mélange d'alcane, de naphthènes, et des hydrocarbures aromatiques, raffinés à partir du pétrole brut. Les processus de raffinage pourraient inclure le traitement par l'acide, l'extraction par solvants, l'hydrotraitement, ou la combinaison de ces méthodes lorsqu'elle est parfaitement achevée, peut rapporter les caractéristiques de l'huile minérale aux spécifications exigées. Son rôle fondamental est d'assurer l'isolation diélectrique et le refroidissement du transformateur. Les huiles modernes procurent plus de stabilité à la dégradation, et elles sont dépourvues du soufre corrosif. Au plus, elles devraient avoir les caractéristiques suivantes :

- Point d'inflammabilité élevé.
- Point de congélation bas.
- Rigidité diélectrique élevée.
- Basse viscosité.
- Bonne résistance à l'électrification statique.[4]

I/ 10. Pertes dans les transformateurs**I/ 10.1. Les pertes par effet Joule**

Les pertes par effet Joule dans les enroulements sont appelées pertes cuivre. Elles dépendent de la résistance de ces enroulements et de l'intensité du courant qui les traverse. Avec une bonne approximation, elles sont proportionnelles au carré de l'intensité.[1]

I/ 10.2. Les pertes magnétiques

Les pertes dans le circuit magnétique sont également appelées pertes fer. Elles dépendent de la fréquence et de la tension d'alimentation. A fréquence constante, elles peuvent être considérées comme proportionnelles au carré de la tension d'alimentation. Ces pertes ont deux origines physiques : les pertes par courants de Foucault et les pertes par hystérésis.[1]

I/ 10.3. Mesure des pertes

Il est possible de mesurer les deux types de perte séparément. Les pertes par effet Joule sont mesurées quand le transformateur est soumis à un fort courant et une faible tension (pertes magnétiques faibles). Cela est réalisé par la mise en court-circuit du transformateur (essai en court circuit) avec une alimentation en tension réduite. Les pertes du transformateur sont alors quasiment égales aux pertes Joules. Les pertes magnétiques sont mesurées quand le transformateur est soumis à une tension élevée et un faible courant (pertes par effet Joule faibles). Cela est réalisé quand le transformateur fonctionne à vide (essai à vide), c'est à dire sans récepteur relié au secondaire. Les pertes du transformateur sont alors quasiment égales aux pertes magnétiques.[1]

I/ 11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisés une présentation générale sur les transformateurs utilisés dans les réseaux. Dans les réseaux d'exploitation, les transformateurs de puissance sont soumis a de nombreuses contraintes naturelles lors de leur fonctionnement.une surveillance et une maintenance permanente sont nécessaires pour assurer la fiabilité de leur fonctionnement. Les différentes méthodes de diagnostic des transformateurs ainsi que la technique FRA seront développées dans le second chapitre.

II/ 1. Introduction

L'objectif essentiel de ce chapitre est de mettre en relief les différentes méthodes de diagnostic réalisées sur les transformateurs de puissances, et en particulier la méthode de FRA, étant donné que les transformateurs sont constamment soumis à des contraintes d'origines diverses, leur surveillance permanente est impérative.

II/ 2. Les techniques de diagnostic

L'utilisation des techniques de diagnostic, a une grande utilité car elle permet d'évaluer l'état des composants du transformateur et de programmer des activités préventives ou rectificatives, de manière à faciliter la programmation des travaux et réduire les temps d'indisponibilité. Dans ce cadre, les actions de diagnostic effectuées par SONEGGAZ-GRTE sur les transformateurs de puissances sont :

II/ 2.1. Analyse d'huile

Le fonctionnement dans de bonnes conditions des transformateurs, dépend dans une large mesure de la qualité des huiles minérales isolantes utilisées. Les caractéristiques des huiles se 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 une surveillance et un entretien car sa fonction est d'assurer l'isolation et le refroidissement de celui-ci.

L'huile est un fluide qui pénètre dans toutes 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 [5].

La connaissance de l'état de l'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 régulière de l'état de l'huile [6].

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 ;

II/ 2.2. 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 [7]

➤ 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 [12].

La couleur est une propriété intrinsèque de l'huile neuve, elle a une relation avec les hydrocarbures qui constituent l'huile. Elle permet d'apprécier la qualité des huiles neuves et constitue un moyen efficace pour surveiller l'acidité des huiles en service [12]. 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 nouvelle, jusqu'à un jaune rougeâtre ou rouge foncé pour une huile vieillie [7].

➤ 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].

➤ L'acidité (indice de neutralisation)

Permet de détecter la présence de composés acides produits par l'oxydation de l'huile.

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 moment où elle doit être mise hors service. Elle est due à la présence de produits hydrocarbures acides tels

que les carboxyliques et les hydroxyliques dont la formation est favorisée sous l'effet de la température, de la pression et de l'oxygène. Sa mesure se fait par un titrage acido-basique. Elle est déterminée en mg KOH/g. d'après la norme CEI 296, une bulle d'huile possède une acidité inférieure à 0.03 mg KOH/g. Indice de neutralisation (mg KOH/ g): il permet de détecter la présence de composés acides produits par l'oxydation de l'huile.

➤ **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 [7].

➤ **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 [6].

➤ **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) [12]. Il permet de déterminer précisément l'état physico-chimique dans son rôle premier est de connaître le degré de contamination de 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 [7].

➤ **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 [6].

➤ **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 [6].

II/ 2.3. Analyse des furanes

La dégradation des matériaux cellulotiques constituant l'isolation solide des enroulements du transformateur conduit à la formation des dérivées furaniques ; leurs présence dans les huiles du transformateur est un bon outil de diagnostic de l'état de l'isolation de ce dernier [7].

Les composés furaniques sont générés quand la cellulose est décomposée thermiquement, par conséquent un contenu élevé de composé 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 [6].

Les indices à analyser selon la norme CEI 61198 sont :

- 2 FAL : Furfuraldéhyde le plus significatif
- 5 HMF : 5- Hydroxyméthylfuraldéhyde
- 2 ACF : 2- Furilméthylcétone
- 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 1 ppm, même atteindre 10 ppm.

II/ 2.4. 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) [7].

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 [6].

Les gaz sujet au diagnostic et leur origine sont représentés dans le tableau ci-dessous (Tableau II-1) [6]

Tableau II-1 : Les gaz pour le diagnostic [6]

Type	Gaz	Symbole	Origine
Gaz combustibles	Acétylène	C ₂ H ₂	Il apparaît par défaut électriques (décharges) de haute énergie.
	Ethylène	C ₂ H ₄	Ce gaz se génère par la décomposition thermique de l'huile ou de l'isolement solide.
	Ethane	C ₂ H ₆	Provient 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	Pour vérifier la prise d'échantillon.
	Azote	N ₂	
	Oxygène	O ₂	

b- Méthodes d'interprétation des résultats

L'analyse des gaz dissous dans les huiles des transformateurs est une technique de diagnostic bien connu dans l'industrie et plusieurs critères ont été établis. Les critères communs les plus connues sont ceux de Rogers, Doernenburg, CEI 60599 et triangle de Duval [13].

➤ Méthode de Rogers

Rogers a développé cette méthode dans laquelle trois rapports de gaz sont employés

(C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, C₂H₄/C₂H₆) pour produire des codes basés sur des gammes des rapports comme montré dans le Tableau II-2. La combinaison des codes produits, peut être liée à une interprétation de diagnostic comme montré dans le Tableau II-3 [6].

Tableau II-3 : Codes de Rogers

Rapport de gaz		Type de gaz	Range	Code
A	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	Acétylène/Éthylène	< 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 ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Éthylène/Ethane	< 1	0
			0,1 à 1	0
			1 à 3	1
			> 3	2

Tableau II-3 : Interprétation de Rogers [6]

Case	Type défaut	A	B	C	Problèmes trouvés
0	Sans défaut	0	0	0	Vieillessement normal
1	Décharge partielle de base 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	Egal 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 base énergie, arcs	1-2	0	1-2	Etincellement 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 base 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.
7	Défaut thermique de T entre 300 – 700 °C	0	2	2	Ces problèmes produisent généralement CO et CO ₂ parce qu'ils comportent généralement l'isolation de cellulose
8	Défaut thermique de T > 700 °C				

➤ Méthode de CEI 60599

Le critère CEI 60599 a été employé pour plusieurs définies et une expérience considérable est accumulé 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 II-4).

Tableau II-4 : Interprétation de la CEI60599 [6]

Cas	Défaut typique	C2H2/C2H4	CH4/H2	C2H4/C2H6
DP	Décharges partielles	NS*	$< 0,1$	$< 0,2$
D1	Décharge de basse énergie	> 1	$0,1 \div 0,5$	> 1
D2	Décharge d'haute énergie	$0,6 > \div 2,5$	$0,1 \div 1$	> 2
T1	Faute thermique, $T < 300^{\circ}\text{C}$	NS*	> 1 mais NS*	< 1
T2	Faute thermique $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$	$< 0,1$	> 1	$1 > \div 4$
T3	Faute thermique, $T > 700^{\circ}\text{C}$	$< 0,2^{**}$	> 1	> 4

NS* : non significatif quel que soit la valeur

Le Tableau II-5 ci-dessous donne quelque défaut typique pour une recherche plus approfondie des causes de défauts ou de dégradation dans le transformateur.

Tableau II-5 : Exemples des Défaits typique

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 entre les pièces de serrages, la traversée et la cuve, la haute tension et le tore dans les enroulements, sur la paroi de 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 (forte 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, $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$	Contact défectueux entre connexion boulonnée (particulièrement entre des 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
	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.

➤ Méthode de Doernenburg

Les quatre ratios utilisés dans cette méthode sont représentés dans le Tableau II-6 suivant :

Tableau II-6 : Code pour les ratios de Doernenburg [6]

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/ Ethane	< 1	0
			1 à 3	1
			> 3	2
D	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	Acétylène/ Éthylène	< 0,1	0
			0,1 à 3	2

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

- Défaut thermique
- Décharge partielle
- Décharge par arc

Représentées dans la table d'interprétation suivante (Tableau II-7) :

Tableau II-7 : Interprétation de Doernenburg [6]

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	>2	Décharges de basse énergie ; crépitement continu 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, courant de circulation dans le tonneau métallique, etc.

➤ 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 déterminées dans les tables. Duval a développé une représentation triangulaire pour dépasser ce problème [6].

Elle consiste au calcul de pourcentages de concentrations en (ppm) des trois gaz

(CH₄, C₂H₄, C₂H₂) par rapport au total (CH₄+C₂H₄+C₂H₂).

Ces pourcentages seront tracés dans un triangle divisé en régions indiquant le type de défaut (Fig. II-1).

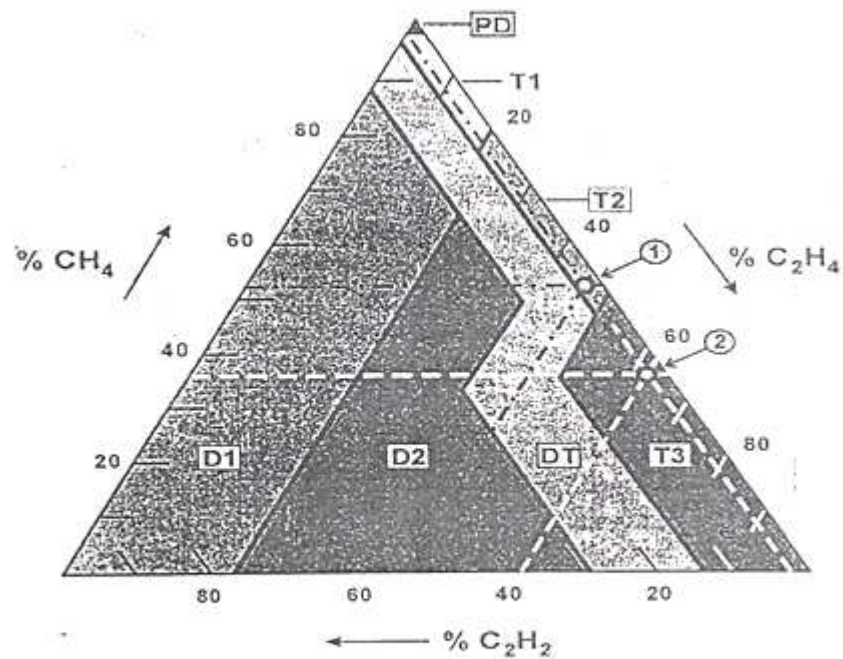


Fig. II-1 : Triangle du Duval [6]

PD : Décharge partielle

D1 : Décharge de baisse énergie

D2 : Décharge de haute énergie

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

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

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

DT : Mélange de fautes thermiques et électriques.

II/ 2.5 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 [7].

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.

a- 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.

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.

• Mesure de facteur de puissance F.P

L'essai du facteur de puissance ou appelé '**tag 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) [7].

• 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. II-2.

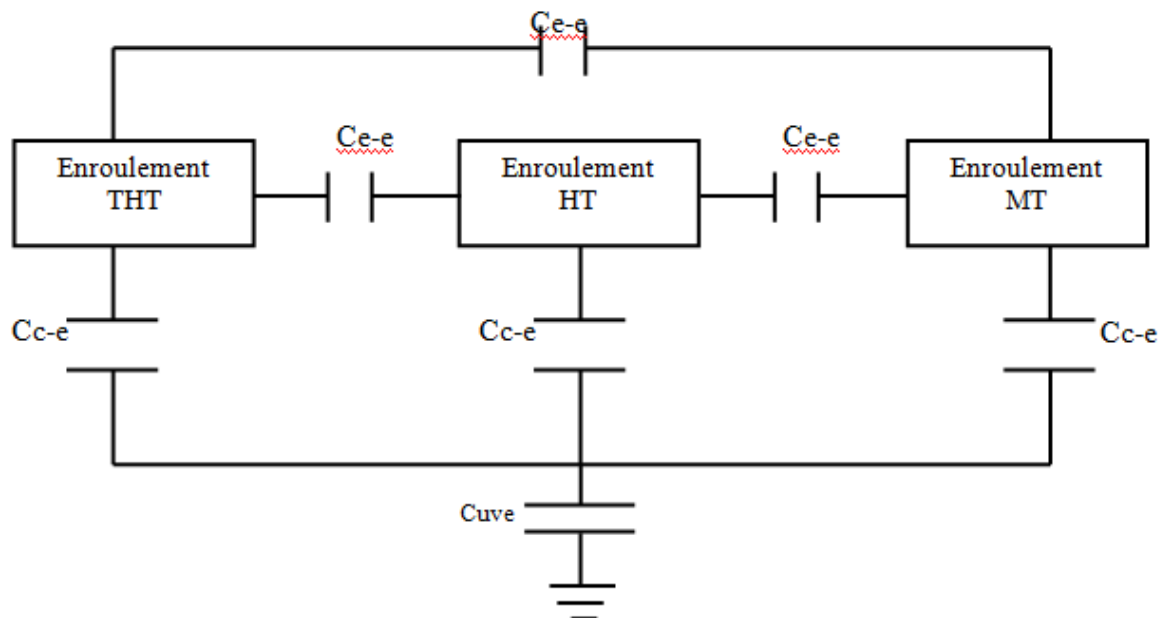


Fig. II-2 Schéma de capacité de d'isolement d'un transformateur à 3 enroulements

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 [7].

• Mesure de 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.

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 isolements 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 Fig. I.5 [7].

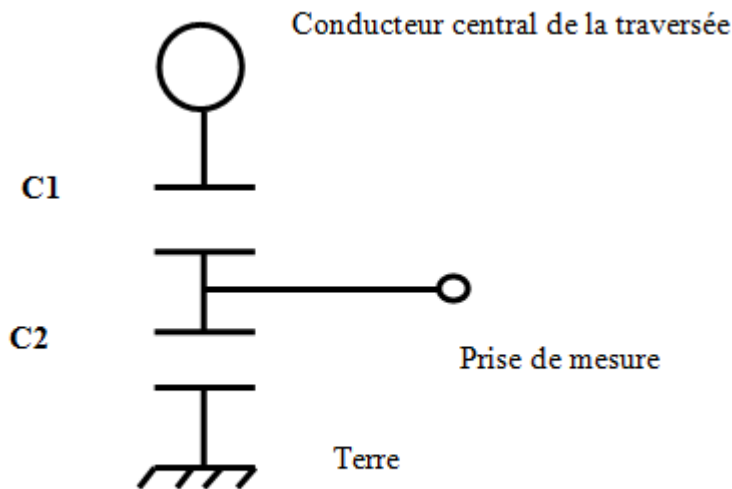


Fig. II-3 Schéma d'une borne de type capacitif

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 [7].

b- 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 :

➤ 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 futures 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 (R_{60}/R_{15}) [6].

➤ 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 [6].

$$R = \frac{R_{10min}}{R_{1min}} \quad (II-1)$$

Les critères d'acceptation pour le PI sont :

Tableau II-8 : Domaine d'interprétation de PI

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

II/ 2.6. Mesures électriques

Les mesures électriques effectuées sur les transformateurs sont:

a- 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 [7].

L'essai du courant d'excitation permet d'évaluer le circuit magnétisé du transformateur [6]

- problème associé au noyau (des tôles coupées, des joints défectueux).
- problème associé au bobines (des spires en court-circuité ou en circuit ouvert, des déficiences dans les dispositifs de commutation du régleur 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 [6].

b- Mesure du rapport de transformation

Il consiste à mesurer les rapports de transformation dans les différentes prises du régleur 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 régleur [7].

Les mesures sont effectuées :

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

La technique d'essai consiste à injecter des tensions alternes dans le bobinage haut tension, en mesurant les tensions résultantes dans les autres [6].

c- Mesure de la résistance d'enroulements

La mesure de la résistance à pour objectif de déterminer l'existante 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 [7].

La résistance corrigée est calculé par l'équation II-2 suivante :

$$R_{COR} = R_m \left(\frac{\theta_F + \theta_{ref}}{\theta_F + \theta_m} \right) \quad (II-2)$$

R_m : Résistance mesurée

θ_F : 235 pour le cuivre et 225 pour l'aluminium

θ_{ref} : Température de référence

θ_m : Température des enroulements

Des valeurs supérieures peuvent indiquer:

- L'existence de court-circuit entre spires.
- Des irrégularités dans les circuits de régulation du transformateur (valeur de la résistance par prise).
- Des connexions défectueuses.
- 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 [6].

d- 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.

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-4) 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 [15].

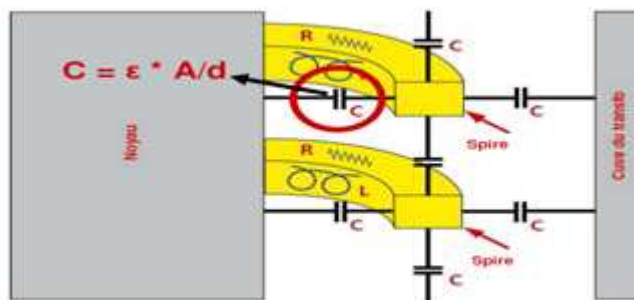


Fig. II-4 Modèle d'un enroulement de transformateur

La capacitance est déterminée en fonction de la distance entre les conducteurs. Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacitances [25].

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 [26].

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

augmente le risque de défaut par diminution de la tenue mécanique des assemblages de l'enroulement [26]. En plus du diagnostic des défauts à la suite de court-circuit, on remarque un intérêt croissant qui porte à la détection avant l'apparition de la panne, au moment des inspections programmées, de défauts liés à des déformations des enroulements, c'est à dire l'évolution de l'état mécanique permettant d'apprécier la fiabilité escomptée des transformateurs, en terme de susceptibilité accrue à des courts circuits futurs .

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

Une autre application des mesures par FRA est le contrôle de l'intégrité mécanique d'un transformateur après transport, fournissant un moyen fiable de confirmer que les assemblages du noyau et des enroulements n'ont subi aucune détérioration malgré les secousses répétée en cours de transport [26].

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 [15] [27].

- Avant et après chaque transport
- Après chaque défaut à forte énergie, soit à l'intérieur du transfo ou traversant (défaut réseau proche)
- Si l'analyse des gaz dissous indique un défaut de haute température (défaut en relation avec le noyau magnétique)
- Après un séisme
- Suite à des 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. Types 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-5) [15].

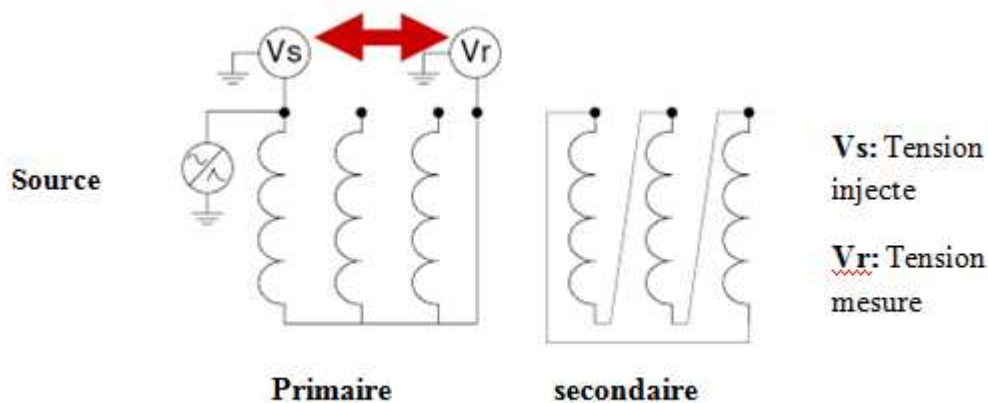


Fig. II-5 Essai entre extrémités

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-6) [15], 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 [26].

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

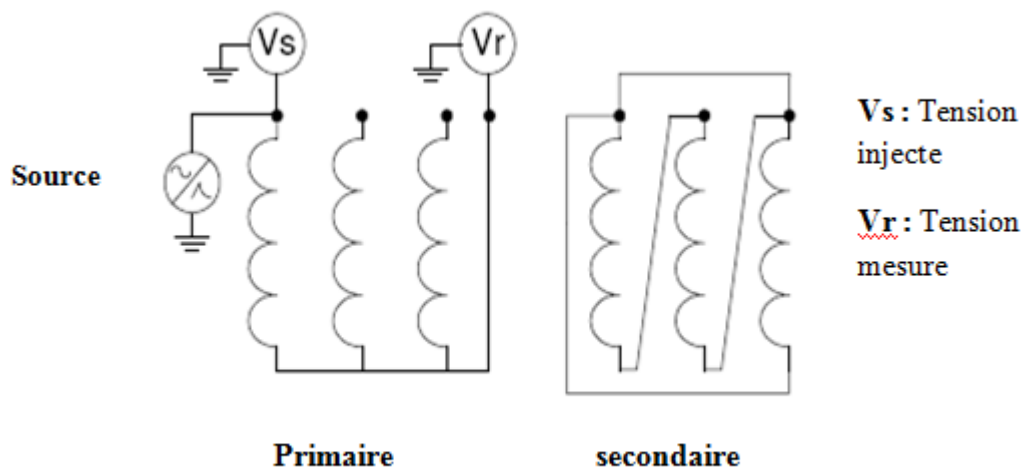


Fig. II-6 Essai en court-circuit

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-7) [15].

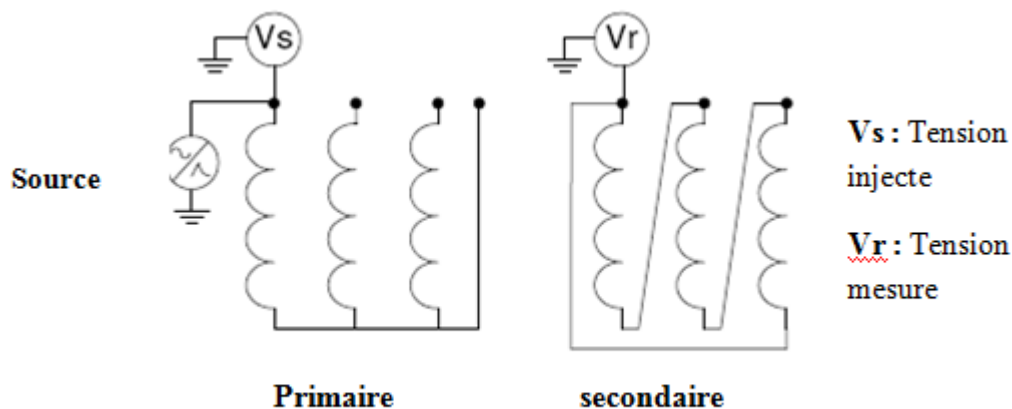


Fig. II-7 Essai capacitif entre enroulements

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-8) [15].

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

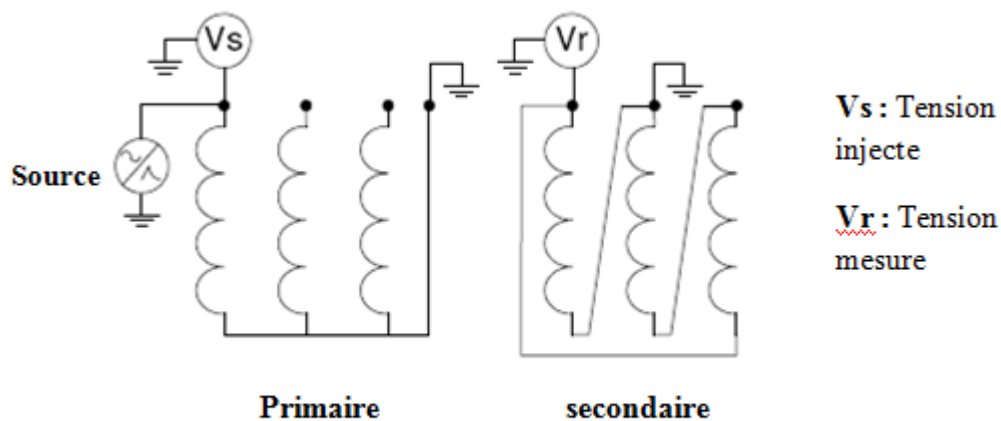


Fig. II-8 Essai inductif entre enroulements

II/ 3.5. 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 FR Analyzer est un analyseur de réponse au balayage en fréquence pour le diagnostic des enroulements de transformateur de puissance. Son concept matériel universel commandé par un logiciel opérant sur un PC fait du FR Analyzer un outil efficace et d'une grande souplesse d'emploi pour le diagnostic des enroulements et des noyaux magnétiques des transformateurs de puissance [19].

Le FR Analyzer mesure la réponse en fréquence des enroulements d'un transformateur sur une large plage de fréquences et compare cette réponse à celle qu'on obtiendrait pour un

enroulement en bon état. Les écarts de la réponse en fréquence permettent de révéler de nombreux types de défauts différents sur les enroulements et les noyaux magnétiques des transformateurs.

L'équipement standard FR Analyzer permet d'effectuer des mesures de la fonction de transfert de tension, par balayage de la fréquence [19].

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 [19].

b- Connecteurs et commandes

Le FR Analyzer présente les connecteurs et les commandes suivants [25] :

En face avant photo. 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)



Photo. II.1 Vue de la face avant du FR Analyzer

En face arrière Photo. II.2:

- Interrupteur d'alimentation
- Entrée d'alimentation en courant continu
- Borne de terre équipotentielle

- Sortie de courant continu 5 V
- Connecteur USB

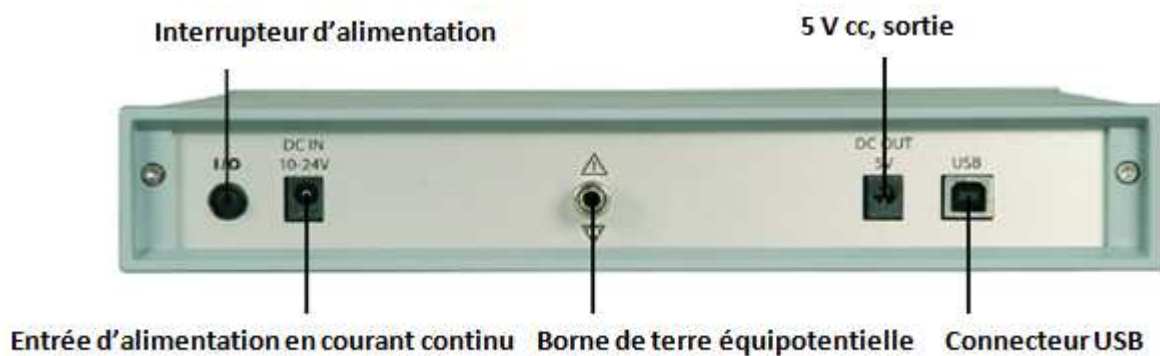


Photo. II.2 Vue de la face arrière du FR Analyzer

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 [26].

Pour diminuer l'inductance, il est recommandé d'avoir des rallonges de câbles aussi courtes que possible (sans faire de boucles) (voir Fig. II-9) et d'utiliser des tresses plates (de 20 mm de large au minimum) au lieu de fils [26].

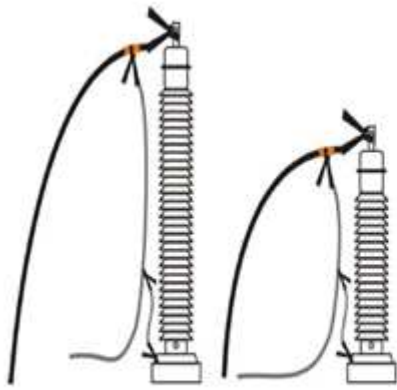


Fig. II-9.a : Bon raccordement à la terre

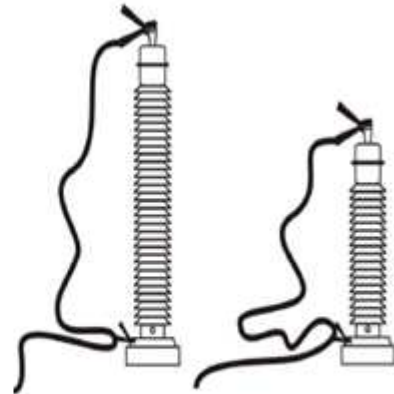


Fig. II-9.b : Mauvais raccordement à la terre

II/ 3.6 Procédure d'essais

L'analyse de la réponse de balayage de la fréquence des enroulements des transformateurs de puissance ne doit être entreprise que par du personnel qualifié et formé à cette tâche. La procédure se déroulera de la façon suivante :

a- Consignation du transformateur

Avant de raccorder un câble de test quelconque au transformateur à tester, observez toujours les règles de sécurité suivantes [19] :

- Le transformateur à examiner doit être déconnecté du réseau électrique associé à toutes les bornes (ligne et neutre), sauf les services auxiliaires pour les changeurs, les pompes, les ventilateurs.
- Le transformateur à examiner devrait être dans son état normal de service, c'est-à-dire entièrement monté et rempli d'huile.
- De préférence le noyau de transformateur devrait être exempt de magnétisme résiduel, car le magnétisme résiduel influe sur les résultats d'essai de FRA à de basses fréquences. Si le magnétisme résiduel est extrême, il sera nécessaire de démagnétiser le noyau avant l'essai de FRA.
- Les essais à courant continu, par exemple mesure de la résistance d'enroulement, peuvent causer le magnétisme résiduel ; par conséquent des essais de FRA devraient être réalisés avant tous les essais à courant continu.
- Ouverture des sectionneurs de barres.

- Condamnation des sectionneurs de barres en position ouverte.
- Vérification d'absence de tension.
- Mise à terre des liaisons (cordes ou câbles).
- Déconnexion des liaisons sur les bornes de traversées.
- Ne touchez aucune borne qui n'est pas visiblement connectée à la terre.
- N'ouvrez pas le boîtier du FR Analyzer.
- Ne réparez pas, ne modifiez pas et n'adaptez pas le FR Analyzer, ou les accessoires.

b- Mise en service du FR Analyzer

La procédure de mise en service du FR Analyzer se déroule comme suit [19] :

- Raccordez respectivement les câbles coaxiaux jaune, rouge et bleu aux connecteurs OUTPUT, REFERENCE et MEASUREMENT du FR Analyzer (Photo. II.3).



Photo. II.3 Connexion des câbles coaxiaux

Raccordez le câble de terre à la borne de terre équipotentielle en face arrière du FR Analyzer, et pincez son autre extrémité à la cuve du transformateur (Photo. II.4).



Photo. II.4 Raccordement à la terre du FR Analyzer

- Mise sous tension du FR Analyzer : Le FR Analyzer est alimenté soit par un adaptateur de courant alternatif soit par le bloc batterie.

c- Paramétrage des mesures grâce au logiciel FR Analyzer

Le paramétrage du FR Analyzer consiste à définir le transformateur ainsi que la mesure. Il permet aussi d'avoir une base de données pouvant contenir toutes les mesures effectuées.

La préparation des mesures doit passer par les étapes suivantes :

- Connexion du FR Analyzer au PC : Grâce au câble USB et au cordon d'alimentation du convertisseur USB optique.
- Démarrage du logiciel FR Analyzer.
- Ajout d'un nouveau transformateur et introduction des données :
 - ✓ Constructeur
 - ✓ Année de fabrication
 - ✓ Puissance nominale
 - ✓ Tension
 - ✓ Couplage
 - ✓ Emplacement physique
 - ✓ Numéro de série
- Ajout d'un nouveau test et introduction des détails du test :
 - ✓ Nom du test
 - ✓ Testeur
 - ✓ Température de l'huile
 - ✓ Date et heure de l'essai
- Ajout de toutes les traces que l'on souhaite enregistrer (Une trace de test est la réponse en fréquence d'un enroulement de transformateur soumis au test).

d- Raccordement du FR Analyzer à un transformateur de puissance

Le raccordement du FR Analyzer au transformateur de puissance à l'essai se fait comme suit [19] :

1. Fixez une pince de mesure sur la borne de référence de traversée du transformateur.

Le choix de la borne de référence se fait comme suit :

- couplage étoile : injection sur la borne neutre **N** à travers les deux câbles (rouge et jaune).
- couplage triangle : injection sur une phase à travers les deux câbles (rouge et jaune).

2. Raccordez les câbles coaxiaux jaune et rouge via un adaptateur BNC livré au connecteur BNC de la pince (Photo. II.5).



Photo. II.5 Raccordement de la pince pour borne de traversée aux câbles coaxiaux jaune et rouge

3. Raccordez les tresses en aluminium à la pince pour borne de traversée à l'aide des vis se trouvant sur la pince et serrez les vis à fond (Photo. II.6).

Si nécessaire, utilisez la gaine isolante livrée pour éviter tout contact électrique entre la tresse en aluminium et le transformateur.



Photo. II.6 Serrage de la pince à visser

4. Raccordez les tresses en aluminium à la cuve de transformateur en utilisant les pinces à vis. Assurez-vous que toutes les pinces et les tresses sont vissé à fond et qu'il existe un contact électrique entre les pinces et la cuve du transformateur. En cas de doute, décapez la couche de vernis à l'aide de la lime livrée.

5. Fixez une autre pince sur la borne de mesure de traversée du transformateur.

6. Raccordez le câble coaxial bleu au connecteur BNC sur la pince pour borne de traversée (photo. II.7)



Photo. II.7 Raccordement de la pince pour borne de traversée au câble coaxial bleu

7. Pour mettre à la terre la pince pour borne de traversée de mesure, répétez les étapes 3 et 4.

II/ 3.7. Méthodes d'interprétation

a- 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 [24].

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 testés séparément

b- Domaine de fréquences pour les interprétations

Le Tableau. II-9 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.

Tableau. II-9 : Domaines typiques d'interprétation de FRA

$f < 2000 \text{ Hz}$	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.

II/ 4. 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 comme un point chaud à haute température, d'évaluer le degré de vieillissement de l'isolation cellulosique et diélectrique et d'analyser son degré de contamination.

Les mesures électriques et diélectriques sont à effectuer d'une manière systématique sur les transformateurs afin de connaître leur état et prévenir leurs avaries.

Dans ce chapitre nous avons présenté en général les différentes techniques de diagnostic et particulièrement la méthode de diagnostic basée sur la FRA. C'est cette technique qui sera adoptée dans notre travail et le modèle du transformateur que nous allons étudier fera l'objet du troisième chapitre.

III/ 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 [19]. 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 les principaux modèles de transformateurs qui existent dans la littérature ainsi que le modèle adopté dans notre étude.

III/ 2.Principaux modèles des transformateurs de puissance

En vue d'étudier les phénomènes physiques dans les transformateurs, nous présentons les principaux modèles de transformateurs qui existent dans la littérature.

III/ 2.1 Modèle à 50 Hz

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

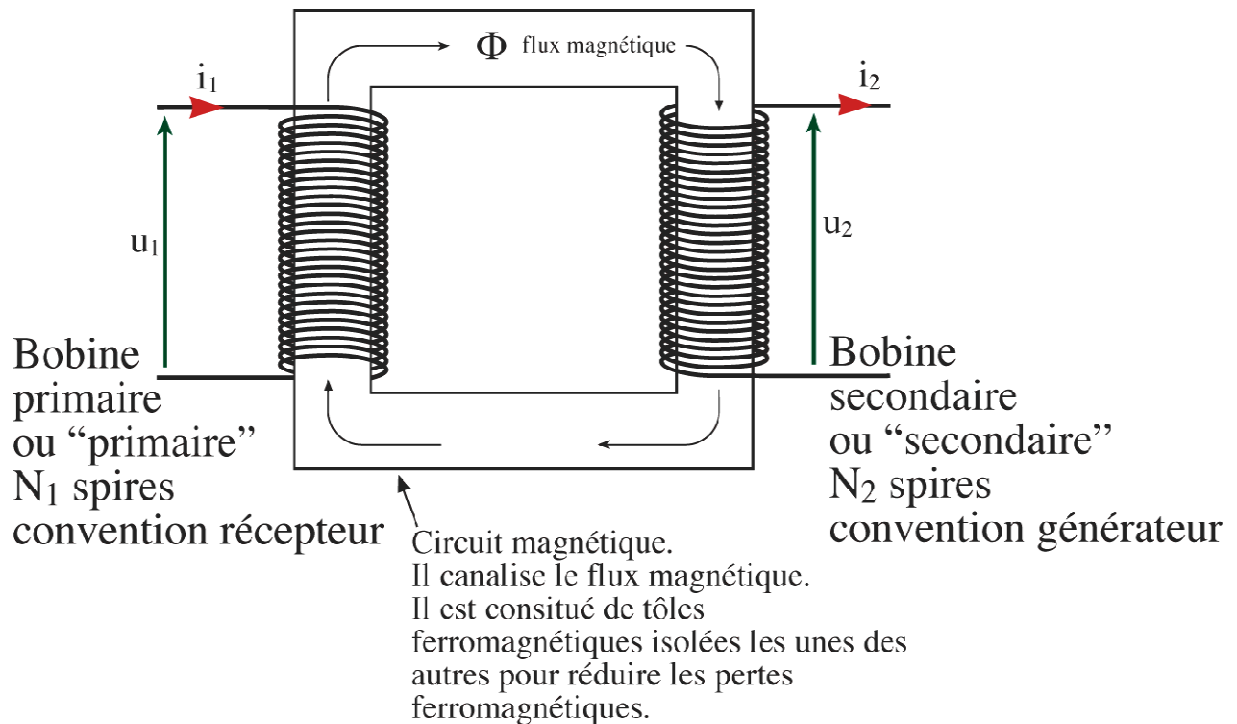


Fig. III.1 : Deux bobines couplées sur un circuit magnétique.

Le modèle élémentaire à 50Hz pour ce type du transformateur est montré dans la figure (III.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 :

- R_1, X_1 : Résistance et inductance de l'enroulement primaire.
- R_2, X_2 : Résistance et inductance de l'enroulement secondaire.
- X_m : Inductance de magnétisation du circuit magnétique.
- R_f : Résistance qui représente des différentes pertes dans le circuit magnétique.

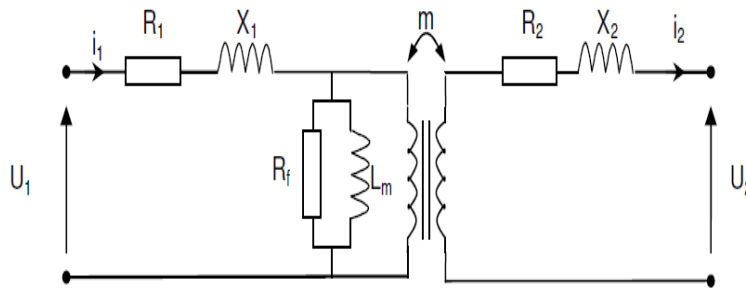


Fig. III.2 : Modèle d'un transformateur monophasé à 50Hz.

III/ 2.2 Généralité sur le modèle haute fréquence (HF)

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

- Effets des courants de Foucault dans le noyau de fer et dans les conducteurs de l'enroulement
- Actions des capacités qui 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 énumérés 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:

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.[20]

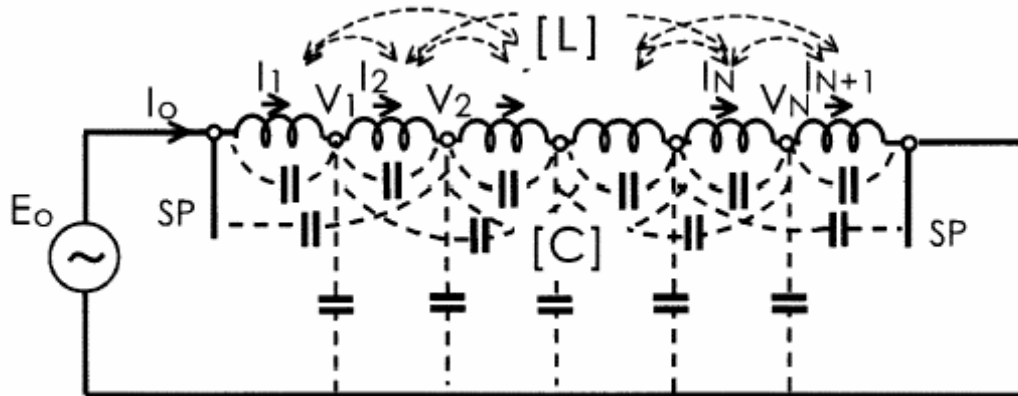


Fig.III.3 : Exemple du circuit équivalent détaillé d'un enroulement.

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. [20]

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.

III/ 2.3 Modèle HF dans la littérature (haute fréquence)

a- Modèle de Morched [18]

Ce modèle est utilisé dans l'EMTP pour modéliser le transformateur en haute fréquence [20]. Supposons un transformateur de 'n' bornes (y compris HT et BT), l'équation

matricielles qui relie les tensions et les courants des bornes est (III-1) ou sous la forme réduite (III-2).

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

$$[Y][V]=[I] \quad (\text{III.2})$$

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

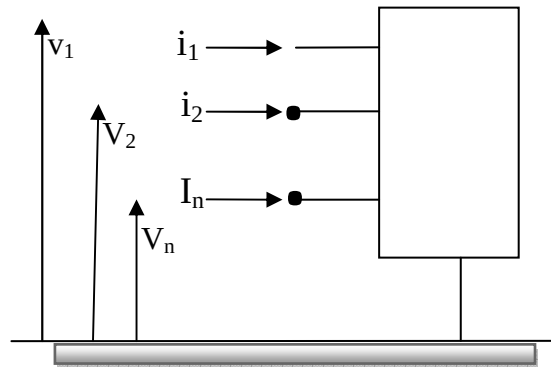


Fig.III.4 : Modèle d'un transformateur considéré comme une boîte noire de n bornes

Dans ce modèle, chaque élément de la matrice des admittances 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. (III.5)

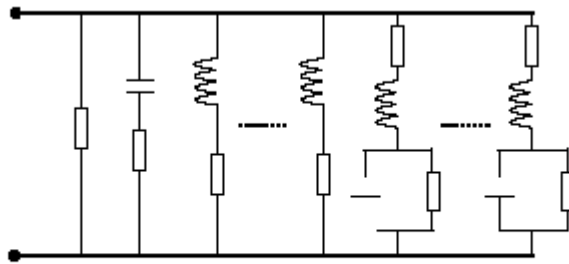


Fig.III.5 : Circuit équivalent pour un élément de la matrice d'inductances.

Ensuite le circuit équivalent sera établi pour pouvoir être introduit dans EMTP. Cependant, pour réduire le calcul, ce modèle a fait une hypothèse simplificatrice en considérant que la 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 lorsqu'elle est réalisée en haute fréquence. L'avantage de ce modèle est qu'il permet de modéliser tous les types de transformateurs à condition d'avoir les valeurs de la matrice admittance.

b- Modèle de Leon

Dans leurs travaux, Leon et Semlyeh [19], ont présenté le développement d'un modèle du transformateur de puissance en haute fréquence. Ce modèle permet de modéliser en détail les enroulements et le noyau. Pour les enroulements, les éléments suivants sont calculés :

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

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

Pour chaque colonne du circuit magnétique du transformateur, un système de trois matrices suscitées est calculé et puis transformé sous forme d'une équation d'état. Ensuite un circuit de Foster en série fig. (III.6) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne.

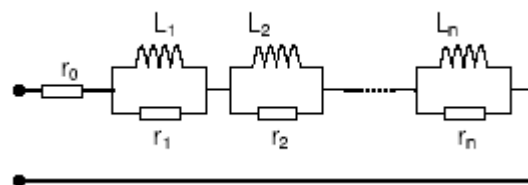


Fig.III.6 : Circuit de Foster en série

Pour le noyau, l'effet des courants de Foucault est modélisé par un circuit de Cauer fig. (III.7)

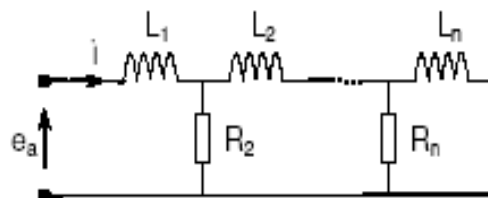


Fig.III.7 : Modèle de Cauer pour le noyau de fer.

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

c- Modèle de Chimklai [20]

Dans ce modèle, les auteurs ont proposé une méthode simple pour modéliser un transformateur de puissance [20]. Ce modèle Fig. (III.8) se base sur le modèle classique (à 50Hz) du transformateur. Ensuite pour modéliser le transformateur en HF, les capacités et les circuits R, L, C, sont synthétisés par les mesures et ajoutés dans le circuit du modèle classique. En effet, chaque circuit rajouté représente un phénomène qui se produit en HF. Les capacités représentent les phénomènes électrostatiques de l'enroulement, les circuits R, L, C, représentent les phénomènes magnétiques dans le noyau de fer..etc. Cette idée est la base pour établir plusieurs modèles qui sont développés par la suite. Cette méthode de modélisation d'un transformateur est à la fois très simple et efficace.

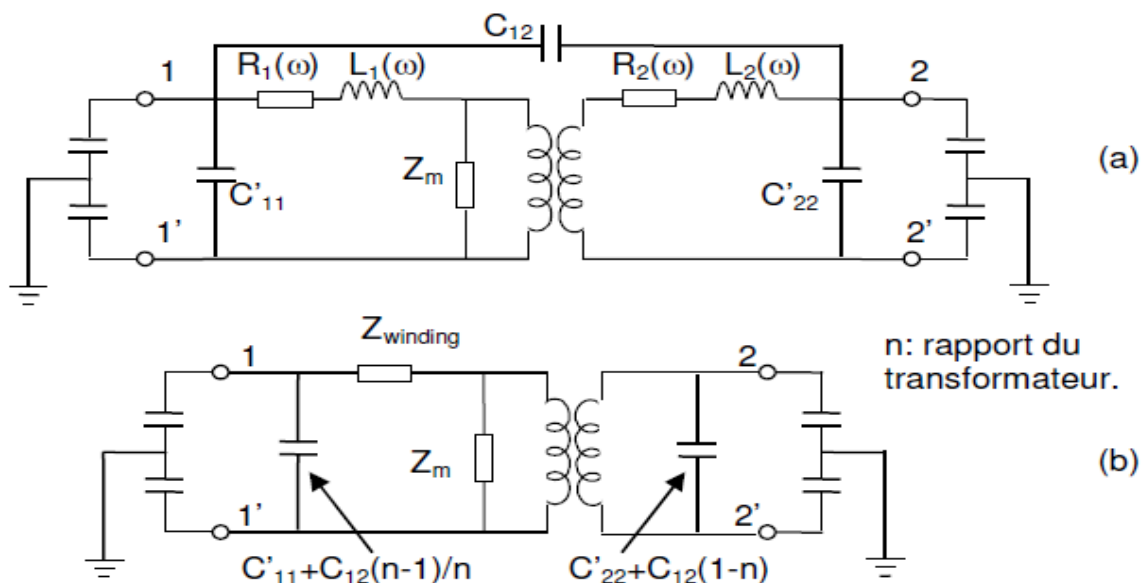


Fig. III.8 : Modèle du transformateur de Chimklai

(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 :

La considération de la dépendance en fréquence de la résistance et de l'inductance de l'enroulement, dite l'impédance de l'enroulement ($Z_{winding}$) comme dans la Fig. (III.9).

Cette impédance est synthétisée par une méthode d'approximation non linéaire pour un circuit R, L, C.

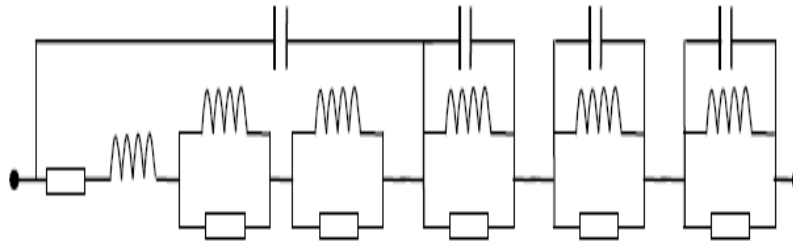


Fig. (III.9) : $Z_{winding}$

➔ Le rajout d'un système de capacités dont les capacités entre enroulements, les capacités entre enroulement et la masse, et celles entre les spires d'un enroulement. Elles sont toutes supposées constantes dans la gamme de fréquence étudiée. Toutes ces capacités sauf la capacité entre les spires d'un enroulement, peuvent être divisées en deux et dont chaque partie est connectée à une extrémité de l'enroulement.

L'étude constitue une bonne base pour développer la modélisation du transformateur. Pourtant, elle présente encore des limites : les phases sont symétriques et la fréquence jusqu'à laquelle le modèle reste valable étant de 100 kHz.

d) Modèle de Gustavsen [6]

Ce modèle suit le principe de celui de Morched, en considérant le transformateur comme une boîte noire [20]. 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.

Les avantages et les inconvénients de ce modèle restent les mêmes que ceux du modèle de Morched, c'est la difficulté des mesures pour obtenir la matrice d'inductance qui est très délicate en haute fréquence.

e) Modèle d'Andrieu [5]

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

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

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.

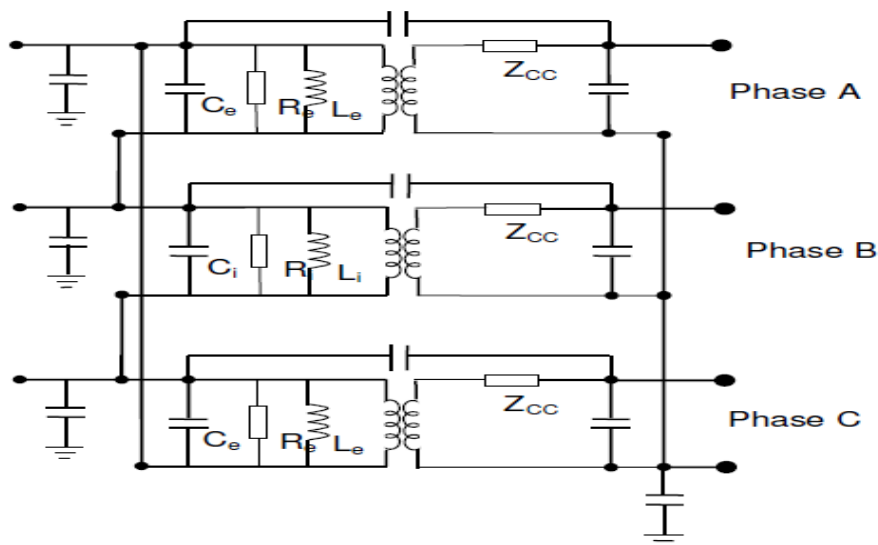


Fig.III.10: Modèle d'Andrieu

Le circuit équivalent de l'impédance Z_{cc} est montré dans la figure (III.11).

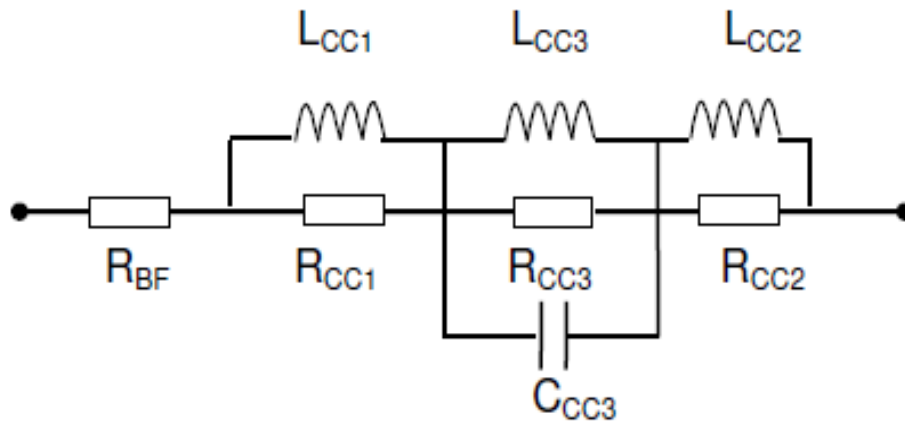


Fig. III.11: ZCC

f) Modèle de Noda

Dans [7], 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:

- Capacités entre les enroulements, et entre les enroulements et la masse (C_{s1} , C_{s2} , C_{sm})
- Effet de peau du conducteur et du noyau de fer (Z_{skin})
- 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 (III.12)

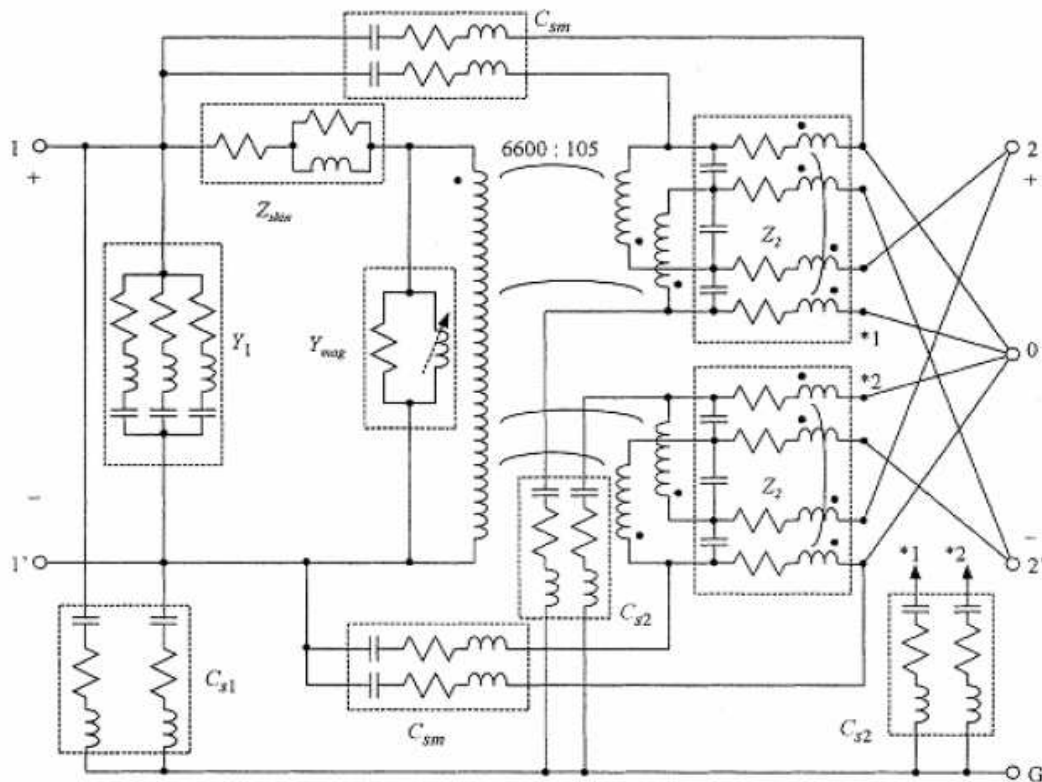


Fig. III.12 : Modèle de Noda

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. [7]

III/ 3.Modèle adopté

Ce type de modèle consiste à représenter le transformateur par un grand réseau composé de résistances, capacités et d'inductances, le calcul de ces paramètres passe par la résolution des équations électromagnétiques complexes et par les informations sur les matériaux et la géométrie détaillée du transformateur.

Dans ce modèle chaque spire est représentée par une maille comprenant une résistance, une inductance, deux capacités longitudinales et une capacité transversale. On tiendra compte aussi des inductances mutuelles existantes entre les spires.

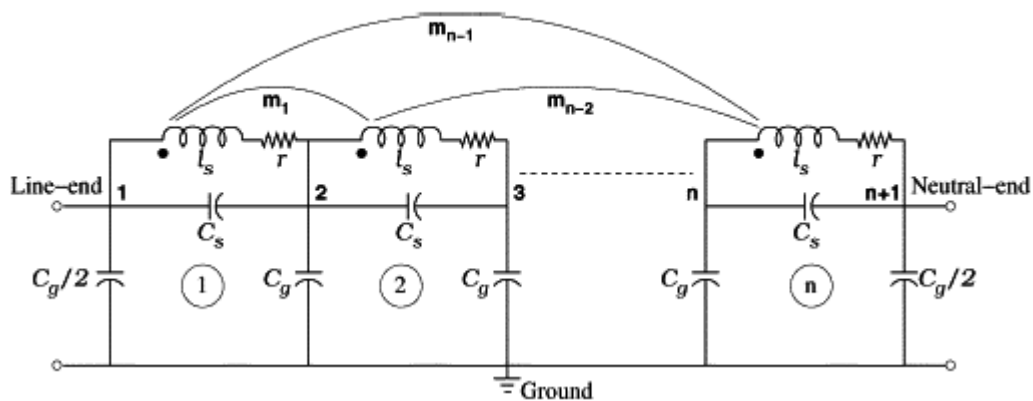


Fig. III.13 : Circuit équivalent d'un transformateur d'enroulement.

C'est ce modèle qui sera adopté dans notre étude de localisation de défauts.

III/ 4.Conclusion

Dans ce qui précède nous avons étalé les différents modèles existants des transformateurs et on a exposé chacun par ses particularités....etc.

Cependant on a choisi le dernier modèle (modèle adopté) car il nous offre plus d'opportunités et de facultés afin de réaliser notre travail avec plus de précision vue sa constitution détaillée et proche d'un circuit équivalent d'un transformateur d'enroulement réel. Un traitement approfondi lui sera accordé dans le chapitre suivant.

IV/ 1.Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le modèle du transformateur de puissance adopté en tenant compte des équations mathématiques du schéma équivalent dit traditionnel du transformateur sans tenir compte du noyau magnétique. Ensuite on présente la procédure de calcul des paramètres des enroulements du transformateur de puissance en vue d'une étude du comportement de ce dernier en régime fréquentiel, afin d'analyser la réponse de l'impédance en fonction de la fréquence, de l'enroulement 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 n'importe quel point de l'enroulement.

IV/ 2.Modèle adopté pour l'enroulement de transformateur

Heller et Veverka [21], ont assimilé le comportement d'un enroulement de transformateur soumis à une onde de choc à celui d'un système de condensateurs et d'inductances. Ces modèles mathématiques utilisent un réseau équivalent de résistances, d'inductances et de capacités. Le coût et la précision des résultats dépendent du degré de raffinement dans la représentation du bobinage et des méthodes numériques de simulation mises en œuvre.

On discrétise l'enroulement par un ensemble fini de spires ou galettes ou par des bobinages que l'on appellera éléments. Chaque élément est représenté par sa résistance et son inductance propre qui est couplée mutuellement avec les autres inductances. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages, et pour chaque élément une capacité par rapport à la masse, comme on l'a montré sur la Fig. VI.1. La Fig. IV.1 représente le schéma équivalent d'enroulements de transformateur.

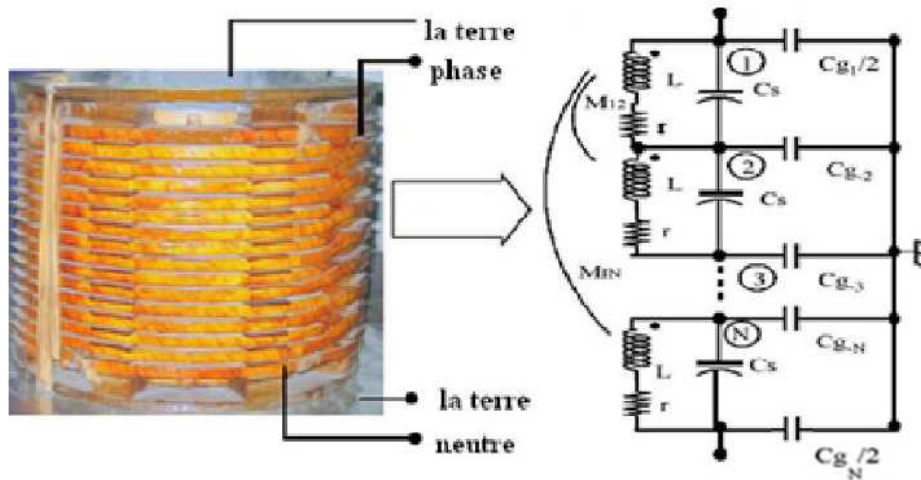


Fig. IV.1 : Schéma équivalent d'un bobinage de transformateur [22].

C_s : capacité série, C_g : capacité shunt, r : résistance, L : l'inductance propre, M_{1N} : mutuelle

Quel que soit le type de représentation, les éléments sont calculés en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage [24].

IV/ 3. Equations du schéma équivalent adopté

L'application des lois de Kirchhoff au circuit représenté sur la figure IV.1 nous permet d'élaborer les équations aux tensions et aux courants des enroulements, ici on donne un exemple d'un enroulement discrétisé en 6 éléments et le raisonnement serait le même pour une discrétisation en n éléments, cependant le choix est limité à 6 puisque après ce nombre la précision de calcul reste sensiblement constante [23].

IV/ 3.1. Equations des tensions

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

$$u_0(t) = U_{Max} \sin \omega t = r_g i_0 \quad (IV.1)$$

Avec

r_g la résistance interne du générateur.

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

$$u_1 - u_2 - r i_1 = l_s \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + M_{14} \frac{di_4}{dt} + M_{15} \frac{di_5}{dt} + M_{16} \frac{di_6}{dt}$$

$$u_2 - u_3 - r i_2 = l_s \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} + M_{24} \frac{di_4}{dt} + M_{25} \frac{di_5}{dt} + M_{26} \frac{di_6}{dt}$$

Généralisation

Pour $1 \leq k \leq 6$:

$$u_k - u_{k+1} - r i_k = l_s \frac{di_k}{dt} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^6 M_{km} \frac{di_m}{dt} \quad (\text{IV.2})$$

IV/ 3.2. Equations des courants

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

$$i_0 = i_1 + i_{c_s} + i_{c_{g/2}} \quad (\text{IV.3})$$

$$i_0 - i_1 = i_{c_s} + i_{c_{g/2}}$$

Avec

$$i_{c_s} = c_s \frac{d(v_0 - v_1)}{dt} \quad (\text{IV.4})$$

$$i_{c_{g/2}} = c_{g/2} \frac{d(v_0)}{dt} \quad (\text{IV.5})$$

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

$$i_0 - i_1 = (c_s + c_{g/2}) \frac{dv_0}{dt} - c_s \frac{dv_1}{dt}$$

Au nœud (2) correspondant à la tension u_2 on a :

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

Généralisation :

Pour $0 \leq k \leq 5$

$$i_k - i_{k+1} = c_s \frac{du_k}{dt} + (2c_s + c_g) \frac{du_{k+1}}{dt} - c_s \frac{du_{k+2}}{dt} \quad (\text{IV.6})$$

IV/ 3.3. Représentation matricielle des équations du modèle

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

$$\int_0^t (u_k - u_{k+1}) dt = \sum_{j=1}^{2n} M_{kj} i_k + R_k \int_0^t i_k \quad (\text{IV.7})$$

$$\int_0^t (i_k - i_{k+1}) dt = c_s U_k + (2c_s + c_g) - c_s U_{k+2} \quad (\text{IV.8})$$

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

$$U = C^{-1} \int_0^t \Delta I dt \quad (\text{IV.9})$$

$$I = M^{-1} \int_0^t (\Delta U - RI) dt \quad (\text{IV.10})$$

Dont

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

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

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

[K] et [L] sont les matrices des capacités et des inductances des enroulements.

$$[K] = \begin{bmatrix} c_s + c_{g1}/2 & -c_s & \dots & 0 \\ -c_s & 2c_s + c_{g2} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 2c_s + c_{gN} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.12})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{1,2} & \dots & M_{1N} \\ M_{1,2} & L_2 & \dots & M_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M_{1,N} & M_{2,N} & \dots & L_N \end{bmatrix} \quad (\text{IV.13})$$

IV/ 4.Caractéristiques électriques et géométriques du transformateur étudié

Dans le cadre de cette étude, on s'est intéressé à un enroulement d'un transformateur étudié par K. Ragavan et L.Satish [24].

L'enroulement étudié comporte 10 disques, chaque disque contient 20 tours de diamètre moyen de 200 mm.

La capacité au sol ($c_{g,eff} = 5.6 \text{ nF}$) a été mesurée par un pont de tension résiduelle à 1kHz alors que la résistance ($R_{dc} = 8 \Omega$) a été mesurée par un multimètre numérique, et l'inductance équivalente mesurée est égale à : $L_{eq} = 6.98 \text{ mH}$.

L'algorithme d'identification conçu par les auteurs a convergé pour un nombre de cellules de discrétisation égale à (06) et une constante de distribution initiale de tension α égale à 7,4833.

IV/ 5.Synthétisation du circuit de référence

Les mesures des inductances propres et mutuelles du circuit de référence [24].sont représentées dans le tableau suivant :

l_s	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
0.4310	0.2392	0.1435	0.0947	0.0612	0.0496

Tableau IV.1 : l'inductance propre et mutuelle de référence (Les valeurs en mH).
Les valeurs mesurées des inductances propre, mutuelles, les résistances et les capacités shunte- série, sont représentées dans le schéma de référence [24]:

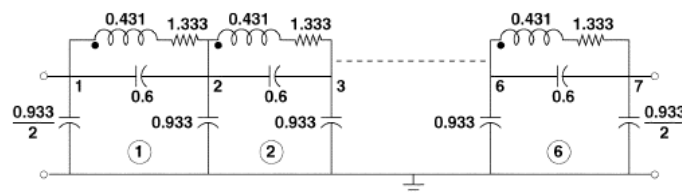


Fig. IV.2 : schéma de référence.[24]

La variation de l'impédance en fonction de la fréquence est donnée par la figure suivante

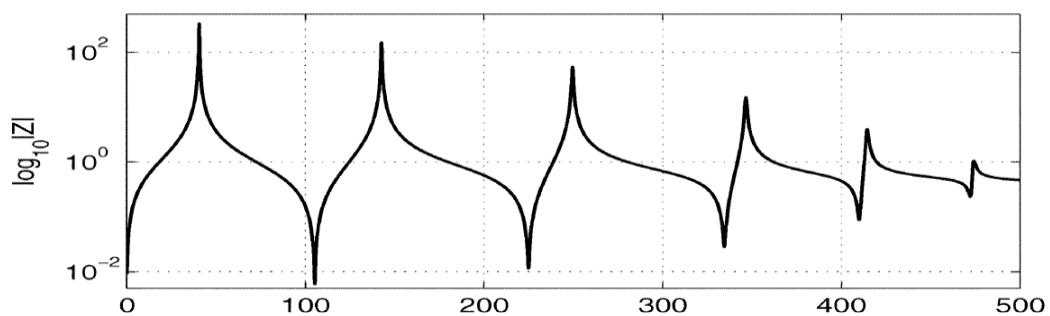


Fig. IV.3 : La variation de l'impédance en fonction de la fréquence.[24]

Les fréquences normales en circuit ouvert (ocnf) et celles en court-circuit (scnf) sont illustrées dans tableau (IV.2)

Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)
40.3	105
143	223.8
250.6	336
346	

Tableau IV.2 : fréquences normales en circuit ouvert (ocnf) et celles en court-circuit(scnf).[24]

IV/ 6.Calcul des paramètres du modèle adopté

IV/ 6.1.Détermination des paramètres du schéma équivalent

- Calcul des inductances propres et mutuelles

Selon la formule de Neumann (IV.14), les inductances propres et les mutuelles sont données par la courbe ci Dessous:

$$M_{1,2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{r} \quad (\text{IV.14})$$

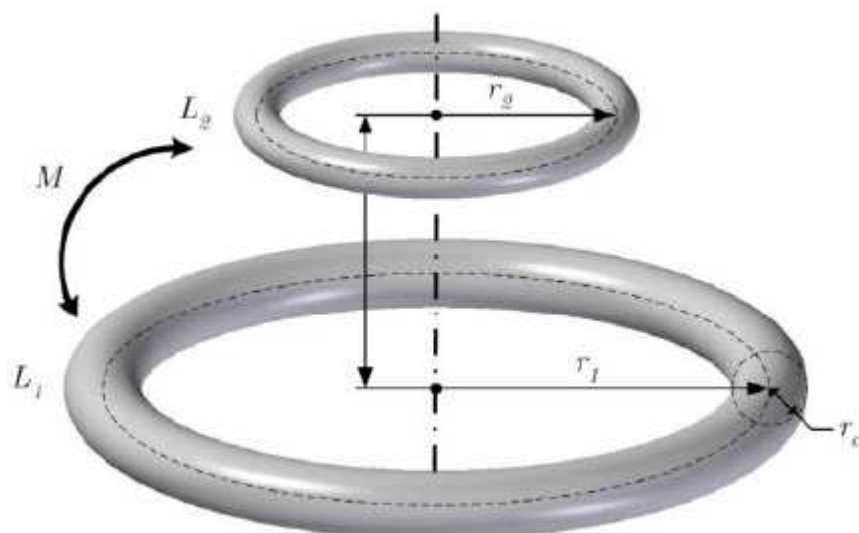


Fig IV.5 : Calcul d'inductances propre et mutuelle. [2]

L_1, L_2 : longueur de spire, r_1, r_2 : rayon, M : mutuelle.

La courbe qui nous donne les inductances mutuelles est représentée dans le graphe suivant :

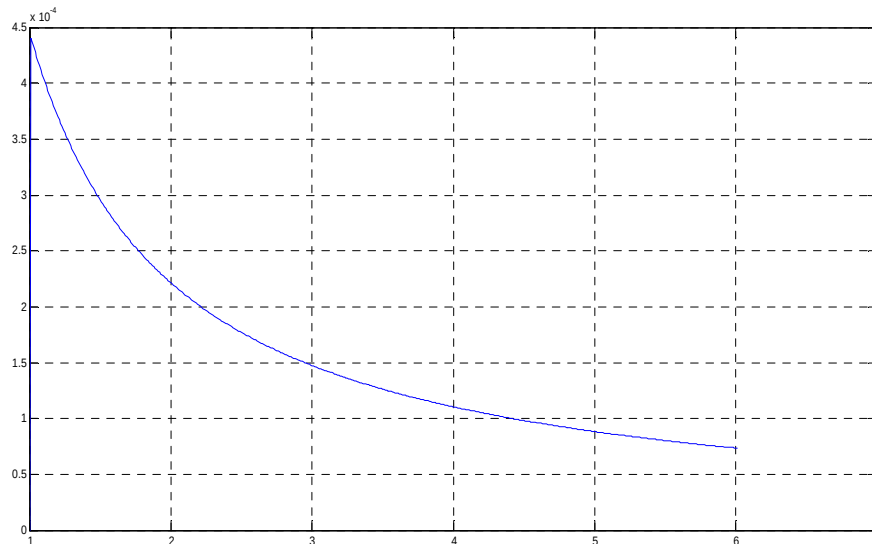


Fig. IV.4 : Inductances propres et mutuelles d'un bobinage discrétisé en 6 éléments.

Les valeurs des inductances propres et les mutuelles calculées selon IV.14 sont regroupées dans le tableau IV.3 :

l_s	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}
0.4407	0.2203	0.1469	0.1102	0.0881	0.0734

Tableau IV.3 : l'inductance propre et mutuelle calculées, Les valeurs en mH.

- **Calcul des coefficients des mutuelles K_{1i}**

A partir des valeurs des mutuelles trouvées, on a calculé les coefficients des mutuelles afin de les appliquer sur p-spice.

Avec :

$$K_{1i} = M_{1i} / L \quad \text{et } i=1,2,3,4,5 \text{ et } 6$$

On trouve les valeurs suivantes :

K12	K13	K14	K15	K16
0.54	0.331	0.25	0.184	0.165

Tableau IV.4 : les valeurs des coefficients des mutuelles calculés

- **Calcul de l'inductance équivalente d'un enroulement**

$$L_{eqcal} = N L_i + 2 \sum_{i=1, i \neq j}^6 (N-i) M_{ij}$$

On a $N = 6$ éléments

Alors

$$L_{eqcal} = 6L_i + 2(5M_{12} + 4M_{13} + 3M_{14} + 2M_{15} + M_{16})$$

$$L_{eqcal} = 6 \cdot 0.4407 + 2(5 \cdot 0.2203 + 4 \cdot 0.1469 + 3 \cdot 0.1102 + 2 \cdot 0.0881 + 0.0734)$$

$$L_{eqcal} = 7.1828 \text{ mH}$$

Et on a :

$$L_{eqmes} = 6.98 \text{ mH}$$

$$L_{eqest} = 7.0385$$

- **Calcul de l'erreur entre la valeur calculée et les valeurs estimée et mesurée**

l'erreur entre la valeur calculée et estimée

$$\text{Erreur} = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur calculée}}{\text{valeur mesurée}} \cdot 100$$

$$\text{Erreur} = 2.9\%$$

l'erreur entre la valeur calculée et la valeur estimée

$$\text{Erreur} = \frac{\text{valeur estimée} - \text{valeur calculée}}{\text{valeur estimée}} \cdot 100$$

$$\text{Erreur} = 2.05\%$$

L'erreur entre la valeur calculée et les valeurs estimée et mesurée de l'inductance est inférieure à 5%

- Calcul des paramètres (r , C_g , C_s , C_{eq})

Calcul de la résistance r

On a :

$$r = R_{dc} / N$$

Avec $N=6$ et $R_{dc}=8\Omega$

$$r = 8/6$$

$$r = 1.33\Omega$$

Calcul de la capacité longitudinale C_g

On a :

$$C_g = C_{g,eff} / N$$

Avec $C_{geff}=5.6nF$

$$C_g = 5.6/6$$

$$C_g = 0.9333nF$$

$$C_g/2 = 0.4666nF$$

Calcul de la capacité transversale C_s

$$C_s = (C_{geff} * N) / \alpha^2$$

Avec $\alpha=7.4833$

$$C_s = (5.6 * 6) / (7.4833)^2$$

$$C_s = 0.6nF$$

Calcul de la capacité équivalente C_{eq}

$$C_{eq} = C_g/2 + 1 / [C_s + (1 / (C_g + 1 / (N/C_s)))]$$

$$C_{eq} = 0.4666/2 + 1 / [0.6 + (1 / (0.9333 + 1 / (6/0.6)))]$$

$$C_{eq} = 0.8711nF$$

Le schéma suivant représente l'enroulement du transformateur dont les paramètres sont calculés par la méthode présentée ci dessus :

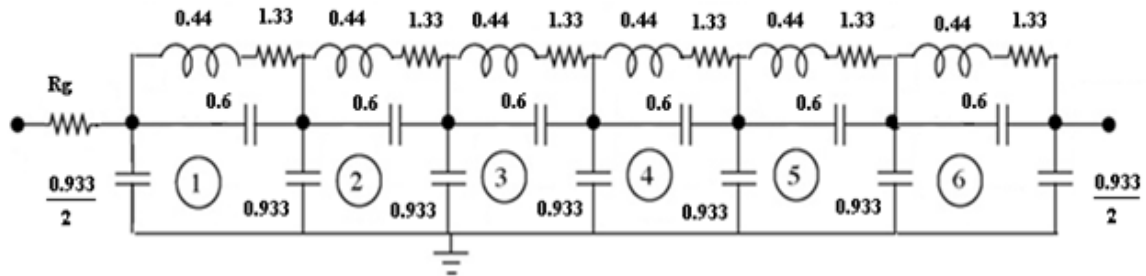


Fig. IV.6 Schéma d'enroulement obtenu par calculs

IV/ 7. Exploitation du modèle en vue d'une étude de diagnostic

Après le calcul des paramètres du circuit d'enroulement (résistance, inductance, inductances mutuelles, les capacités transversales et longitudinales), on a utilisé un programme de calcul dans le logiciel p-spice (ORCAD 10.5) afin de faire des simulations des essais de court-circuit, circuit-ouvert et déformation propre.

Les graphes obtenus des deux essais sont représentés au dessous :

Modèle sain

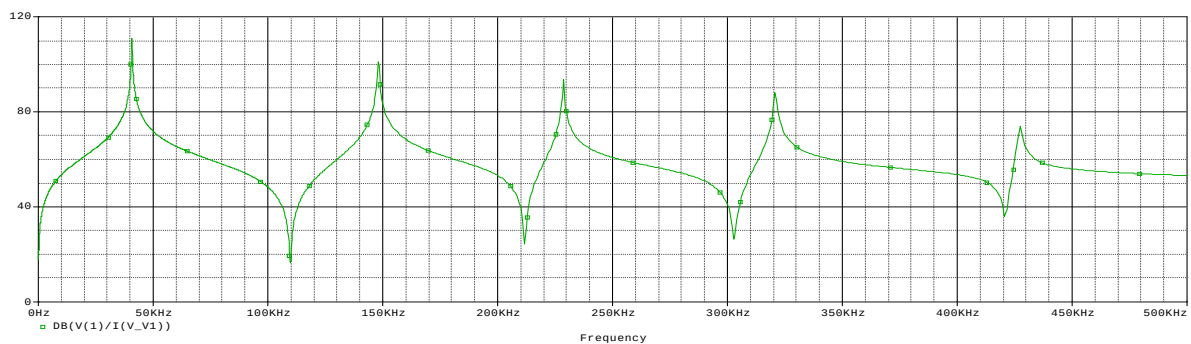
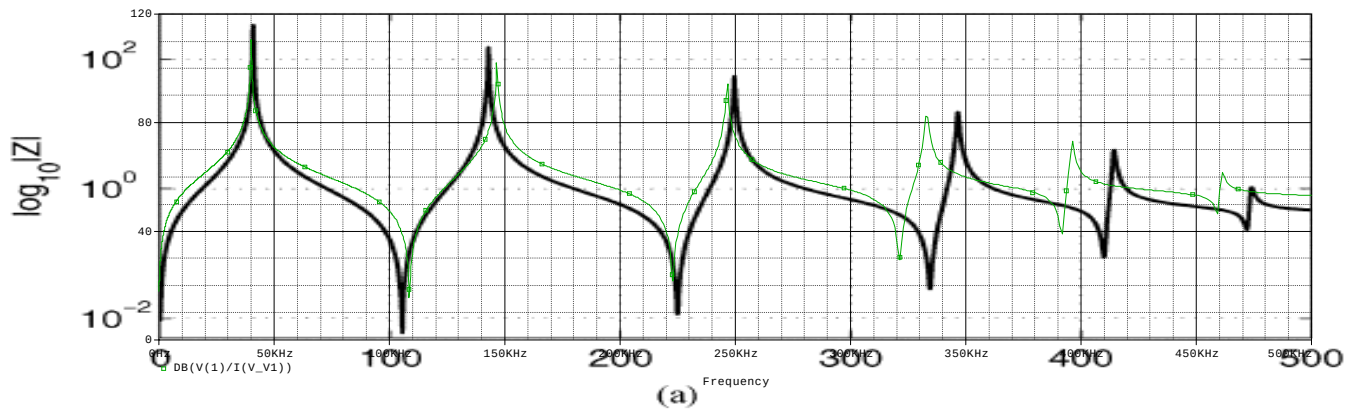


Fig.IV.7 variation de l'impédance en fonction de la fréquence (Sans défaut)

La comparaison entre le graphe de la réponse fréquentielle d'un enroulement sans défaut du modèle de référence et le graphe du modèle calculé



FigIV.8: comparaison du model de référence et le model calculé

La comparaison des fréquences $ocnf$, $scnf$ mesurées et $ocnf$, $scnf$ estimées sont représentées dans le tableau suivant:

Les valeurs de référence		Les valeurs mesurées		Les valeurs calculées		Erreur
Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	Ocnf(kHz)	Scnf(kHz)	
40.3	105	40.48	105.19	39.903	108.643	<5%*
143	223.8	142.58	224.79	146.555	222.844	
250.6	336	249.42	334.44	246.604	331.366	
346		346.41	410.09	332.660	391.742	
		414.34	472.42	396.278	459.198	
		473.73		461.418		
Leq=6.98 [mH]		Leq=6.98 [mH]		Leq=7.18 [mH]		<5%*
$C_{eq} \square 0.8819$ [nF]		$C_{eq} \square 0.8819$ [nF]		$C_{eq} \square 0.8829$ [nF]		<5%*

Tableau IV.5 : la comparaison des fréquences normales en circuit ouvert $ocnf$ et celles en court-circuit $scnf$

$$erreur = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur estimée}}{\text{valeur mesurée}}$$

D'après cette comparaison on a constaté que l'erreur entre les deux approches n'excède pas 5%, ce qui valide notre démarche.

IV/ 8. Localisation des défauts le long de l'enroulement

IV/ 8.1 les différents défauts étudiés

Après avoir validé le modèle approché, nous allons l'exploiter par une étude de diagnostic de l'enroulement.

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 les spires ou éléments.
- Ouverture d'une partie de l'enroulement.
- Déformations propres de l'enroulement.

IV/ 8.2 études de la réponse fréquentielle de l'impédance

IV.8.2.1 Défauts entre spires

Les défauts entre spires de l'enroulement 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.

a- Court-circuit entre les spires

La figure suivante représente la réponse en fréquence de l'impédance de l'enroulement présentant un défaut de court-circuit entre la spire 1 superposé avec celle d'un enroulement sain.

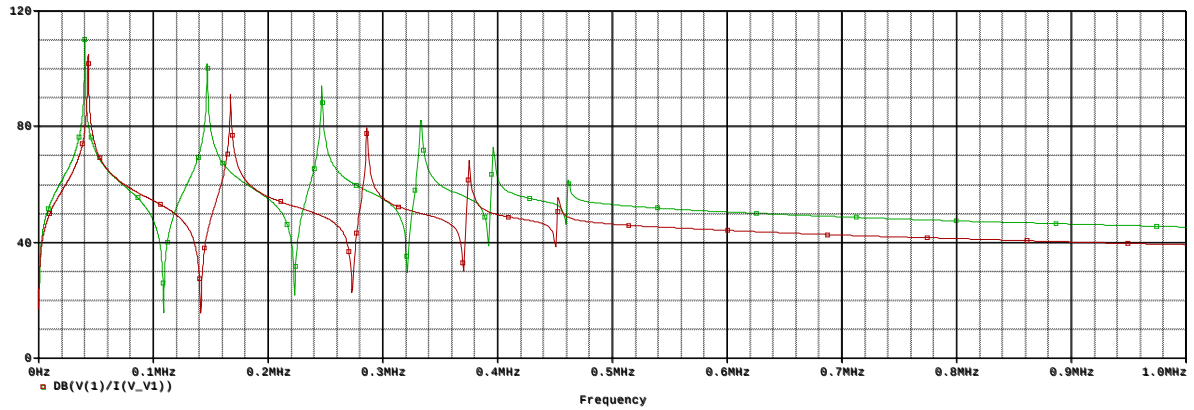


Fig. IV.8.1 : comparaison de la réponse en fréquence entre un enroulement présentant un défaut de court circuit entre le 1^{er} élément et un transformateur sain.

De la réponse en fréquence de l'enroulement affecté par un court-circuit entre les deux premiers éléments de l'enroulement considéré, on remarque une déformation de signature de l'impédance par rapport à celle obtenue d'un enroulement sain. Le défaut apparaît à partir de 10 kHz jusqu'à 460 kHz. Le déplacement du premier pic est relevé aux environs de 4 kHz en gardant presque la même amplitude. On constate également que le défaut est absent à partir de 480 kHz.

Les fréquences $ocnf$ et $scnf$ s'éloignent de celle obtenues de la réponse d'un enroulement sain et cet éloignement est significatif entre 100kHz et 460kHz.

Les figures suivantes représentent les réponses en fréquence de l'enroulement présentant un défaut de court-circuit entre spires avec un déplacement de point du défaut

Court circuit entre les bornes de la spire 1

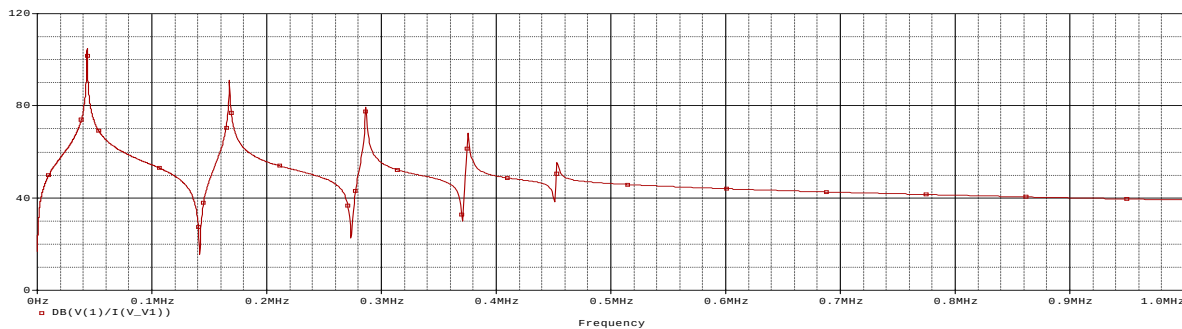


Fig. IV.8.2: la réponse fréquentielle d'un court-circuit entre les bornes de la spire 1.

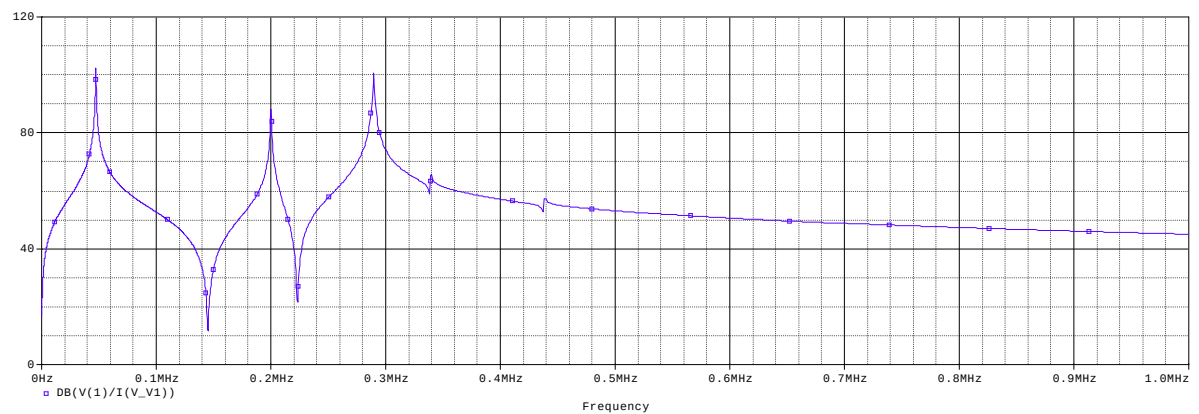
Court circuit entre les bornes de la spire 2

Fig. IV.8.3: la réponse fréquentielle d'un défaut entre les bornes de la spire 2

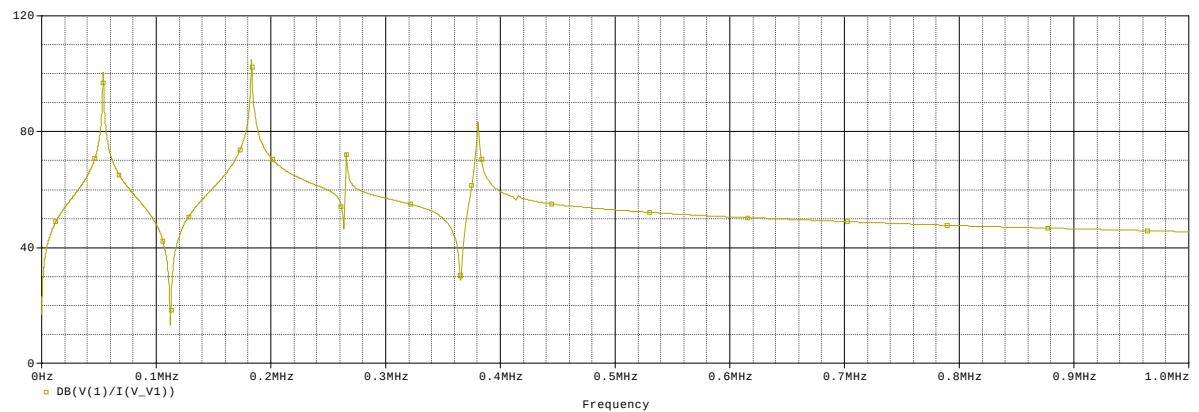
Court circuit entre les bornes de la spire 3

Fig. IV.8.4: la réponse fréquentielle d'un court-circuit entre les bornes de la spire 3

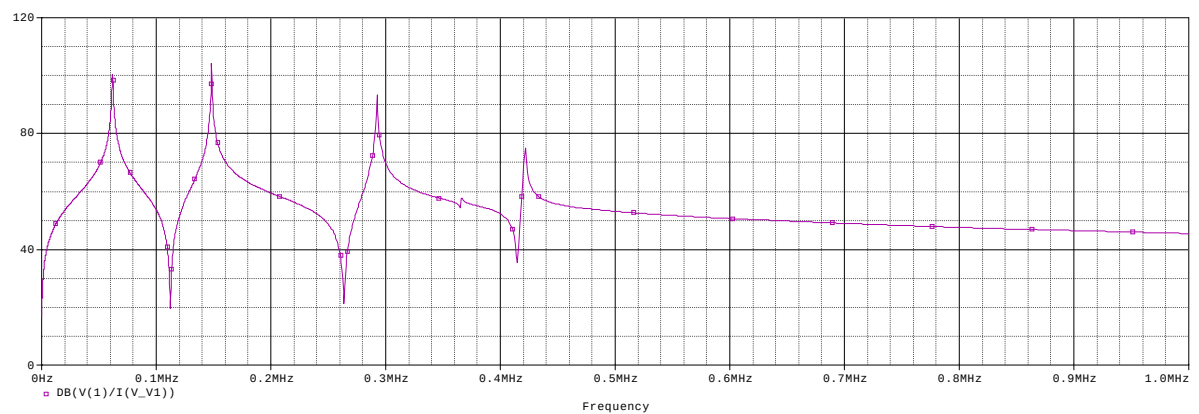
Court circuit entre les bornes de la spire 4

Fig. IV.8.5: la réponse fréquentielle d'un court-circuit entre les bornes de la spire 4

Court circuit entre les bornes de la spire 5

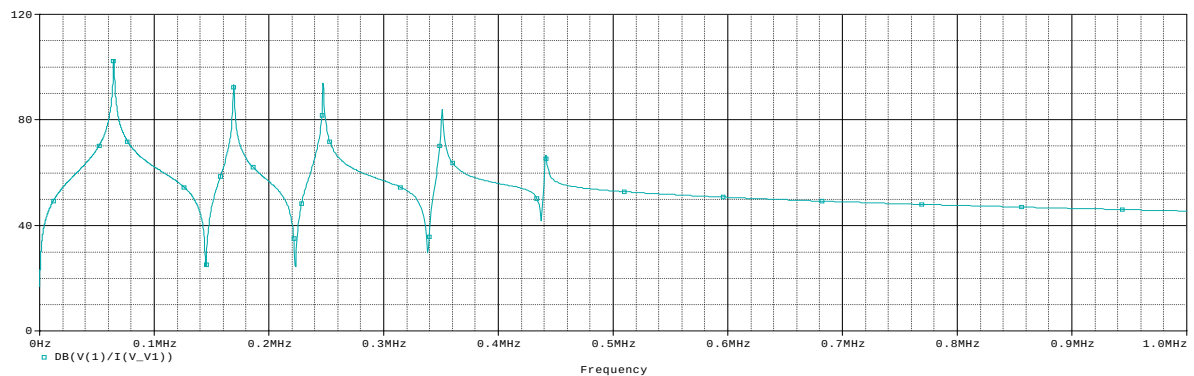


Fig. IV.8.6 : la réponse fréquentielle d'un court-circuit entre les bornes de la spire 5

Court circuit entre les bornes de la spire 6

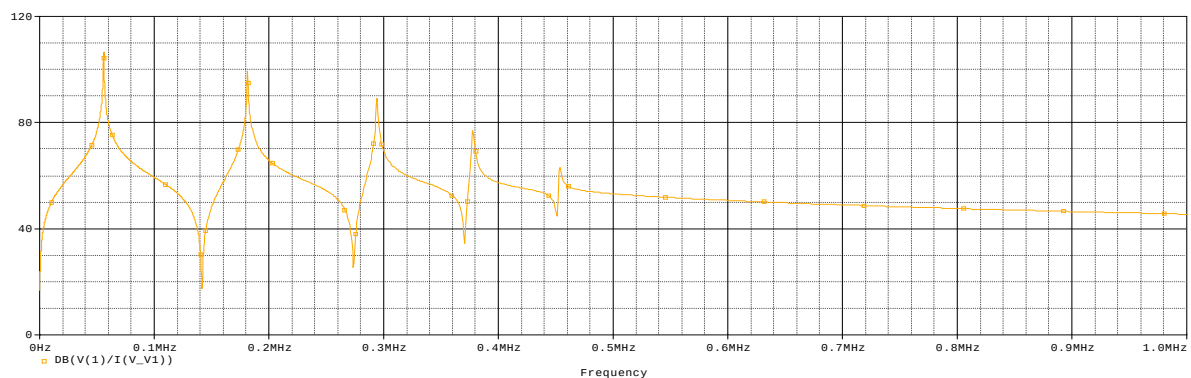


Fig. IV.8.7 : la réponse fréquentielle d'un court-circuit entre les bornes de la spire 2

La superposition des graphes

La figure suivante représente les réponses en fréquence de l'enroulement présentant un défaut de court-circuit entre spires avec un déplacement de point du défaut

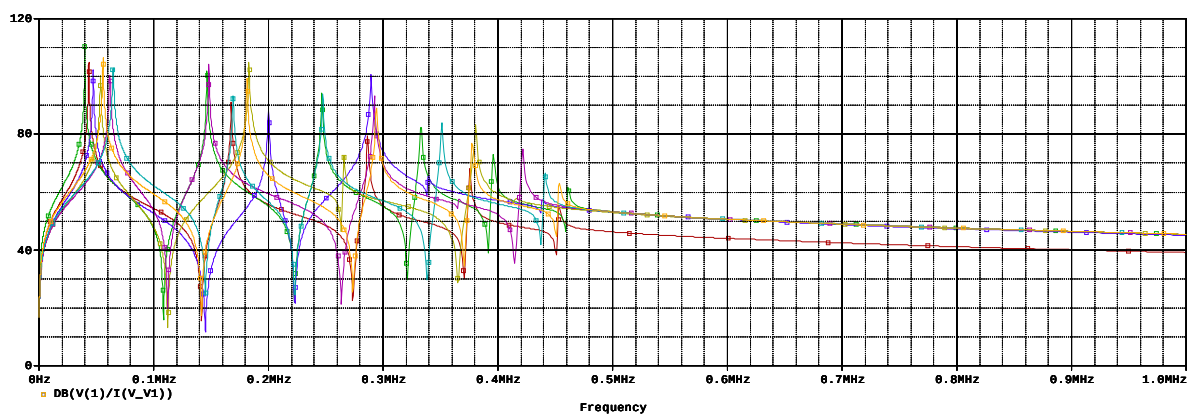


Fig. IV.8.9 : superposition des graphes (court-circuits).

Le déplacement du point de défaut considéré, confirme que la déformation de

réponse fréquentielle commence à partir de 40 kHz. Dans la totalité des empreintes on remarque que le premier pic de résonance se déplace avec le déplacement du court-circuit d'environ 4 kHz.

Les fréquences $ocnf$ et $scnf$ obtenues pour chacun des défauts simulés sont illustrées dans les tableaux de l'annexe 1. (A-B-C-D-E-F).

b- Ouverture de spires

La figure IV.10 représente la réponse fréquentielle de l'impédance de l'enroulement présentant une ouverture au niveau de premier élément de l'enroulement discrétisé et un enroulement sain

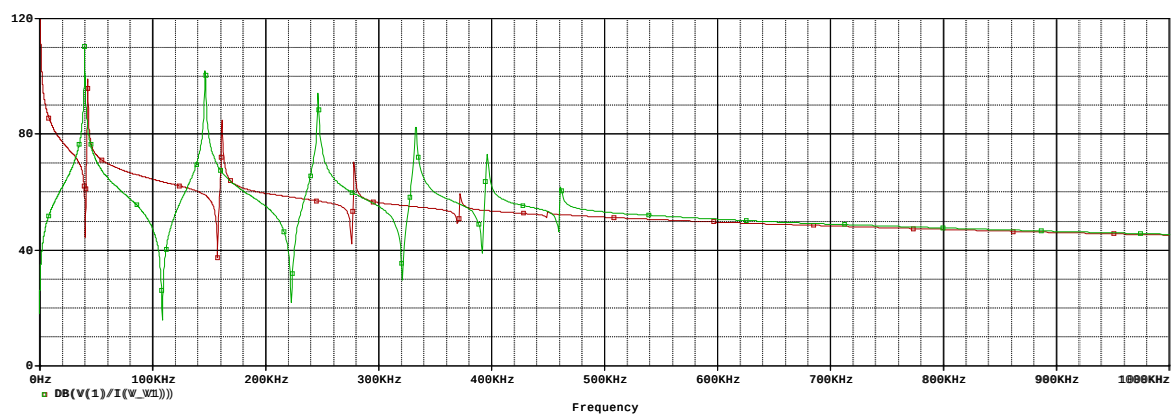


Fig. IV.8.10 : comparaison de la réponse de l'impédance entre un enroulement présentant un défaut d'ouverture de spire et un enroulement sain.

De la comparaison des signatures obtenues, on peut noter que la courbe issue de l'application d'un défaut caractérisant une coupure de spire du 1^{er} élément est affectée considérablement dans la plage allant 0 jusqu'à 460 kHz.

Les circuits ouverts réalisés

Circuit ouvert entre les bornes de la spire 1

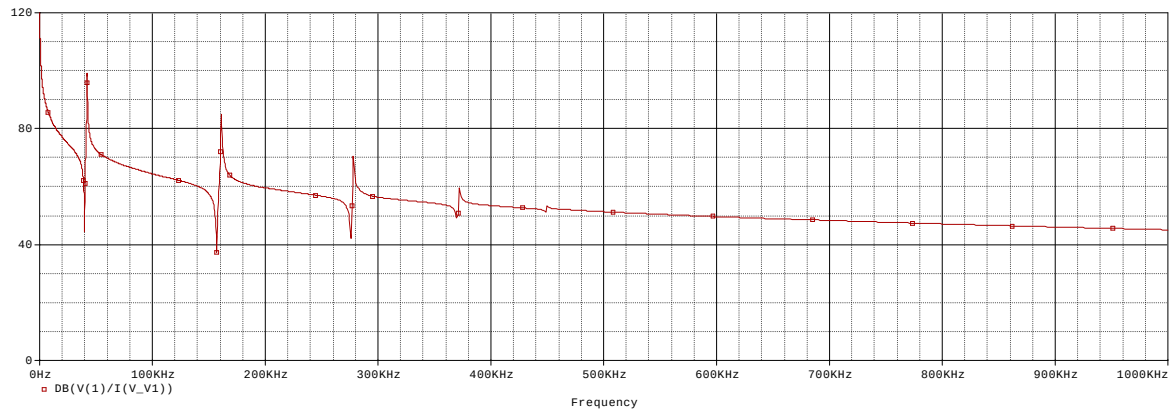


Fig. IV.8.11: la réponse fréquentielle d'un circuit-ouvert entre les bornes de la spire1

Circuit ouvert entre les bornes de la spire 2

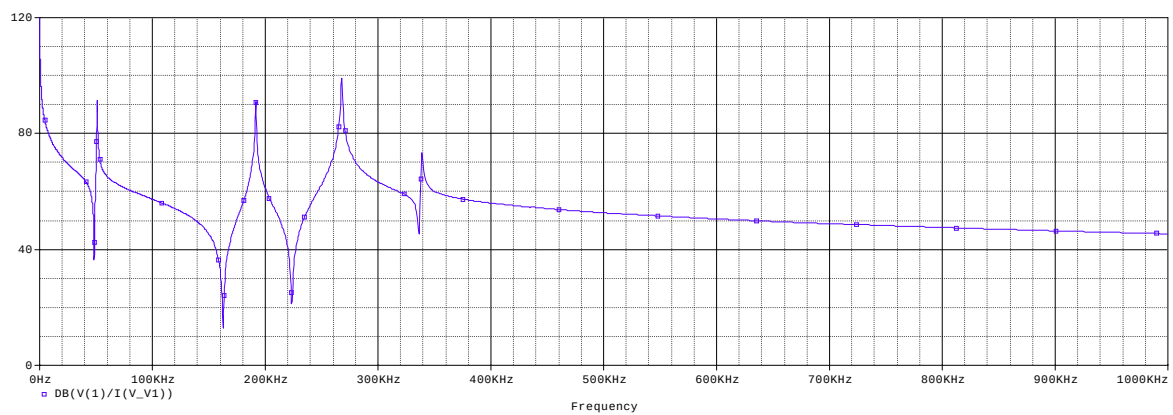


Fig.IV.8.12: la réponse fréquentielle d'un circuit-ouvert entre les bornes de la spire 2

Circuit ouvert entre les bornes de la spire 3

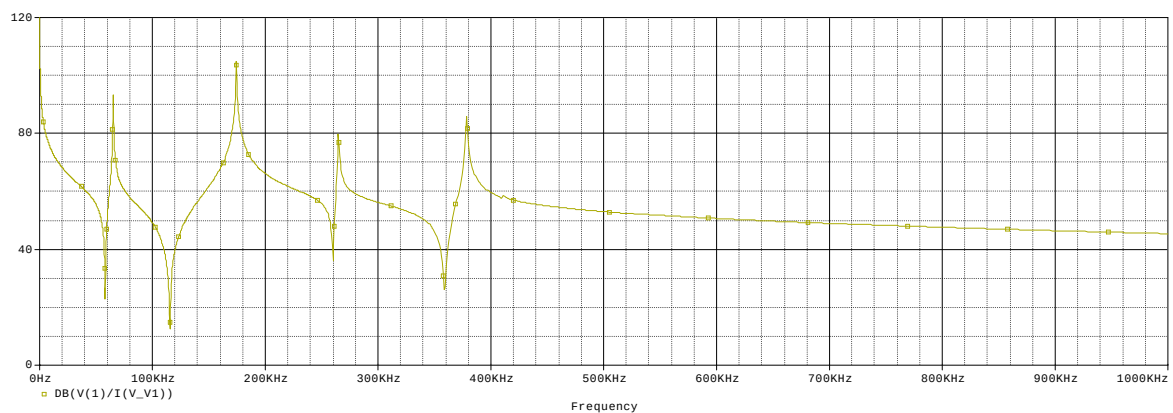


Fig.IV.8.13:la réponse fréquentielle d'un circuit-ouvert entre les bornes de la spire 3

Circuit ouvert entre les bornes de la spire 4

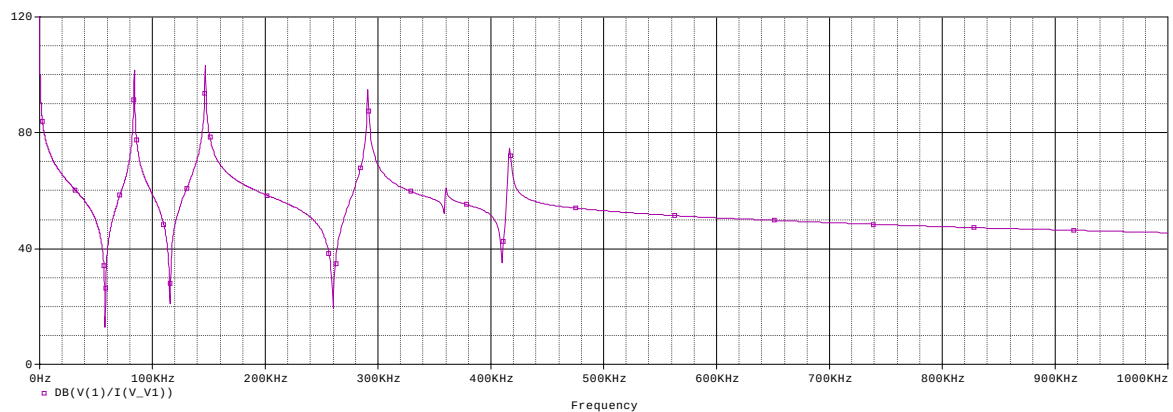


Fig.IV.8.14: la réponse fréquentielle d'un circuit-ouvert entre les bornes de la spire 4

Circuit ouvert entre les bornes de la spire 5

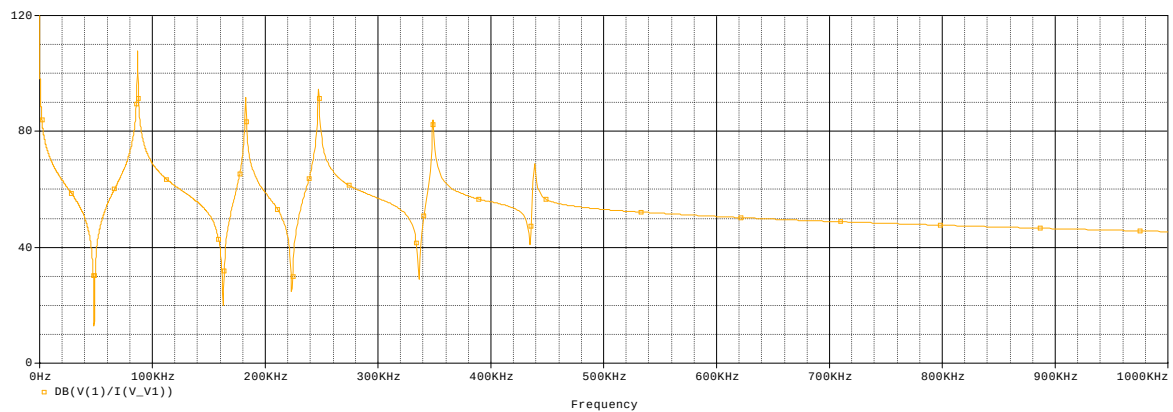


Fig.IV.8.15: la réponse fréquentielle d'un circuit-ouvert entre les bornes de la spire 5

Circuit ouvert entre les bornes de la spire 6

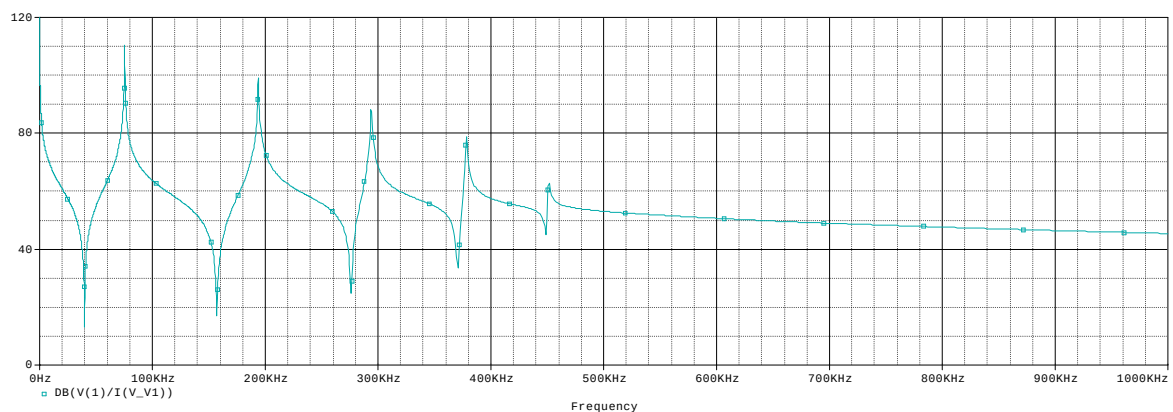


Fig. IV.8.16: la réponse fréquentielle d'un circuit-ouvert entre les bornes de la spire 6

La Figure. IV.11 représente les réponses en fréquence de l'enroulement présentant un défaut de circuit ouvert entre les spires avec un déplacement du point de défaut.

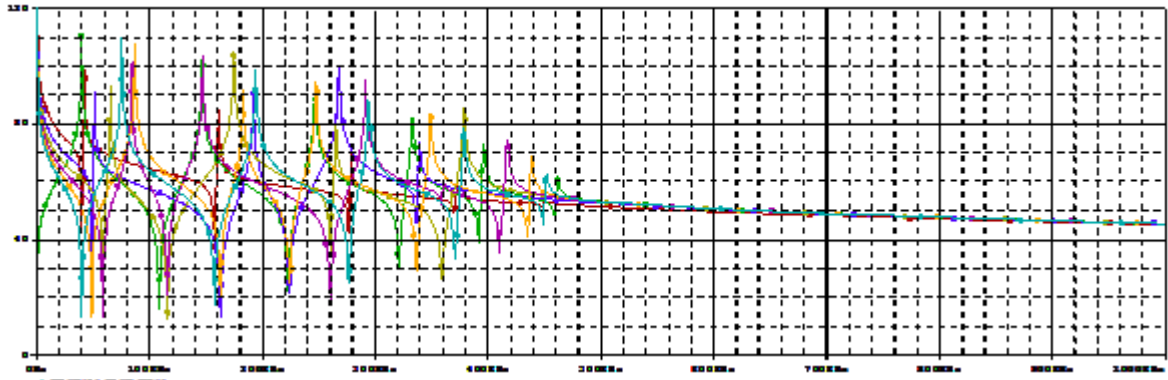


Fig. IV.8.18: comparaison des empreintes des enroulements affectés par ouvertures de circuit et celle d'un enroulement sain.

D'après les simulations effectuées, on remarque que toutes les réponses fréquentielle de l'impédance, lorsque l'enroulement est affecté par une ouverture présentent des fréquences $ocnf$ à 0 Hz, on remarque aussi que les fréquences de coupure $scnf$ et $ocnf$ sont inversé par rapport au cas d'un enroulement sain et se déplacent d'environ 10 kHz avec le déplacement du défaut le long de l'enroulement.

Les fréquences $ocnf$ et $scnf$ obtenue pour chacun des défauts simulés sont illustrées dans les tableaux de l'annexe 2. (A-B-C-D-E-F).

C- Comparaison entre le court circuit et ouverture de spires

La comparaison des deux signatures engendrées respectivement par un défaut de contact galvanique entre spire, et ouverture de spire, on remarque que dans le deuxième cas une apparition d'une fréquence à un pic de résonance caractérisant $Ocnf$ à 0 Hz, dans le premier signale, la fréquence de coupure qui apparait est une $Scnf$.

La figure IV.12 représente la comparaison entre le court circuit et ouverture de spire au niveau du 1^{er} élément.

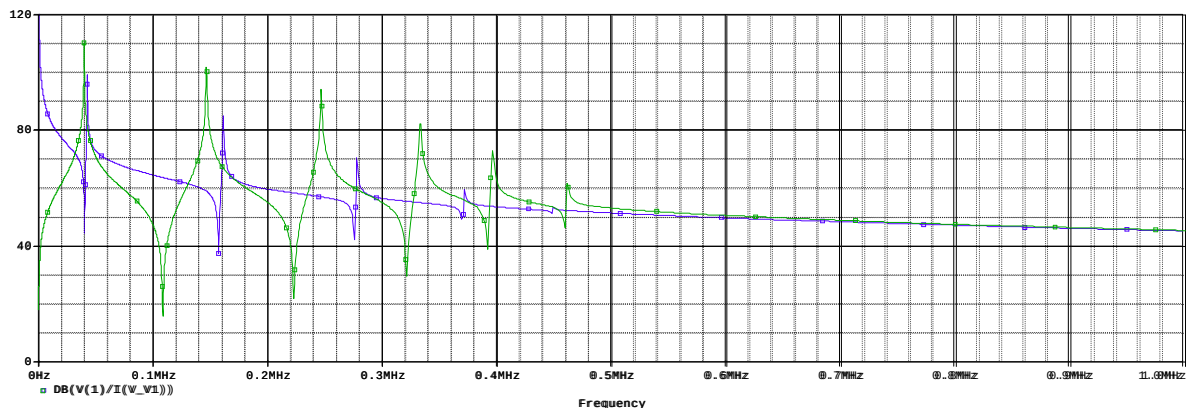


Fig. IV.8.19: comparaison entre le court circuit et ouverture de spire dans le 1^{er} élément.

IV/ 8.2.2 Déformations propres de l'enroulement

Déformations entre les spires d'enroulements

La figure suivante représente les réponses en fréquence de l'enroulement présentant un défaut de déformation dans la 1^{er} spire de l'enroulement et la superposer avec l'empreinte du modèle sans défaut.

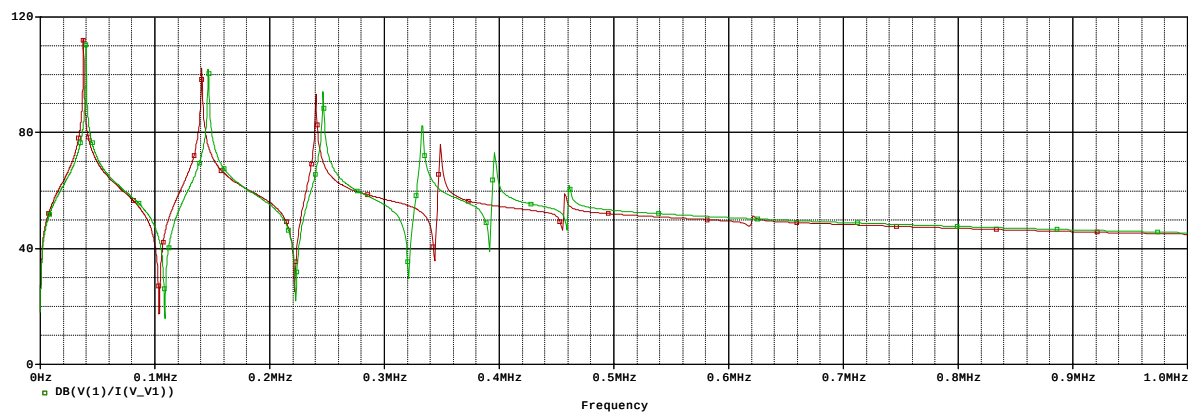


Fig. IV.8.20: comparaison entre des enroulements affectés par des défauts de déformation entre les spires sur sa longueur et enroulement sain.

En remarque que les deux signatures parfaitement confondues entre 0 Hz et 110kHz, la perturbation devient significative à partir de 240 kHz.

Défaut de déformation dans la 1^{re} spire

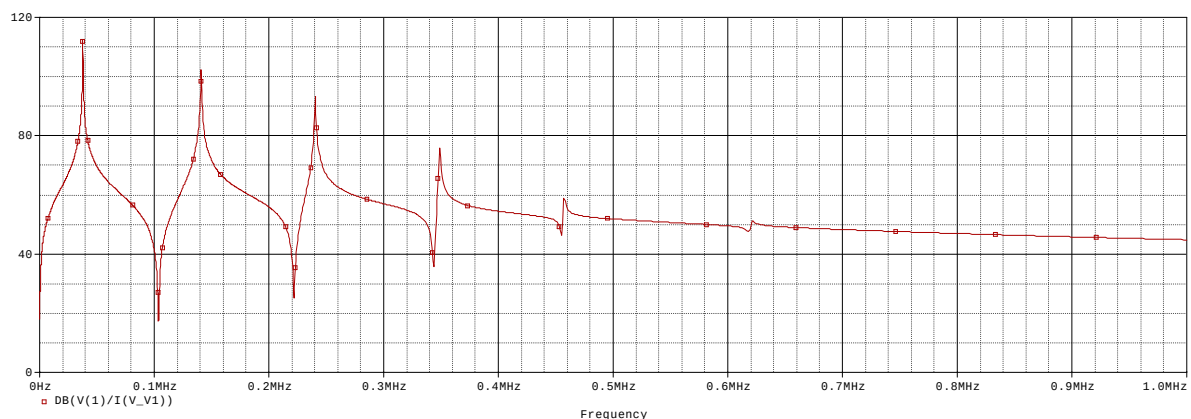


Fig. IV.8.21: la réponse fréquentielle d'une déformation dans la spire 1

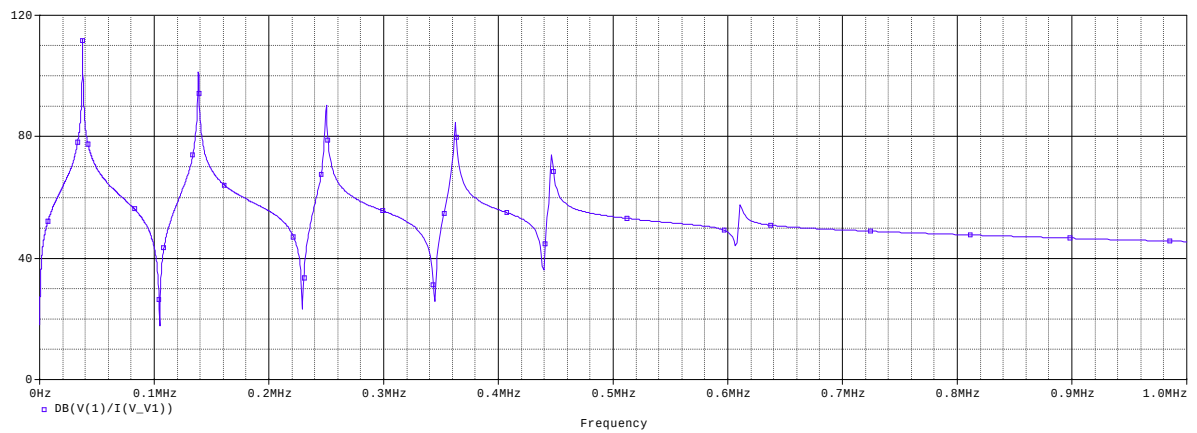
Défaut de déformation dans la 2^{ème} spire

Fig. IV.8.22 : la réponse fréquentielle d'une déformation dans la spire 1

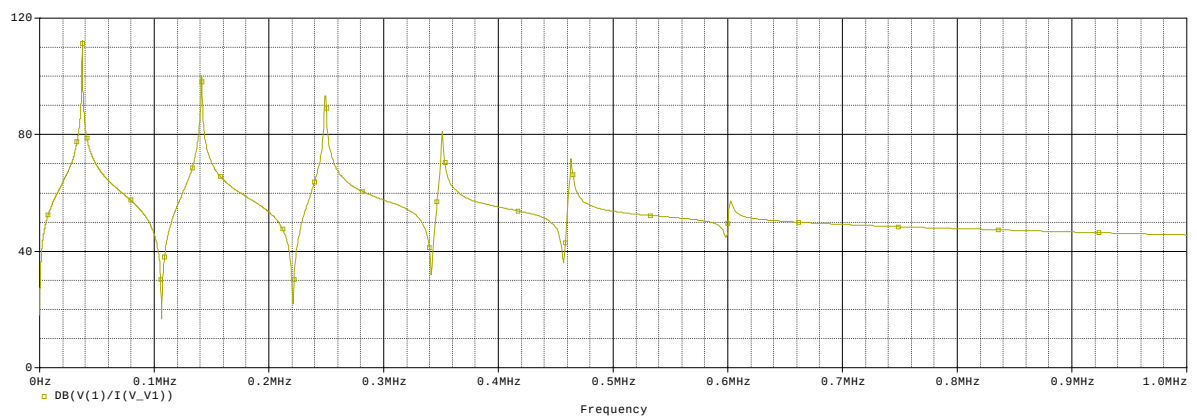
Défaut de déformation dans la 3^{ème} spire

Fig. IV.8.23 : la réponse fréquentielle d'une déformation dans la spire 1

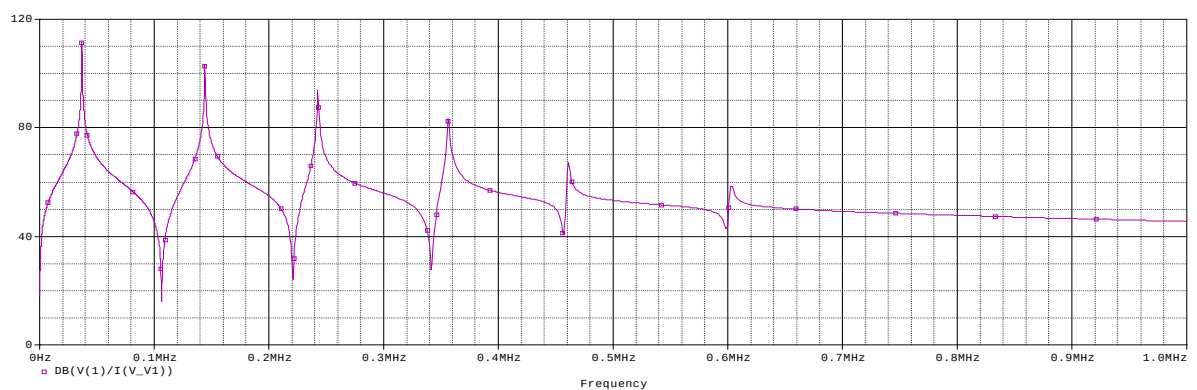
Défaut de déformation dans la 4^{ème} spire

Fig. IV.8.24 : la réponse fréquentielle d'une déformation dans la spire 1

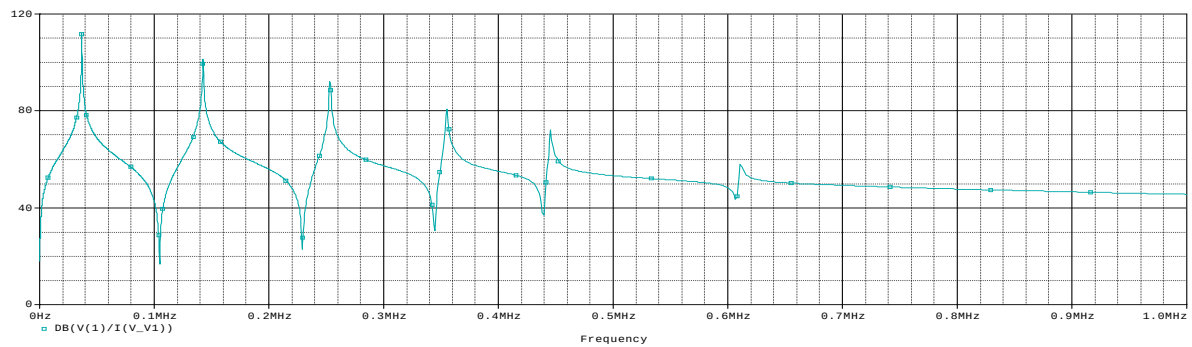
Défaut de déformation dans la 5^{ème} spire

Fig. IV.8.25 : la réponse fréquentielle d'une déformation dans la spire 1

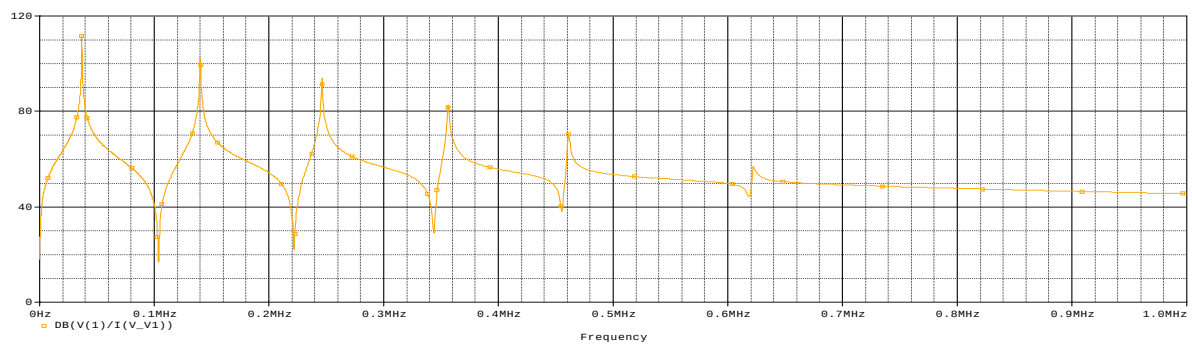
Défaut de déformation dans la 6^{ème} spire

Fig. IV.8.26 : la réponse fréquentielle d'une déformation dans la spire 1

Fig. IV.16 représente les réponses en fréquence de l'enroulement présentant un défaut de déformation entre les spires avec un déplacement du point de défaut.

Comparaison

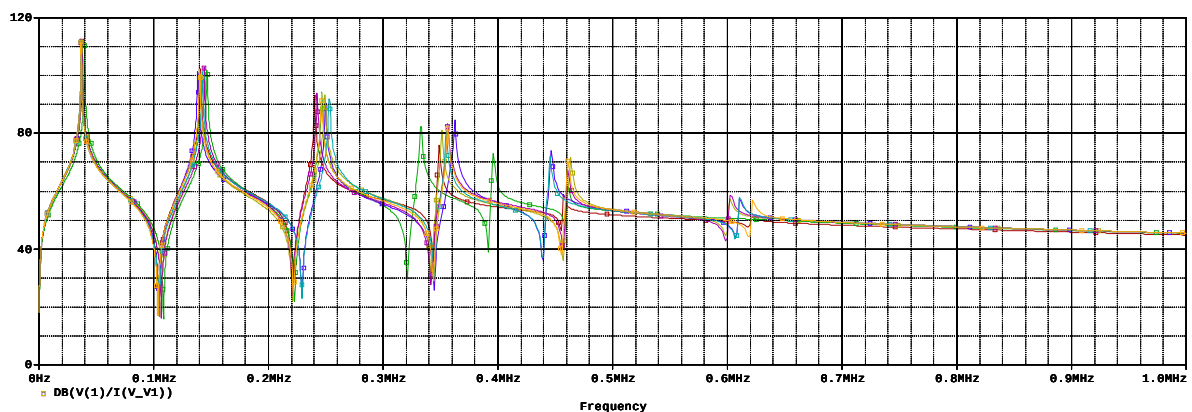


Fig. IV.8.26.comparaison entre des enroulements affectés par des défauts de déformation dans les spires sur sa longueur et enroulement sain.

Le déplacement du défaut simulé le long de l'enroulement confirme que les signatures de l'enroulement défectueux et celles de l'enroulement sain sont totalement confondues entre 0 Hz et 110 kHz, et la perturbation commence à partir de 240 kHz.

On remarque également que les fréquences $scnf$ et $ocnf$ se déplaçant avec la translation de défaut.

Les fréquences $ocnf$ et $scnf$ obtenues pour chacun des défauts simulés sont illustrées dans les tableaux de l'annexe 3. (A-B-C-D-E-F).

IV/ 9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes particulièrement intéressés au modèle basé sur le principe des inductances propres et mutuelles, nécessitant le calcul des paramètres inductifs, capacitifs et résistifs, et nous avons tiré les conclusions suivantes :

- Dans le cas du court circuit le défaut apparaît à partir de 10 kHz jusqu'à 460 kHz , Le déplacement du premier pic est relevé aux environs de 4 kHz .
- En cas du circuit ouvert, les signatures des réponses de l'impédance en fonction de la fréquence ont totalement changées, la détection de défaut alors est simple.
- Dans La détection des défauts de déformation entre les éléments, on a obtenue les fréquences $ocnf$ et $scnf$ pour la réponse de l'impédance à partir de 150 kHz jusqu'a 500 kHz.

Notre travail est consacré la localisation des défauts dans les enroulements de transformateur de puissance en vue de son diagnostic. Nous avons présenté l'intérêt des informations que peut apporter l'utilisation des techniques de diagnostic dans les transformateurs de puissance, en termes de réduction de la probabilité de défaillance ou de dégradation du service ainsi que l'amélioration de l'espérance de vie du transformateur. Plusieurs modèles de transformateurs sont également développés ainsi que la méthode de diagnostic utilisée.

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

La méthode proposée a été ensuite testée sur un enroulement de transformateur de puissance ; les conclusions suivantes sont tirées :

- Les défauts de court-circuit entre spires, se manifestent par des pics de résonance dans une plage de fréquences qui est de 40 à 500 kHz : avec déplacement de ces pics en fonction des défauts le long de l'enroulement.
- Les défauts liés aux ouvertures de spires de l'enroulement apparaissent comme des perturbations qui sont importantes dans la zone de fréquences (0-460 kHz).
- Les défaillances liées aux déformations propres de l'enroulement se manifestent par des pics de résonances dans la région (240 kHz-480 MHz).

Comme perspectives pour ce travail, nous suggérons le point suivant :

- Un calcul plus affiné des paramètres des éléments du modèle équivalent en tenant compte de la variation paramétrique en fonction de la fréquence.
- Étude expérimentale sur des enroulements défectueux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Audrey BOURGEOIS, «Etude du phénomène d'électrification par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance», institut national polytechnique de Grenoble. Thèse de doctorat.
- [2] Anthony LEFEVRE, «contribution a la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs», université de Nantes, Thèse de doctorat.
- [3] Tai Chee Kheng «Impact of Moisture on the Strength of Paper- Insulated Conductor» Department of Computer Science & Electrical Engineering The University of Queensland, St. Lucia, Brisbane, Queensland 4072 Australia, 20 October 2000.
- [4] SHIH -HUA (Patrick) Kuo «Diagnostics of Transformer Condition by Polarization Current and Oil Conductivity Measurements» Undergraduate Thesis, School of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queensland, October 2002.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] MUFIDZADA N.A, OTMANE-CHRIF T, «Etude de l'Influence du Noyau sur les

BIBLIOGRAPHIE

Surtections Impulsionnelles dans les Enroulements du Transformateur», IEEE conférence Porto page1-23, 2009.

[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] MERLET.R, « Technologie d'électricité générale et professionnelle », édition Dunod paris, 1969.

[11] M.J. Manyahi, M. Leijon, R. Thouttappillil, «Transient response of transformer with XPLE insulation cable winding design», Electrical power & energy systems, Vol 27 pp. 69-80, 2005.

[12] Technique de l'ingénieur.

[13] 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.

[14] 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.

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

[16] E. Cottens « *Introduction à la FRA* », SONELGAZ, DEPT GRTE Formation sur le diagnostic des transformateurs de puissance, Janvier 2008.

BIBLIOGRAPHIE

- [17] ELECTRA articles : 237 Avril 2008 Brochure Thématique GT A2.26.
- [18] A.Morched, L.Marti, J Ottevangers<< A high frequency transformer model for EMTP >>. IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 8, No. 3, July 1993.
- [19] 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.
- [20] TRAN Anh Tuan «modélisation de la propagation des signaux HF dans le réseau d'énergie électrique» Mémoire de doctorat. Ecole doctorale : électronique, électrotechnique, automatique, de Lyon.
- [21] Heller.B, Veverka.A, «Processus impulsionnelles dans les machines électriques», Energya, Moscou, 1973.
- [22] L. Satish, Subrat K. Sahoo, « Locating faults in a transformer winding», HV Lab, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560012, Karnataka, India.
- [23] Otmame-Cherif T, N.Mufidzada, N.Benamrouche <<Influence of the Number of the nodes in the Windings Equivalent circuit o the Surge voltages in transformers>>, International Review on Modelling and Simulation, Italy, Vol. 1, N°2, pp 78-84, October 2008.
- [24] K. Ragavan and L. Satish , «Localization of Changes in a Model Winding Based on Terminal Measurements», IEEE transaction on power delivery ,vol.22,NO.3, july 2007.

BIBLIOGRAPHIE

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

[26] PAUWELS «Formation générale au transformateurs », Mars 2009.

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

ANNEXE

1. Les fréquences Ocnf et Scnf des déferents court-circuits sont représentées dans les tableaux suivants :

A

Enroulement sain	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
39.903	108.643
146.555	222.844
246.604	331.366
332.660	391.742
396.278	459.198
461.418	

C

Court circuit entre la 2 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
47.206	145.211
199.986	223.357
289.734	338.065
339.625	437.522
438.531	

B

Court circuit entre la 1 ^{ère} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
43.551	141.578
167.494	273.527
286.418	370.681
375.837	450.817
452.698	

D

Court circuit entre la 3 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
53.703	112.202
183.231	263.633
265.461	364.754
380.189	414.000
415.911	

ANNEXE

E

Court circuit entre la 4 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
61.944	112.202
148.252	263.633
292.415	363.754
365.595	414.954
414.967	

F

Court circuit entre la 5 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
64.714	145.211
169.434	223.357
247.172	338.065
351.56	437.522
441.570	

G

Court circuit entre la 6 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
55.847	141.579
181.552	273.527
294.422	370.681
377.572	450.817
453.942	

ANNEXE

2. Les fréquences Ocnf et Scnf des circuits ouverts sont représentées dans les tableaux suivants :

A

circuit ouvert entre la 1 ^{ère} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
42.267	39.811
161.065	157.036
277.971	276.058
371.535	369.828
449.780	448.745
circuit ouvert entre la 5 ^{ème} spire	

B

circuit ouvert entre la 2 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
51.286	48.306
191.426	162.555
267.917	223.357
338.844	336.512
435.512	434.510

C

circuit ouvert entre la 3 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
65.313	58.076
174.582	115.348
264.850	260.016
378.443	358.922
411.850	409.261

circuit ouvert entre la 4 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
83.946	58.076
146.893	115.345
291.072	260.016
360.579	358.922
416.869	410.204

E

F

ANNEXE

Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
86.896	48.306
182.390	162.555
247.172	223.357
349.140	336.512
438.531	434.510

circuit ouvert entre la 6 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
75.336	39.811
194.089	157.036
293.765	276.058
378.443	370.681
451.856	448.745

3. Les fréquences Ocnf et Scnf des déformations propres sont représentées dans les tableaux suivants :

A

B

Déformation dans la 1 ^{ère} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
37.670	103.514
140.605	221.820
240.436	343.558
349.140	454.988
457.088	618.016
620.869	

Déformation dans la 2 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
37.411	104.713
138.357	229.087
250.035	334.350
362.243	439.542
446.684	606.735
610.942	

ANNEXE

C

Déformation dans la 3 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
37.154	106.660
140.929	220.801
249.460	341.193
351.560	457.088
463.447	598.412
602.560	

D

Déformation dans la 4 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
36.898	106.660
144.212	220.801
242.661	341.193
356.451	457.088
461.318	598.412
602.560	

E

Déformation dans la 5 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
36.813	104.713
142.561	229.087
252.930	344.350
355.631	439.542
445.656	606.736
610.942	

Déformation dans la 6 ^{ème} spire	
Ocnf (kHz)	Scnf (kHz)
36.891	103.514
139.959	221.820
246.037	343.558
356.451	454.988
461.311	619.441
622.300	