الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en électrotechnique.
Spécialité : Réseaux électrique

THEME

Modélisation et analyse fréquentielle dans les enroulements d'un transformateur triphasé en régime MF : application d'ABC

Proposé et dirigé par,

Dr. GACEMI Abd elrazak

Mlle. BOUKIRAT Samia

Préparé et présenté par,

M. KHALDI Merwane

M. BOUAICHAOUI Ibrahim

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

Le plus grand merci revient à dieu qui lui seul nous a guidé dans le bon sens durant notre vie et qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous remercions vivement notre enseignant M. Abd elrazak GACEMII Docteur à l'université Yahia

Farés de Médéa qui a été présent et très actif tout au long de ce travail et Co-promotrice

BOUKIRAT Samia, n'hésitant pas à prendre sur son temps pour nous aider dès le début jusqu'à la rédaction du mémoire.

Un grand merci A tous les enseignants de département d'électrotechnique de l'université

Yahia Farés de Médéa.

Nous remercions également les membres du jury qui nous ont honorés de juger et d'enrichir ce modeste travail.

Nos remerciements sont destinés aussi à nos familles, et tous nos amis pour leur aide et leur soutien.

Dédicace

Je dédie ce travail,

Mes chers parents qui ont sacrifié leur vie pour

Mon succès et encouragé que dieu

Garde heureux pour toujours

A mon frère et mes sœurs

A toute la famille Bouaichaoui

Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le primaire jusqu'à ce jour,

En particulier :

Dr. Abd elrazak GACEMI et BOUKIRAT SAMIA

A toute mes amis et mes collègues surtout Khaldi Merwane et à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux d'électrotechnique

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

Ibrahim

Dédicace

Je dédie ce travail,

Mes chers parents qui ont sacrifié leur vie pour

Mon succès et encouragé que dieu

Garde heureux pour toujours

A mes frères et à toute la famille

Khaldi

Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le primaire à ce jour, En particulier :
Dr. Abd elrazak GACEMI et BOUKIRAT SAMIA

A toute mes amis et mes collègues surtout
Ibrahim et à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux d'électrotechnique

Enfin, à tous ceux que j'aime, et qui m'aiment.

Merwane

Table des matières

Introduction générale ...……..……...……1

Chapitre I transformateur triphasé principe de fonctionnement et techniques de diagnostic

I.1 Introduction : 3

I.2 Historique : 3

I.3 Définition de transformateur : 3

I.3.1 Choix d'utilisation du Transformateur : 4

I.3.2 Constitution générale d'un transformateur : 6

I.3.3 Dispositions principales des transformateurs : 6

I.3.3.1 Type cuirassé : 6

I.3.3.2 Type à colonnes : 7

I.4 Constitution d'un transformateur triphasé : 8

I.5 Mode de couplage : 9

I.6 Principe de fonctionnement : 10

I.7 Rôle du transformateur : 12

I.8 Techniques de diagnostic : 12

I.8.1 Mesure électrique : 12

I.8.1.1 Mesure de rapport de transformation : 12

I.8.1.2 Mesure de courant à vide : 12

I.8.1.3 Mesure de la résistance d'enroulement : 13

I.8.1.4 Mesure de la réactance de fuite : 13

I.8.1.5 Analyse de la réponse en fréquence : 13

I.8.2 Mesure diélectriques : 13

I.8.2.1 Mesure facteur de dissipation et la capacité : 14

I.8.2.2 Mesure de la capacité des enroulements et des bornes : 14

Table des matières

I.8.2.3 Facteur de dissipation : 14

I.8.2.4 Mesure de résistance d'isolement en courant continu : 14

I.8.3 Essai en service des décharges partielles (DP) : 16

I.8.4 Mesure de la tension de rétablissement : 16

I.8.5 Analyse d'huile : 16

Chapitre II Localisation des défauts et mode de défaillances dans les transformateurs

II.1. Introduction : 18

II.2 Définition d'un défaut électrique : 18

II.2.1 Types de défaut électrique : 18

II.2.1 .1 surcharge : 18

II.2.1 .2 Le court-circuit : 18

II.2.1 .3 La surtension : 19

II.2.1.4 La baisse ou le manque de tension : 19

II.3 Défauts fréquents dans les transformateurs : 20

II.3.1 Défaut d'isolement de la partie active : 20

II.3.2 Amorçage diélectrique entre spires : 20

II.3.3 court-circuit entre spires : 21

II.3.4 Décharges Partielles : 21

II.3.5 Coupure du circuit électrique : 22

II.3.6 Déformation géométrique des enroulements : 23

II.4 Modes De Défaillances : 24

II.4.1 Mode de défaillance mécanique : 24

II.4.2 Mode de défaillance électrique : 24

II.4.3 Mode de défaillance diélectrique : 25

II.5 Définition modélisation fréquentielle du transformateur et analyse FRA : 25

Table des matières

II.6 Buts de la FRA : 26

II.7 Utilisation des tests FRA 27

II.8 Détection de défaut par FRA 27

II.9 Principe de la méthode 28

II.10 Modélisation fréquentielle du transformateur en régime MF : 30

II.10.1 Modèle de Morched (modèle universel EMTP) :..... 30

II.10.2 Le modèle RESEL :..... 31

II.10.3 Modèle de LEON : 32

II.10.4 Modèle de Chimklai : 33

II.10.5 Modélisation par inductances propres et mutuelles : 35

II.10.6 Modèle d'Andrieu : 35

II.10.7 Modèles-en du transformateur : 37

II.11 Conclusion :..... 39

Chapitre III **Application sous MATLAB**

III.1 Introduction..... 40

III.2 Objectifs de l'étude 40

III.3 Méthodologie de calcul des paramètres 40

III.4 Description du modèle approuvé 40

III.5 Calcul des paramètres 44

III.5.1 les équations de programme Z Phases 44

III.5.2 Résultats de simulation 44

III.5.2 Estimation des paramètres du modèle RLC pour chaque phase 46

III.5.3 Calcul de l'admittance de chaque cellule RLC parallèle 47

III.6 Comparaison entre Zestm_UVW..... 47

III.7 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeille artificielle (ABC)..... 50

Table des matières

III.7.1 Résultats expérimentaux 58

III.7.2 Interprétation des résultats 60

III.8 Conclusion 60

Conclusion générale……..…….……61

Références bibliographiques……...……..…… I

Annexe…….V

Listes des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Transformateur triphasé.....4

Figure I.2 : Circuit magnétique de transformateur triphasé……...…5

Figure I.3 : Trois transformateurs monophasés identiques (flux indépendants)…..6

Figure I.4 : Transformateur triphasé de type cuirassé……...……7

Figure I.5 : Transformateur triphasé de type colonne……..…….8

Figure I.6 : Disposition des enroulements autour du noyau……..8

Figure I.7 : Couplage des enroulements au primaire……...……9

Figure I.8 : Couplage des enroulements au secondaire……...……..9

Figure I.9 : Représentation symbolique……...……..10

Figure I.10 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance……11

Chapitre II

Figure II.1 : Amorçage entre enroulements……..……..……..20

Figure II.2 : Amorçage entre spires, sans court-circuit……...…...…….21

Figure II.3 : Court-circuit entre spires……...…..……...21

Figure II.4 : Décharges partielles sur des cales……..……...….22

Figure II.5 : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur……..……..……22

Figure II.6 : Déformation mécanique d'un Enroulement…….....……...23

Figure II.7 : Modèle d'un enroulement de transformateur……..……...28

Figure II.8 : Principe de la FRA…….30

Figure II.9 : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP…….……3

Listes des figures

Figure II.10 : Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL……32

Figure II.11 : Circuit de Foster en série……..33

Figure II.12 : Modèle de Cauer pour le noyau de fer……..33

Figure II.13 : Modèle du transformateur de Chimklai……34

Figure II.14 : Modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié…...35

Figure II.15 : Modèle d'Andrieu……36

Figure II.16 : Circuit équivalent de Zcc……37

Figure II.17 : Structure de modèle d'un quadripôle……..……37

Figure II.18 : Circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases…….38

Figure II.19 : Circuit parallèle RLC……...38

Chapitre III

Figure III.1 : Modèle en π simplifié d'un transformateur triphasé en régime MF41

Figure III.2 : Le circuit équivalent de la phase U.....41

Figure III.3 : Le circuit équivalent de la phase V.....41

Figure III.4 : Le circuit équivalent de la phase W.....42

Figure III. 5 : Courbe de l'impédance ZU.....42

Figure III. 6 : Courbe de l'impédance ZV.....43

Figure III. 7 : Courbe de l'impédance ZW.....43

Figure III.8 : Courbe de réponse en fréquence obtenue par l'estimation correspondant la phase U.....44

Figure III.9 : Courbe de réponse en fréquence obtenue par l'estimation correspondant la phase V.....45

Figure III. 10 : Courbe de réponse en fréquence obtenue par l'estimation correspondant la phase W.....45

Figure III.11 : Modèle de circuit d'une branche de noyau de transformateur.....46

Listes des figures

Figure III.12.a : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase U.....47

Figure III.12.b : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase U avec leurs valeurs maximales.....48

Figure III.13.a : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement

Simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase V.....48

Figure III.13.b : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement

Simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase V avec leurs valeurs maximales.....49

Figure III.14.a : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase W……...49

Figure III.14.b : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase W avec leurs valeurs maximales……..……50

Figure III.15 : Organigramme pour la procédure ABC de calcul des paramètres du modèle approuvé…….……..……...54

Figure III.16 : La réponse optimisée par l'ABC de l'impédance Z en fonction de fréquence pour la phase U (considéré comme référence)……..……55

Figure III.17 : La réponse de meilleur solution du l'impédance Zu en fonction de fréquence obtient par l'ABC pour la phase U…….……..56

Figure III. 18 : La réponse optimisée par l'ABC de l'impédance Z en fonction de fréquence pour la phase V (considéré comme référence)…….56

Figure III. 19 : La réponse de meilleur solution du l'impédance Zv en fonction de fréquence obtient par l'ABC pour la phase V……57

Figure III. 20 : La réponse optimisée par l'ABC de l'impédance Z en fonction de fréquence pour la phase W (considéré comme référence)…….57

Listes des figures

Figure III. 21 : La réponse de meilleur solution du l'impédance Zw en fonction de fréquence obtient par l'ABC pour la phase W……..58

Listes des tableaux

Tableau I.1 : Domaine d'interprétation de PI……15

Tableau III. 1. Algorithme ABC……....51

Tableau III.2. Valeurs des paramètres obtenues……59

Glossaire des termes techniques

R : Resistance.

L: L'inductance.

C: capacitive

KV: kilovolt.

Ø: flux magnétique.

Hz: Hertz.

MHz: Méga Hertz.

Ω : ohm.

MΩ: Méga ohm.

N : Nombre de spire.

PI : L'indice de polarisation.

DP : décharges partielles.

KHz : Kilo Hertz.

HT : Haute tension.

BT : base tension.

Zwinding : Impédance de l'enroulement [Ω].

FRA : Technique d'analyse de la réponse en fréquence.

Zcc : Impédance de court-circuit.

RLC : résistances, inductances et capacitances.

MF : Moyenne Fréquence.

EMTP : Programme des transitoires électromagnétiques (Electromagnetic Transients program).

RESEL : Ingénieurs d'Etude et de Recherche de l'Electricité (Engineers of Study and Research of the Electricity).

Glossaire des termes techniques

F : Farad.

H : Henry.

BF : Basse fréquence.

MF : moyenne fréquence.

BP : Bande passante.

Ph : Phase.

RL : Résistance-Inductance.

ABC : Artificiel Bee Colony.

ZU : impédances phase U.

ZV : impédances phase V.

ZW : impédances phase W.

Yi : Admittance.

Esprech : Espace de recherche.

GM val : Gamme de valeur utilisée.

Rand : Choix aléatoire (Randomly).

Sorc Norr : Source de nourriture.

D : La longueur du vecteur (Dimension).

Repmat : Répétition (Replicate).

Bornes sup : Bornes supérieures.

Bornes inf : Bornes inférieures.

ملخص :

يعد المحول عنصرًا مهمًا في أنظمة النقل والتوزيع في شبكات الطاقة.

من أجل تحديد معلمات النموذج المعتمد في نطاق ترددات متوسطة التي تتراوح من 0 هرتز إلى 20000 هرتز للملف الضغط العالي للمحول، تم اقتراح المنهجية التالية:

1. يتم تطبيق محاكاة تحليل استجابة التردد على كل مرحلة من المراحل الثلاث للمحول.
2. يسمح تحليل استجابة التردد التي تم الحصول عليها بحساب معلمات النموذج المعتمد باستخدام طرق مختلفة في حالتنا يتم استخدام إجراءين:

- طريقة تحليلية لتقدير المعلمات.
- الطريقة خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية

الكلمات المفتاحية:

ترددات متوسطة، الضغط العالي، تحليل استجابة التردد، خوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية.

Résumé :

Le transformateur est un élément important dans les systèmes de transport et de distribution dans les réseaux électriques.

Afin de déterminer les paramètres du modèle adopté en MF dans une gamme de fréquences variant de 0Hz à 20000Hz pour l'enroulement HT du transformateur, on propose la méthodologie suivante :

1. Une simulation FRA est appliquée sur chacune des trois phases du transformateur.
2. Une analyse de la réponse fréquentielle obtenue permet le calcul des paramètres du modèle adopté en utilisant différentes méthodes. Dans notre cas deux procédures sont utilisées :
   - Méthode analytique d'estimation des paramètres.
   - Méthode intelligente (ABC).

Mots clés :

Moyenne Fréquence, Haute tension, Analyse de la Réponse Fréquentielle, Colonie d'abeilles Artificielles.

Abstract:

The transformer is an important part of transmission and distribution systems in electrical networks.

In order to determine the parameters of the model adopted in MF in the frequency range from 0 Hz to 20,000 Hz for the HV coil of the transformer, the following methodology is proposed:

1. The FRA simulation is applied to each of the three phases of the transformer.
2. The analysis of the frequency response obtained makes it possible to calculate the parameters of the adopted model using different methods. In our case, two procedures are used:

- An analytical method for estimating parameters.
- The Smart Way (ABC).

Keywords:

Medium frequency, high voltage, frequency response analysis, artificial bee colony.

Introduction générale

La production de l'énergie électrique et même son transport se fait en triphasé. Par ailleurs on démontre facilement que le transport de l'énergie électrique en HT est plus économique d'où la nécessité d'utiliser des transformateurs élévateurs à la sortie de centrale de production et abaisseur tout proche des points de consommation.

La distribution électrique se compose de trois phases, ce qui est plus économique, il est donc nécessaire d'utiliser le convertisseur de mode pour augmenter la tension uniquement en sortie de l'installation de production, et d'utiliser un autre mode abaisseur avant chaque point de consommation.

Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courants variables en un ou plusieurs systèmes de courants variables, d'intensité et de tension généralement différents, mais de même fréquence. Cet appareil n'effectue donc qu'un transfert d'énergie par voie électromagnétique. Il comporte deux enroulements montés sur un circuit magnétique feuilleté, l'un est dit "Primaire" reçoit de la puissance active de la source et l'autre dit "Secondaire" fournit de la puissance active au circuit d'utilisation. Le transformateur peut fonctionner en abaisseur ou en élévateur.

Le transformateur est un élément important dans les systèmes de transport et de distribution dans les réseaux électriques.

La méthode des diagnostics consiste à la détection d'un changement anormal dans le comportement ou dans l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Elle repose sur la connaissance d'un modèle capable de décrire le fonctionnement du système à surveiller [1].

La technique d'analyse de la réponse en fréquence (FRA) est une méthode qui permet de détecter les défauts mécaniques dans le transformateur. La réponse FRA d'un transformateur est déterminée par sa géométrie et les propriétés de son matériau. Cette réponse peut être considérée comme l'empreinte du transformateur. Tout changement mécanique et /ou électrique dans le transformateur engendre la modification de la réponse fréquentielle de ses enroulements [2].

L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles ou Artificial Bee Colony (ABC) a été introduit par et développé pour les différents problèmes d'optimisation. C'est un algorithme à population, d'inspiration naturaliste, basé sur le butinage des abeilles [3].

Dans ce cadre, le présent travail est une étude détaillée du transformateur de puissance en régime fréquentiel, dont son principe de fonctionnement, ses différents modèles,

son mode des défaillances et les techniques de diagnostic qui lui sont associées sont présentées.

Pour atteindre notre objectif, nous avons subdivisé notre mémoire en trois chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les transformateurs de puissance tels que le principe de fonctionnement et les différents éléments qui constituent cette machine.

Le deuxième chapitre représentera les défauts fréquents dans les transformateurs, la mode de défaillance, la modélisation fréquentielle du transformateur ainsi que l'analyse FRA.

Nous aborderons dans le troisième chapitre la modélisation et analyse fréquentielle dans les enroulements d'un transformateur triphasé en régime MF par l'utilisation la méthode de l'algorithme Artificial Bee Colony(ABC).

Enfin, on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux.

Chapitre I

Transformateur triphasé, principe de fonctionnement et techniques de diagnostic.

I.1 Introduction :

Les centrales électriques étant souvent éloignées du consommateur, le rôle du transformateur, est d'acheminer l'énergie électrique de son point de production, jusqu'à son point de consommation.

Les défauts qui peuvent affectées les transformateurs sont de différentes catégories (internes, externes).

Pour obtenir une connaissance de l'état des équipements et d'adopter les solutions les plus adéquates qui garantissent le fonctionnement correct des transformateurs, il est nécessaire d'effectuer périodiquement des inspections et des travaux de réparation.

Dans ce qui suit, une étude théorique détaillée du transformateur ainsi que les différentes défaillances.

I.2 Historique :

En 1820, Hans Christian Oersted, physicien danois a découvert qu'un conducteur véhiculant un courant générait un champ magnétique. Quelques années plus tard, en1830, Josef Henry donne corps aux notions d'induction et de self induction. En 1831 l'anglais Michael Faraday à une série d'expériences avec un appareil constitue d'un anneau de fer et d'enroulements de fil cuivre isolé.

En 1832 Lucien Goulard (1850-1880), jeune électricien français, chimiste de formation, présente à la société Françaises des Électriciens un « générateur secondaire », dénomme depuis Transformateur

I.3 Définition de transformateur :

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation. Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou Plusieurs enroulements fixes, inductive ment couplés et destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, fréquence nombre de phases) de l'énergie électrique à courant alternatif.

Seuls les transformateurs de puissance permettent, très économiquement, de minimiser les pertes en ligne, en assurant le transport de l'énergie à longue distance sous. Tension élevée (200kVet 400kV et plus entre phases) [4], puis d'abaisser ensuite cette tension, étape par étape pour alimenter les réseaux de distribution régionaux et locaux jusqu'a la tension d'alimentation domestique.

La compréhension des phénomènes électromagnétiques qui régissent le fonctionnement des transformateurs et la détermination de ses pertes, constitue une étape déterminante pour l'exploitation optimale de ces appareils et également pour leur conception. La modélisation des transformateurs est une tâche très difficile due à l'introduction des caractéristiques du noyau magnétique tel que la saturation, l'hystérésis et les pertes par courants de Foucault aussi bien que de sa topologie et la configuration de ses enroulements ainsi, une variété de méthodes pour sa modélisation et analyse de son comportement pour différents états opérationnels ont été développées. On peut distinguer deux approches de modélisation :

• Approche locale orientée vers le calcul numérique ou bien semi-analytique.

• Approche globale orientée vers le calcul analytique basé sur un schéma équivalent électrique ou magnétique (réseau de réluctances).



Figure I.1 : Transformateur triphasé

I.3.1 Choix d'utilisation du Transformateur :

La production de l''énergie 'électrique et son transport se fait généralement en triphasé Par ailleurs on démontre facilement que le transport de l''énergie en haute tension est plus économique d'où la nécessité d'employer des transformateurs élévateurs à la sortie de

centrale de production et abaisseur tout proche des centres de consommation. En effet pour modérer la tension d'un système triphasé on peut choisir d'utiliser :

- **Un seul transformateur triphasé :**

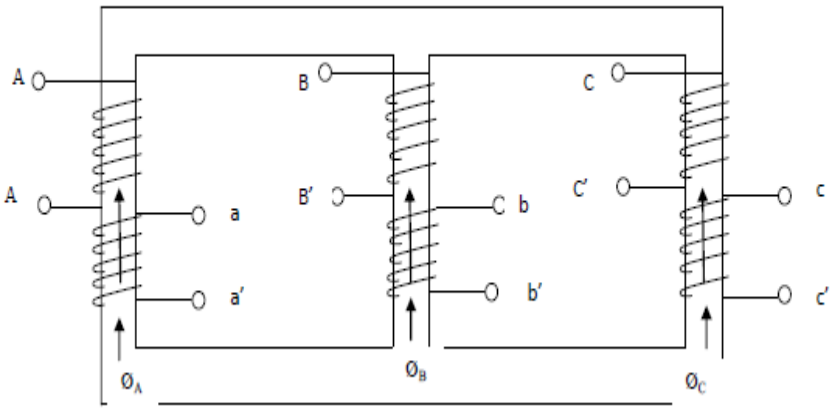


Figure I.2 : Circuit magnétique de transformateur triphasé

Remarque :

On convient de repérer les bornes comme suit :

- Enroulements primaires par des lettres majuscules(A.B.C)
- Enroulements secondaires par des lettres minuscules (a.b.c)
- Les bornes désignées par la même lettre sont dites Homologues

- **Trois transformateurs monophasés :**

Un transformateur est un quadripôle formé de deux enroulements enlaçant un circuit magnétique commun. C'est une machine statique permettant, en alternatif la modification de certaines grandeurs (tension, courant) sans changer leur fréquence.

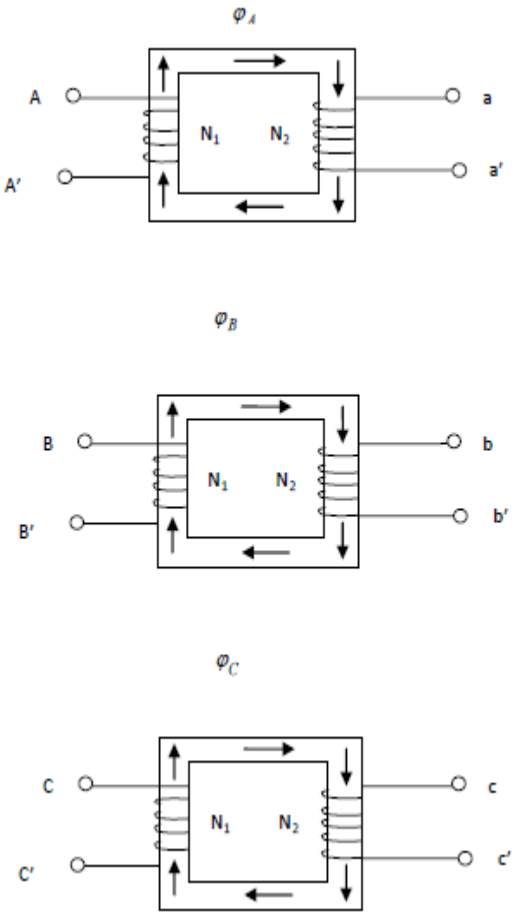


Figure I.3 : Trois transformateurs monophasés identiques (flux indépendants)

I..32 Constitution générale d'un transformateur :

Le circuit magnétique est formé de trois noyaux fermés par 2 culasses .Il est fabriqué en tôles magnétiques feuilletées .chaque noyau porte :

- Un enroulement primaire.
- Un ou plusieurs enroulements.

I..33 Dispositions principales des transformateurs :

I..33.1 Type cuirassé :

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal. Le circuit magnétique, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et des enroulements

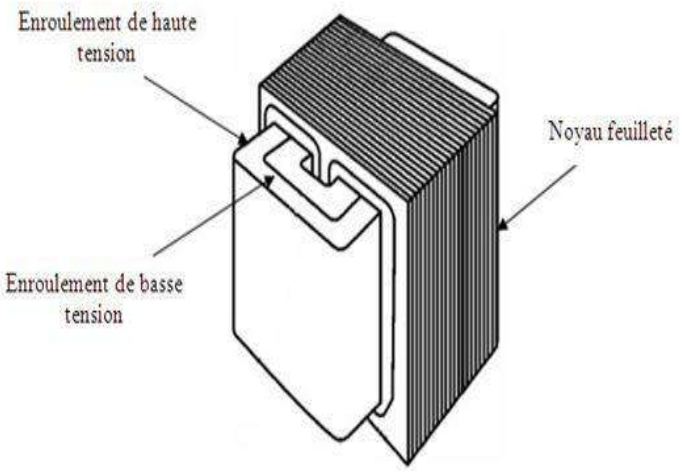


Figure I.4 : transformateur triphasé de type cuirassé

Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions ou les surtensions transitoires sont fréquentes.

Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtension sur les enroulements.

Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages

I..33.2 Type 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.

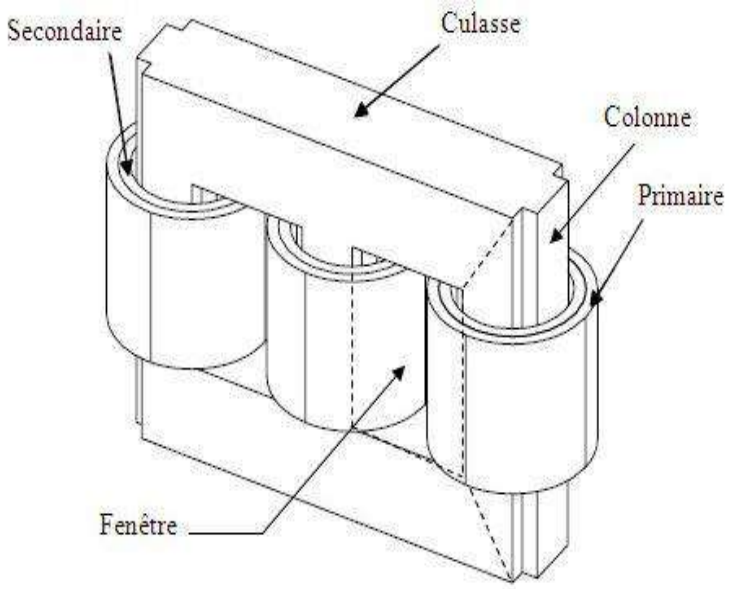


Figure I.5 : Transformateur triphasé de type colonne

I.4 Constitution d'un transformateur triphasé :

Le circuit magnétique est forme de trois noyaux fermés par 2 culasses .Il est fabrique entôles Magnétiques feuilletées .chaque noyau porte :

- Un enroulement primaire
- Un ou plusieurs enroulements secondaires

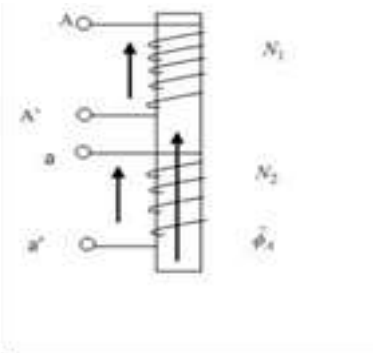


Figure I.6 : disposition des enroulements autour du noyau

I.5 Mode de couplage :

Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile (Y) soit en triangle(D).

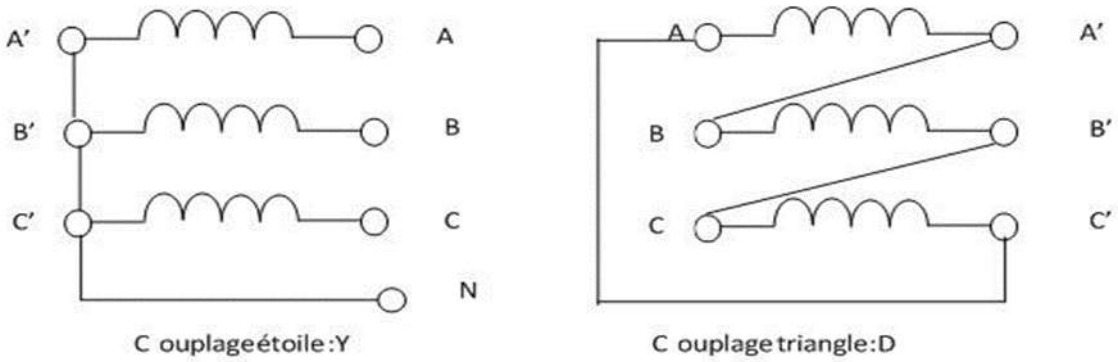


Figure I.7 : Couplage des enroulements au primaire

- Au secondaire les enroulements peuvent être couples de 3 manières déférentes : étoile(y), triangle(d) et zigzag(z).

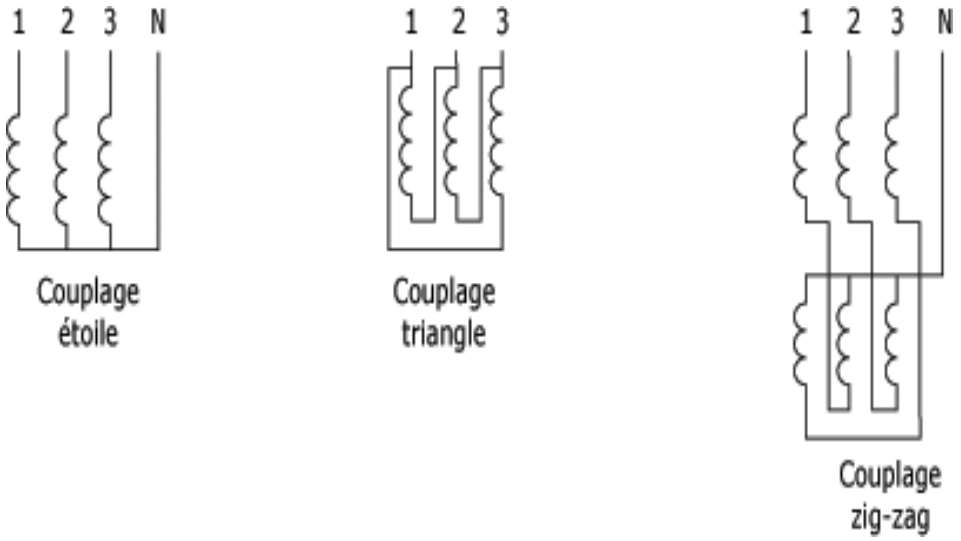


Figure I.8 : Couplage des enroulements au secondaire

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

1. Y-y : étoile étoile
2. Y-d : étoile-triangle
3. Y-z : Etoile-zigzag
4. D-y : triangle- Etoile
5. D-d: triangle –triangle
6. D-z: triangle-zigzag

On donne ci-dessous les représentations symboliques des couplages normalises chacune des schémas de la figure suivante est une représentation conventionnelle qui suppose que les deux enroulements d'un même noyau sont rabattus de part et d'autre de la plaque `a bornes. Compte tenu de la remarque précédente on pourrait dire que :

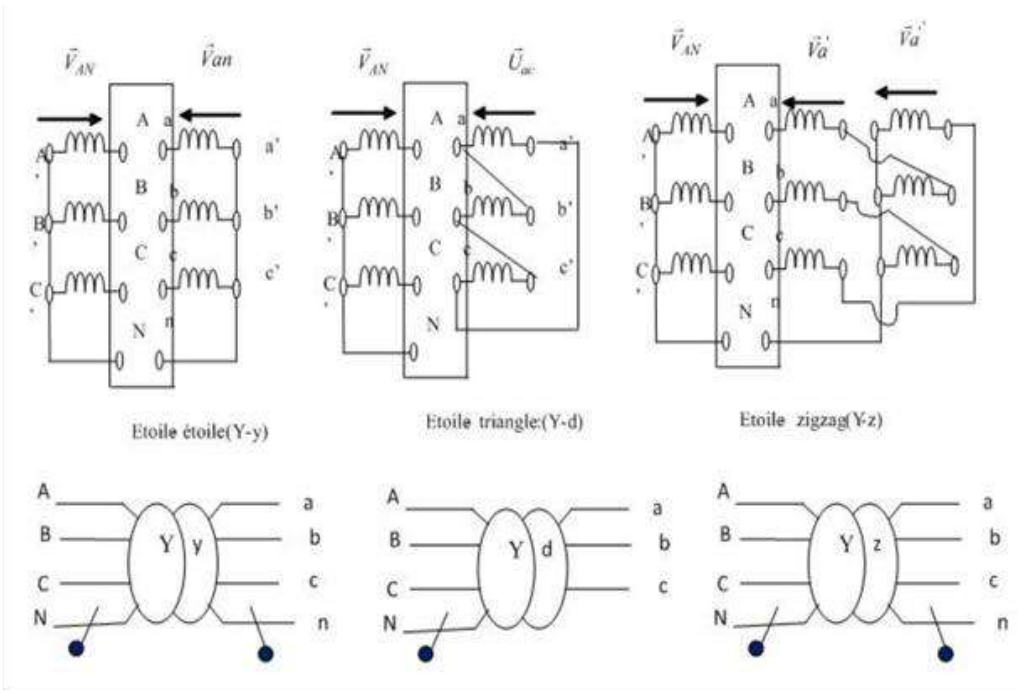


Figure I.9 : Représentation symbolique

I.6 Principe de fonctionnement :

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

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire. Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique tel que montré par la figure I.10.

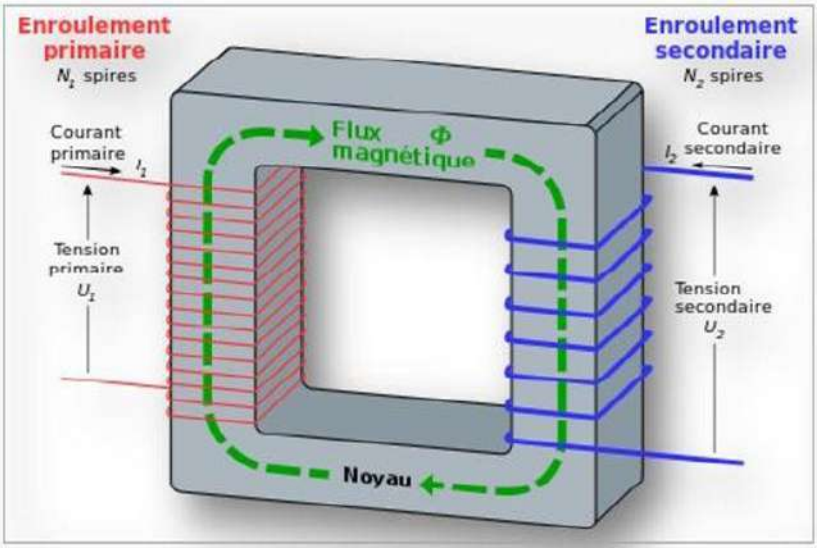


Figure I.10 : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance

La figure I.10 montre un simple transformateur ayant deux enroulements, que le nombre de spires de l'enroulement primaire soit N et celui du secondaire soit N2 [5].

Un transformateur idéal ou parfait est 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 sont négligées, le rapport du nombre des spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine le rapport de transformation du transformateur.

I.7 Rôle du transformateur :

- ✓ Elever la tension pour permettre le transport de l'énergie électrique.
  - ➢ **Exemple :**

  Transformateurs élévateurs d'une Centrale.
- ✓ Connecter deux réseaux de tensions différentes.
  - ➢ **Exemple :**

  Autotransformateurs d'interconnexion 400/225 kV.
- ✓ Abaisser la tension pour les besoins des utilisateurs.
  - ➢ **Exemples :**

Transformateurs de postes 225/64.5 kV, transformateurs d'auxiliaires de centrale, transformateurs de distribution, transformateurs de traction électrique.

I.8 Techniques de diagnostic :

L'utilisation des techniques de diagnostic, à une grande importance car elle permet d'évaluer l'état des composantes du transformateur et de programmer des activités préventives ou rectificatives, de manière à faciliter les programmes des travaux de maintenance et réduire l'indisponibilité.

I.8.1 Mesure électrique :

Les mesures électriques effectuées sur les transformateur et utilisés comme outil de diagnostic de défaut [6] qui sont :

I.8.1.1 Mesure de 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

Les mesures en monophasé peuvent être préférables pour la recherche de défauts, permettent ainsi de localiser précisément la phase en défauts, si existante

I.8.1.2 Mesure de courant à vide :

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 contient une composante de magnétisation et une composante de perte [6].L'essai du courant d'excitation permet d'évaluer la partie active du transformateur

Problème associé au noyau (des tôles coupées, des joints défectueux). Problème associé au bobines (des spires en court-circuité ou en circuit ouvert).

I.8.1.3 Mesure de la résistance d'enroulement :

La résistance de chaque enroulement est mesurée en courant continu, si l'écart de la valeur mesurée de la résistance des enroulements est supérieur à 5% de la valeur de résistance d'enroulement à la sortie d'usine cela indique la présence d'un défaut de type coupure, au court-circuit entre spire ou un point chaud

I.8.1.4 Mesure de la réactance de fuite :

La mesure de la réactance de fuite ou impédance de court-circuit permet par comparaison à la valeur de mesures lors des essais en usine du transformateur de détecter des changements très importants (inferieur 5%) qui devraient nous amener à des investigations plus profondes (circuit ouvert ou des courts circuits entre spires, ou entre enroulements et cuve).

I.8.1.5 Analyse de la réponse en fréquence :

L'analyse de la réponse en fréquence d'un enroulement donné, alimenté par une tension à fréquence variable de quelques Hz à quelques MHz, donne une signature fréquentielle unique d'un enroulement par rapport à son environnement mécanique et électrique [7].

I.8.2 Mesure diélectriques :

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

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

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

- Mesure de facteur de puissance.

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

I.8.2.1 Mesure facteur de dissipation et la capacité :

Les mesures de la capacité et du facteur de puissance et de dissipation dans le but d'étudier l'état d'isolation (vieillissement de l'huile, l'augmentation de la tenue en eau) des transformateurs de puissance et leurs traversées sont effectuées entre les enroulements et entre les enroulements et la cuve les bornes sont mises en court-circuit et la tension d'essai est appliquée à l'un des enroulements pendent que le courant à travers l'isolation est mesuré sur l'enroulement opposé ou sur la cuve sur les traversées la tension est appliquée au conducteur principal pendant que l'on mesure le courant sur la prise de mesure .

I.8.2.2 Mesure de la capacité des enroulements et des bornes :

Une variation de la capacité d'isolement par rapport à la valeur de référence lors des essais de réception prouve l'existence de conditions anormales, comme la présence d'humidité, de sections de conducteurs court-circuité ou déformation géométrique de bobinage.

I.8.2.3 Facteur de dissipation :

Le facteur de dissipation, également appelé tan(δ), est calculé via la tangente de l'angle δ entre le courant mesuré et le courant idéal qui existerait en l'absence de pertes.

Une fois les mesures effectuées et comparées aux valeurs de référence, un changement indique existence détériorations de l'isolement (vieillissement de papier, la présence d'eau dans le papier, un mauvais état d l'huile, décharge électrique)

I.8.2.4 Mesure de résistance d'isolement en courant continu :

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

a) Principe de mesure :

Consiste à court-circuité toute les bornes de l'enroulement concerné et y appliquer une tension 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 le noyau sont branchés à la terre [6].

b) Interprétation

Il existe deux méthodes d'interprétations :

1) Le rapport d'absorption :

La mesure dure une minute. Les lectures sont respectivement prises de 15 à 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'acception, cependant comme règle générale aucun enroulement ne devra avoir moins de 200MΩ et le rapport d'absorption.

2) Indice de polarisation :

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

Les critères d'acception pour le PI sont :

Tableau I.1 : Domaine d'interprétation de PI

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

I.8.3 Essai en service des décharges partielles (DP) :

Les deux méthodes les plus utilisées pour la détection des DP sont La détection des signaux acoustiques et la mesure des signaux électriques produits par la DP.

Les impulsions des DP produisent des ondes de contraintes mécanique, qui se propagent à travers l'huile environnante (dans la gamme de 100 à 300 kHz).Pour détecter ces ondes, des détecteurs d'émission acoustique sont montés sur les parois du réservoir du transformateur ou dans l'huile à l'intérieur du même réservoir. Les méthodes acoustiques de détection des DP sont limitées par l'atténuation du signal et les mesures électriques sont limitées par des problèmes d'interférence électromagnétique.

Les DP peuvent être détectées indirectement en utilisant des techniques chimiques telles que la mesure des produits de dégradation produits par les DP [8].

I.8.4 Mesure de la tension de rétablissement :

La méthode de mesure de la tension de rétablissement est employee pour détecter l'état de isolation huile-papier et la teneur en eau de l'isolation.

Cette méthode se fonde surle principe de la polarisation inter-faciale des matériaux diélectrique stratifies [9].

I.8.5 Analyse d'huile :

Le fonctionnement dans des 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 entretient 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 [9].

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.

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.

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les transformateurs, nous avons aussi donné un aperçu sur les principaux éléments qui les constituent, leur rôle et leur importance dans cette machine statique.

A la fin de ce chapitre, nous avons étudiés les différences techniques de diagnostic qui nous permettent de détecter les défauts qui exister dans les transformateurs de puissances.

Chapitre II

Localisation des défauts et mode de défaillances dans les transformateurs.

II.1. Introduction :

Les transformateurs de puissance sont généralement très fiables, avec une espérance de vie entre 20 et 35 ans. Dans la pratique, elle peut s'étaler jusqu'à 60 ans en utilisant une maintenance et une exploitation convenables. Cependant, toute défaillance d'un transformateur est potentiellement coûteuse en réparation ou en remplacement par un autre.

Son exploitation continue ou exceptionnelle dans un régime de surcharge pour alimenter une large population peut entraîner son vieillissement prématuré et raccourcir d'une façon consistante sa vie, ce qui accroît considérablement le risque de défaillance.

Les pannes sont généralement initiées par des conditions sévères, comme la foudre, les manœuvres sur le réseau, les courts circuits, ou autres incidents.

II.2 Définition d'un défaut électrique :

Une augmentation ou une diminution anormale des grandeurs nominales dans un circuit électrique constitue un défaut ou une perturbation. Ce sont le plus souvent les variations anormales de la tension, de l'intensité et de la fréquence qui sont à l'origine de ces perturbations.

II.2.1 Types de défaut électrique :

II.2.1 .1 La surcharge :

- **Définition :**

Elévation de l'intensité de 1 à 10 In d'un circuit due par exemple à une surabondance des récepteurs.

- **Conséquences :**

Echauffement lent et progressif des parties actives, des masses métalliques, des isolants moyens de protection : Relais thermique fusible déclencheur thermique du disjoncteur.

II.2.1 .2 Le court-circuit :

- **Définition :**

Elévation brutale de l'intensité de 10 à 1000 In dans un circuit due à une liaison accidentelle de deux points de potentiel différents (PH et N).

- **Conséquences :**

Arc électrique, échauffement important pouvant entraîner la fusion des parties actives (soudure des contacts, projection de particule).

- **Moyens de protection :**

Déclencheur magnétique du disjoncteur, fusible.

II.2.1 .3 La surtension :

- **Définition :**

Augmentation soudaine et importante de la tension due par exemple à un coup de foudre, à un contact entre HTA et BTA.

- **Conséquences :**

Claquage des isolants avec pour conséquence des court-circuits éventuels.

- **Moyens de protection :**

Limiteur de surtension, relais de surtension, parafoudre.

II.2.1.4 La baisse ou le manque de tension :

- **Définition :**

Chute de tension, trop importante dans un réseau, déséquilibre d'un réseau triphasé de distribution.

- **Conséquences :**

Mauvais fonctionnement des récepteurs Moyens de protection : Relais à minimum de tension, alimentation autonome.

II.3 Défauts fréquents dans les transformateurs :

II.3.1 Défaut d'isolement de la partie active :

Le défaut d'isolement de la partie active est caractérisé par la perte, ou la très forte diminution, d'isolement d'un circuit électrique par rapport à son environnement, dont il doit être normalement isolé [10-13].

➔ **Typiquement ce cas est rencontré dans les situations suivantes [11] :**

- Amorçage entre enroulements normalement isolés entre eux figure (II.1).
- Amorçage entre la masse (la cuve ou le circuit-magnétique typiquement) et un enroulement, une connexion ou une traversée.

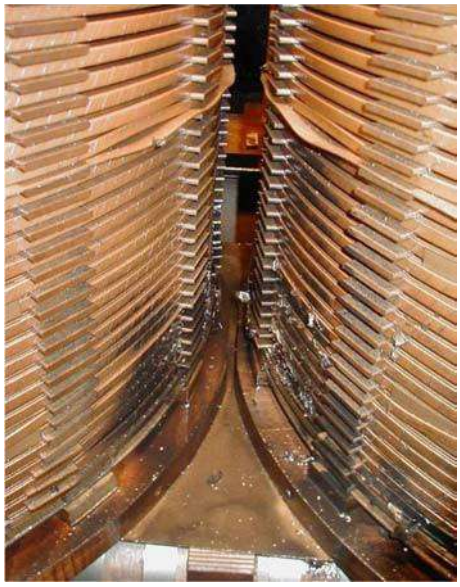


Figure II.1 : Amorçage entre enroulements [10], [11].

II.3.2 Amorçage diélectrique entre spires :

C'est un amorçage entre spires d'un même enroulement, sans que les conducteurs soient mis en court-circuit entre eux figure (II.2).

L'isolant entre ces spires est donc dégradé, voire détruit, localement [11], [13].



Figure (II.2) : Amorçage entre spires, sans court-circuit [10], [11]

II.3.3 court-circuit entre spires :

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement qui devraient être normalement isolées entre elles Figure(II.3).

Cela arrive souvent suite à un amorçage diélectrique entre spires entretenu, ou le déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements. Ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas [10], [11].



Figure II.3 : Court-circuit entre spires [10], [11].

II.3.4 Décharges Partielles :

Les décharges partielles, sont un phénomène local de micro décharges dues à une faiblesse de l'isolant. Un exemple entre des cales de bobinages est visible sur la Figure (II.4).

Les décharges en elles-mêmes sont rarement destructives, mais leur évolution peut l'être. Car à terme le carbone, conducteur, qu'elles génèrent peut se propager et diminuer la tenue diélectrique entre certains éléments sous tension et ainsi aller jusqu'à provoquer un amorçage [10], [11].

Des mesures de décharges partielles sont possibles mais nécessitent des moyens de mesures haute tension lourds. Ils sont donc généralement réalisés au cas par cas en dehors des usines de transformateurs [11], [12].



Figure II.4 : Décharges partielles sur des cales [10], [11].

II.3.5 Coupure du circuit électrique :

La plupart des cas de coupure d'un circuit électrique sont le résultat d'un défaut interne, suite à [10], [11] :

- un amorçage de puissance entre spires, qui les fusionne et coupe le conducteur.
- un point chaud qui dégénère, au niveau des brasures des connexions internes, pouvant aller du débrasage jusqu'à la fusion du contact figure (II.5).
- un mauvais alignement d'un régleur.



Figure II.5 : Coupure suite à la fusion d'un Conducteur [10], [11].

II.3.6 Déformation géométrique des enroulements :

Il est possible mécaniquement de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement suite à des courts-circuits extérieurs qui provoquent des courants extrêmement élevés, qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes Figure (I.10), à noter sans amorçages entre spires, ni court-circuit internes).

Il est possible de déformer un enroulement, ce qui fragilise inévitablement son isolement papier se trouvant au contact des conducteurs, sans nécessairement avoir d'amorçages entre spires ou à la masse. Un transformateur avec une telle déformation mécanique peut dans certains cas fonctionné à son régime nominal. Il reste néanmoins fragilisé et il n'est absolument pas certain qu'il puisse ainsi tenir des perturbations de court-circuit ou de surtensions ultérieures sans amorcer [11], [12].



Figure II.6 : Déformation mécanique d'un Enroulement [10], [11].

II.4 Modes De Défaillances :

II.4.1 Mode de défaillance mécanique :

Les scénarises typiques suivants d'une défaillance d'un transformateur liée à la cause mécanique sont comme suit : Perte de serrage - Distorsion de la géométrie d'enroulement => apparence de DP => arborescence de décharges progressives => défaillance.

Déformation de la géométrie d'enroulement + surtension de manœuvre => étincelle entre les bobines => évolution excessive de gaz.

L'expérience a montré que plus de 90% des modes de défaillance mécanique ont été associés avec la déformation circonférentielle des enroulements internes. Comme, il a été confirmé également que le transformateur peut survivre pendant des années avec cette anomalie jusqu'au relâchement dans son isolation. La déformation circonférentielle des enroulements provoque des changements parfois très remarqués dans le diamètre des spires et des enroulements, ce qui changera la dimension du canal de fuite. Ces changements mécaniques sont souvent diagnostiqués par des méthodes modernes telles que l'analyse par réponse fréquentielle(FRA), la mesure des capacitances, les mesures de la réactance de fuite et les mesures acoustiques.

Au cours des 15 dernières années, environ 40% des transformateurs endommagés ont été identifiés sur le terrain et le diagnostic a été confirmé plus tard par l'inspection interne.

II.4.2 Mode de défaillance électrique :

La plupart de défauts électriques sont associés à la surchauffe des contacts, des joints et des connections, et peuvent être attribués aux problèmes de fiabilité au cours du processus de dégradation rapide.

Les défauts typiques qui affectent la fiabilité à court terme dans le circuit de courant sont :

La surchauffe d'isolation des connexions et des conducteurs lors d'un court-circuit.

La surchauffe des connexions de traversée BT avec menace d'un court-circuit à la terre.

La surchauffe des contacts (mobile et fixe) du régleur en charge lors d'un court-circuit entre les phases. [14]

II.4.3 Mode de défaillance diélectrique :

a) L'isolation Majeure : Les causes typiques de défaillance dans l'isolation majeure sont les suivantes :

- l'humidité excessive dans la cellulose. Cette anomalie est essentiellement inhérente au transformateur avec l'ouverture du système de préservation ou à ceux qui ont une jointure dégradée.
- La distribution d'humidité pendant la vie de transformateur est répartie d'une façon hétérogène. La plupart de la concentration en eau est stockée dans les structures cellulosiques froides, alors qu'environ 1 à 2 % reste dans l'huile.

- Contamination de la surface d'isolation par adsorption des produits de vieillissement d'huile trop polaires ou de dépôts de particules conductrices et des produits de vieillissement insolubles dans les zones ou le champs électrique est élevé.
- La contamination des surfaces peut provoquer une distorsion du champ électrique et une réduction de la tenue diélectrique du système d'isolation donnant naissance aux décharges partielles. [15]

b) L'isolation mineure :

- Une Surchauffe donnée peut conduire à l'accélération du vieillissement de l'isolation.
- L'humidité excessive dans le papier entraîne à la formation de bulles lors de ces surchauffes.
- L'eau libre présente aux basses températures, en contact avec cette isolation peut entraîner son claquage. [15]

II.5 Définition modélisation fréquentielle du transformateur et analyse FRA :

L'Analyse de la réponse en fréquence (FRA) est un outil qui peut donner une indication du mouvement du noyau ou d'enroulement dans les transformateurs. Ceci est fait en effectuant une mesure simple, tout en regardant a quel point un enroulement de transformateur peut transmettre un signal de basse tension qui varie en fréquence.

Tout cela est lié à son impédance, dont les éléments capacitifs et inductifs sont intimement distribués dans la construction physique du transformateur.

Les changements de la réponse en fréquence mesuré par des techniques FRA peuvent indiquer un changement physique à l'intérieur du transformateur, dont la cause doit être en suite identifiée et analysé.

La FRA est généralement appliquée à un réseau complexe d'éléments passifs. Un transformateur est considéré comme un réseau complexe de composants RLC, qui est représenté par trois types d'éléments, des résistances, d'inducteurs et des condensateurs. Comme un réseau de distribution contient un nombre infini de petits composants RLC, Les trois éléments sont utilisés pour représenter la résistance des enroulements de cuivre, l'inductance des bobines d'enroulement et la capacité des couches d'isolation entre les bobines,

entre un enroulement et un noyau, entre un noyau et la cuve, et encore entre la cuve et un enroulement, etc.

L'objectif principal de la FRA est de déterminer comment l'impédance d'un transformateur d'essai se comporte sur une gamme de fréquences appliquées. Les propriétés réactives d'un transformateur d'essai dépendent des changements de fréquence.

La plupart des transformateurs produisent une résonance très distincte dans une plage de fréquence spécifiée. Dans le cas des transformateurs, les fonctions de transfert sont utilisées pour la modélisation d'enroulement et des études transitoires.

La fonction de transfert d'un réseau RLC est le rapport de sortie et d'entrée de la réponse en fréquence, lorsque les états initiaux d'un tel réseau sont égaux à zéro. La relation entre phase et l'amplitude peut être extraite à partir des sorties de la fonction de transfert.

L'idée de l'application de la FRA pour l'évaluation de l'état d'enroulement du transformateur est basée sur le fait que le déplacement ou la déformation d'enroulement change les propriétés géométriques, qui sont liées à ses paramètres capacitives et inductives internes. Les changements de ces paramètres modifient par conséquent les réponses de fréquence d'enroulement, qui peuvent être observées par la mesure de la fonction de transfert.

II.6 Buts de la FRA :

Les objectifs de la FRA sont la détection de :

- Déformations de la géométrie des enroulements (Axiales et radiales)
- Connexions internes interrompues.
- Enroulements déformés "Buckling".
- Enroulements ouverts ou en court-circuit.
- Défaut sur le circuit magnétique (tôles en court-circuit).
- Défaut de mise à terre du noyau.
- Défaut de connexions des barrières.

II.7 Utilisation des tests FRA : [16], [18].

Les applications typiques de la mesure de l'Analyse de la réponse en fréquence (FRA) sont :

- Contrôle du transformateur après le test en court-circuit.
- Vérification de l'intégrité des transformateurs après un transport.
- Evaluation de l'état d'un transformateur ayant été soumise à des courants de défaut transitoires élevés.
- Mesures de diagnostic de routine.
- Diagnostic consécutif à une alarme du transformateur ou un déclenchement de protection.
- Test consécutif à des changements significatifs des valeurs contrôlées en ligne (ex : gaz dissous).
- Inspection approfondie consécutive à l'observation de résultats de tests inhabituels.
- Après un séisme.
- Recherches scientifiques.

II.8 Détection de défaut par FRA : [20]

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

Le principal rôle de FRA est de détecter des défauts mécaniques, qui ne peuvent être détectés

Par d'autres mesures Les principaux défauts détectés par FRA sont :

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

Cependant, La mesure par FRA est souvent la seule méthode qui peut détecter les mouvements axiaux d'enroulements. Elle détecte également les mouvements radiaux, qui peuvent être aussi vérifiés par les essais de réactance de fuite. Il est utile de mettre en

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

II.9 Principe de la méthode : [17], [18], [19].

Un transformateur comprend un grand nombre de capacitances, d'inductance et de résistances donc un circuit très complexe comme schématisé dans la figure(II.7) qui génère une empreinte digitale ou une signature unique lorsque des signaux sont injectés à des fréquences discrètes, et que des réponses sont représentées sous forme de courbe.

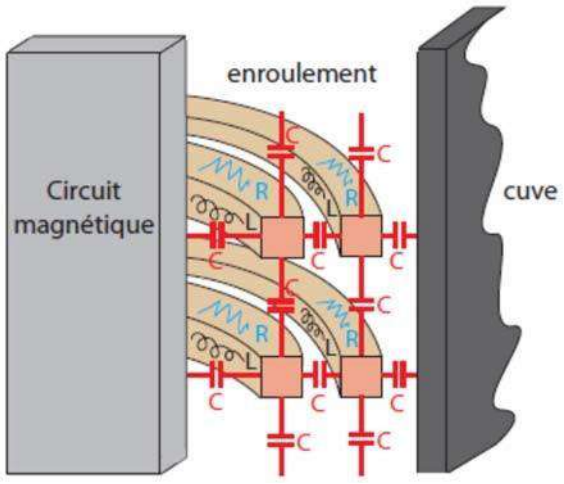


Figure II.7 : Modèle d'un enroulement de transformateur

Il existe une relation directe entre la configuration géométrique des enroulements et le circuit magnétique à l'intérieur du transformateur de puissance et la distribution des éléments qui le composent tels que : résistances, inductances et capacitances. Ce réseau RLC peut être identifié par des fonctions de transfert dépendant de la fréquence. Or le changement dans la configuration géométrique engendre la variation de l'impédance du réseau et de ce fait déplace la fonction de transfert.

Les changements dans la fonction de transfert vont révéler un grand rang de modes de défaillance.

Donc, l'approche FRA permet la détection des changements dans la fonction de transfert d'un enroulement individuel à l'intérieur du transformateur de puissance et par conséquent, indique un mouvement ou une distorsion dans le circuit magnétique et les

enroulements de ce dernier. La capacitance est déterminée en fonction de la distance entre les conducteurs.

Les mouvements dans l'enroulement seront donc déterminés en fonction des capacitances et modifieront ainsi la forme de la courbe.

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 Figure (II.2).

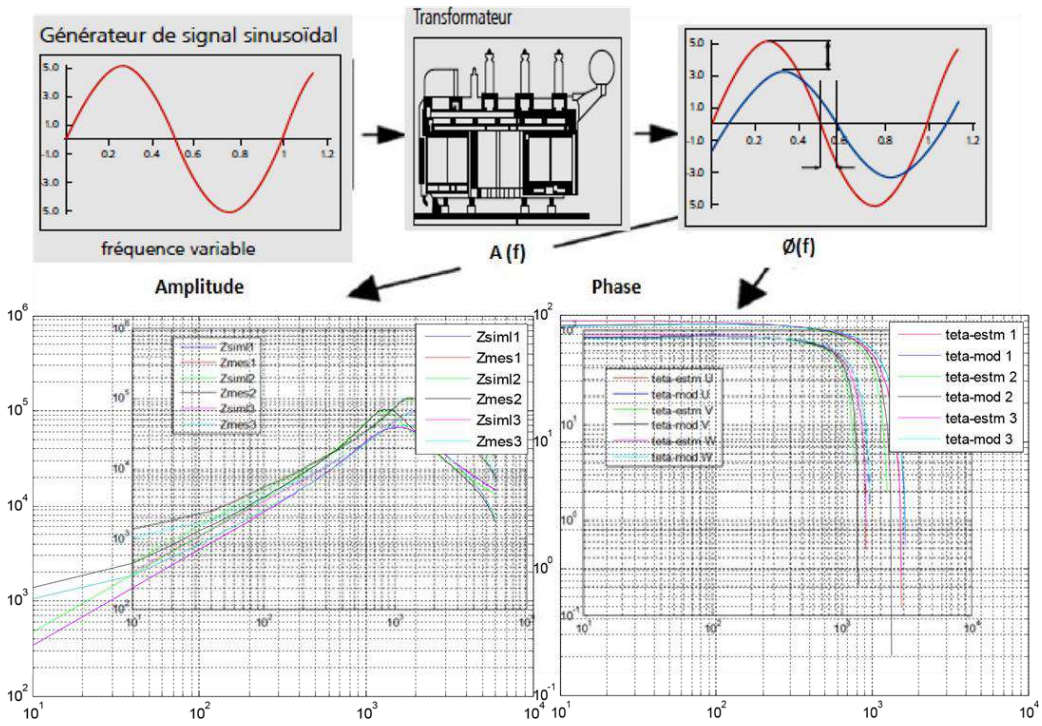


Figure II.8 : Principe de la FRA

II.10 Modélisation fréquentielle du transformateur en régime MF :

Plusieurs modèles de transformateurs de puissance existent dans la littérature, chacun de ces modèle est dédié pour des études particulières telles les études des régimes transitoires,

des régimes permanents, des régimes de défaut, et des régimes fréquentiels. Dans ce qui suit des modèles utilisés dans l'étude des régimes transitoires et fréquentiels seront présentés

II.10.1 Modèle de Morched (modèle universel EMTP) :

Ce modèle est utilisé dans EMTP (Programme des transitoires électromagnétiques) pour étudier les comportements des réseaux électriques, en régime transitoire. Il est utilisé comme un standard dans les études temporelles et fréquentielles [21]. L'utilisation de ce code de calcul, pour modéliser un transformateur consiste à représenter ce dernier par un schéma électrique équivalent, comprenant [21], [22] :

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

La figure II.9 illustre un exemple de schéma équivalent d'un transformateur de type cuirassé, avec trois galettes, en vue de traitement par le code de calcul EMTP [21].

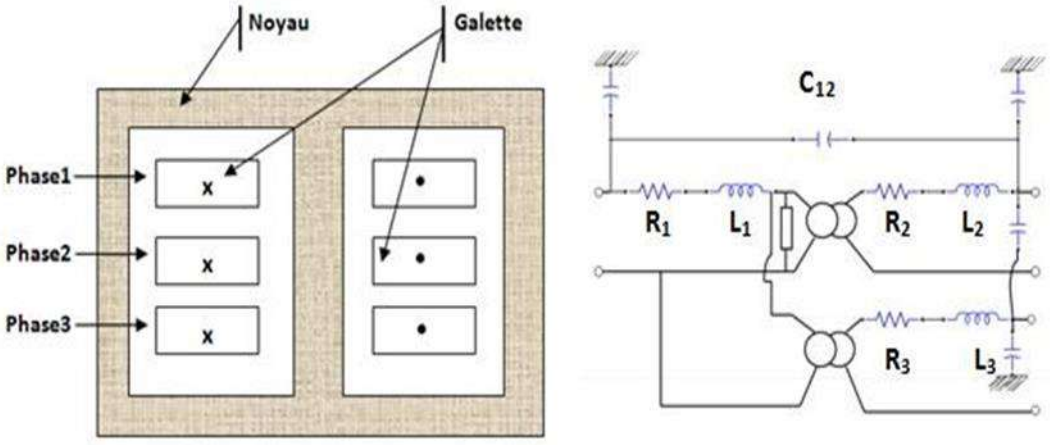


Figure II.9 : Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP [21]

a) Coupe transversale du transformateur.

b) Circuit équivalent.

L'avantage d'utilisation du modèle EMTP est qu'on peut effectuer des études d'interaction du transformateur avec le réseau dans des configurations quasi-réelles, et traite

tous les éléments linéaires et non linéaires tels que les parafoudres [33]. Cependant, ce modèle ne convient pas aux études internes du transformateur [21], [24].

II.10.2 Le modèle RESEL :

RESEL est un code de calcul développé par des Ingénieurs d'Etude et de Recherche de l'Electricité de France [31], et à comme but principal d'étudier les phénomènes transitoires dans les réseaux électriques, en particulier dans les transformateurs, dans le domaine temporel, Son utilisation, pour modéliser un transformateur nécessite deux types de schémas, couplés entres eux [21], [24] :

Un schéma (Fig.II.10.b) qui traduit le comportement électrique du transformateur et un schéma (Fig.II.10.c) qui traduit son comportement magnétique.

Le couplage entre ces deux schémas se fait de la manière suivante :

- les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique,
- les sources du circuit magnétique liées aux courants dans les enroulements

La figure. II.10 illustre la modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL [21]

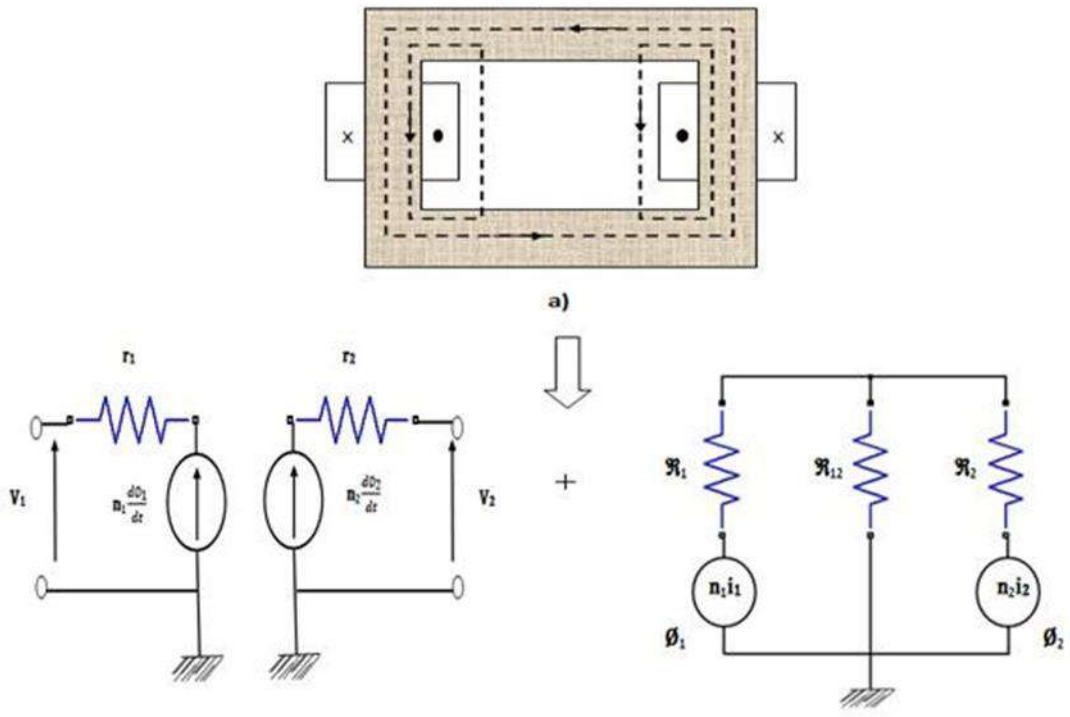


Figure II.10 : Modélisation d'un transformateur à l'aide du code de calcul RESEL [31].

a) Coupe transversale d'un transformateur à 2 enroulements.

b) Le circuit électrique correspondant.

c) Le circuit magnétique correspondant.

II.10.3 Modèle de LEON :

Ce modèle permet de modéliser en détail les enroulements et le noyau. Pour les enroulements, les éléments suivants sont calculés [25], [26] :

- 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 est calculé et puis transformé sous forme d'une équation d'état. Ensuite un circuit de Foster en série (Fig.II.5) sera élaboré à partir de cette équation pour approximer la caractéristique de l'enroulement sur chaque colonne [27].

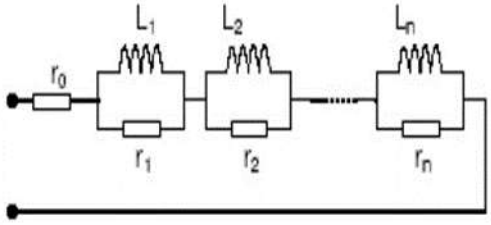


Figure II.11 : Circuit de Foster en série [25].

Pour le noyau, l'effet des courants de Foucault est modélisé par un circuit de Cauer, (Fig. II.12) [26].

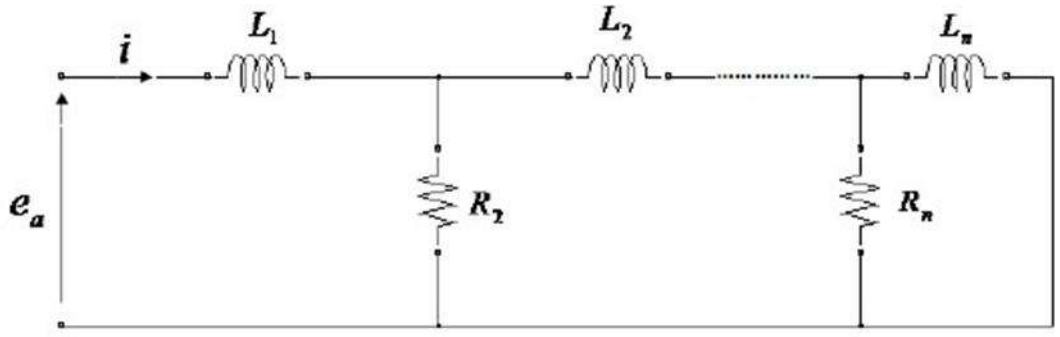


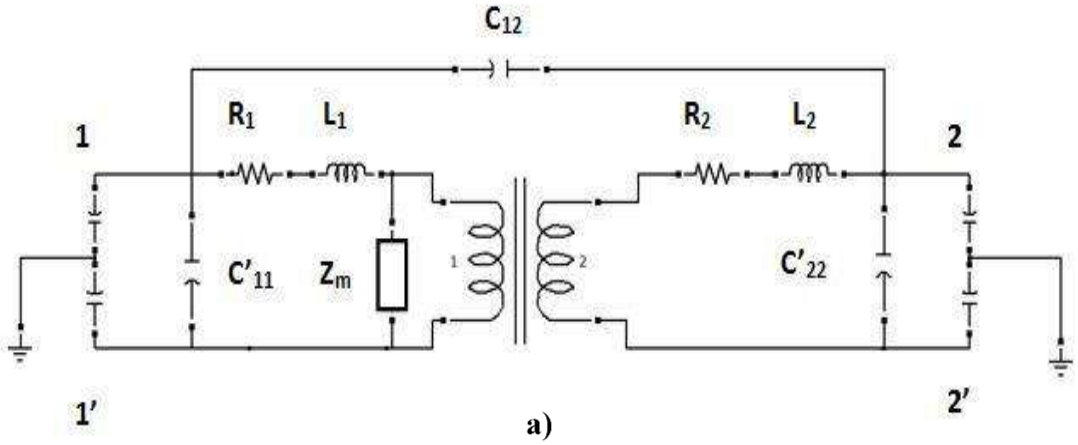
Figure II.12 : Modèle de Cauer pour le noyau de fer [25].

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 [27].

II.10.4 Modèle de Chimklai :

Ce modèle (Fig. II.13) se base sur le modèle classique du transformateur [28]. Ensuite pour modéliser le transformateur en régime fréquentiel, 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 régime fréquentiel. Les capacités représentent les phénomènes électrostatiques de l'enroulement, les circuits R, L, C, représentent les phénomènes magnétiques dans le noyau de fer…etc. [28].

Cette idée est la base pour établir plusieurs modèles qui sont développés par la suite.7



a)

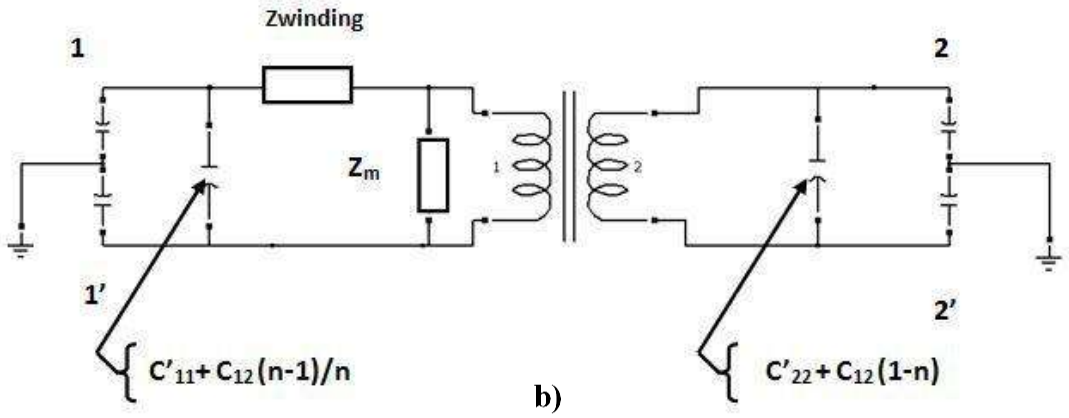


Figure II.13 : Modèle du transformateur de Chimklai [28].

a) circuit d'origine.

b) circuit simplifié.

La considération de la dépendance en fréquence de la résistance et de l'inductance de l'enroulement, dite l'impédance de l'enroulement (Zwinding) [28].

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 [28].

II.10.5 Modélisation par inductances propres et mutuelles :

La modélisation par inductances propres et mutuelles utilise un réseau équivalent des résistances, inductances et des capacités. Cette approche peut être plus ou moins précise, et plus ou moins coûteuse en temps de calcul, suivant le degré de raffinement atteint dans la représentation des enroulements [29], [31 - 33].

Le transformateur est discrétisé par spires, par galette, ou encore par groupement de spires, que l'on appellera éléments ou spires équivalentes (Fig. II.8) [21].

Au point de vue inductif, chaque élément est représenté par son inductance propre. Cette dernière est couplée à toutes les autres inductances, par des inductances mutuelles. Entre

les éléments, il existe des capacités de couplages, et pour chaque élément, une capacité par rapport à la masse [21].

Les éléments de ce modèle sont calculés, en fonction des caractéristiques géométriques et diélectriques du bobinage, ainsi que des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau magnétique [21], [30].

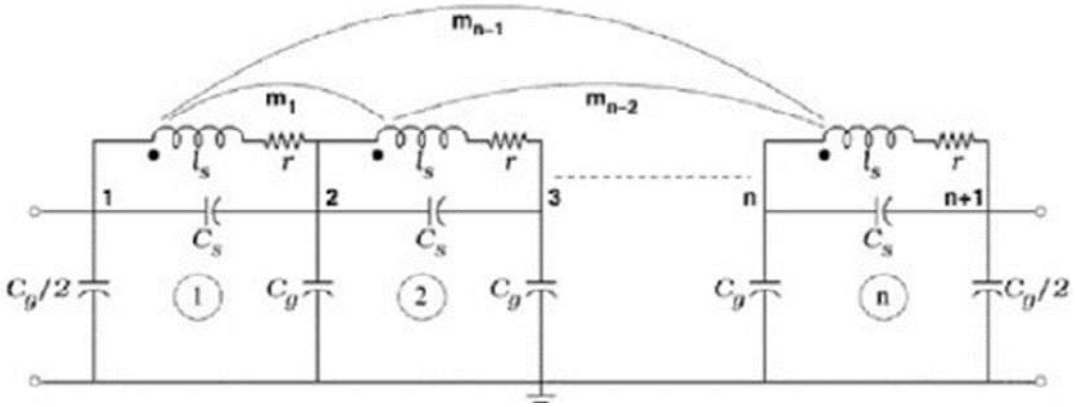


Figure II.14 : Modèle équivalent d'un enroulement de transformateur étudié [29].

II.10.6 Modèle d'Andrieu :

C'est un modèle de transformateur de distribution triphasée à deux enroulements par des principes comme dans le modèle de Chimklai (Fig.II.15). Pour modéliser un transformateur en régime fréquentiel [34], [35], les phénomènes suivants sont pris en compte [35] :

• les capacités.

• les résonances dans l'enroulement HT.

• L'impédance de l'enroulement de BT, dépendant de la fréquence (Zcc).

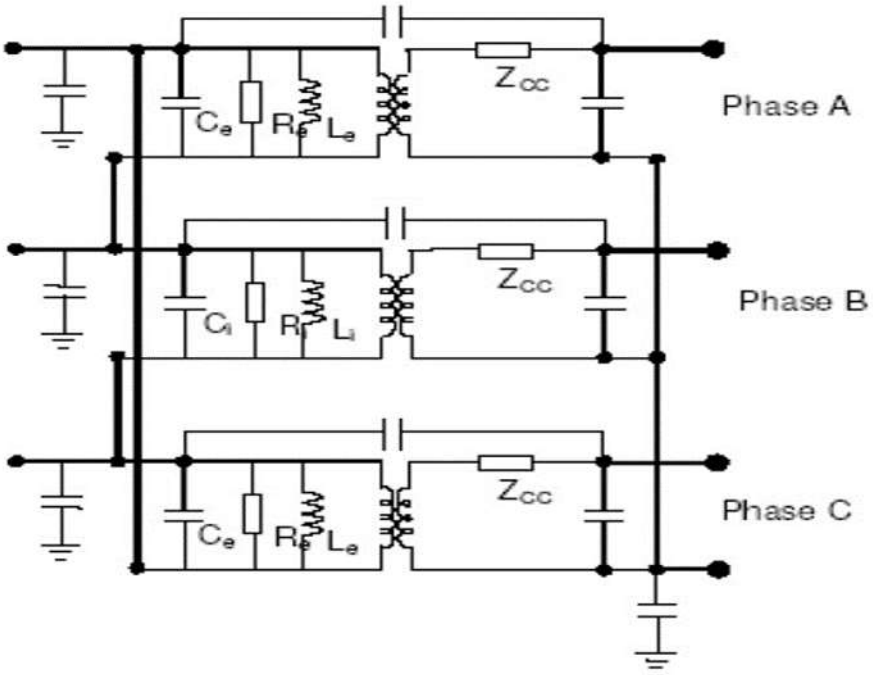


Figure II.15 : Modèle d'Andrieu [34], [35].

La procédure de calcul des paramètres de ce modèle ; est basée sur les mesures des capacités, les mesures des grandeurs électriques en court-circuit et en circuit ouvert. Mais la fréquence limite dans laquelle le modèle est valable reste inférieure à 1MHz.

Le circuit équivalent de l'impédance Zcc est montré dans la figure. II.16 [34], [35] :

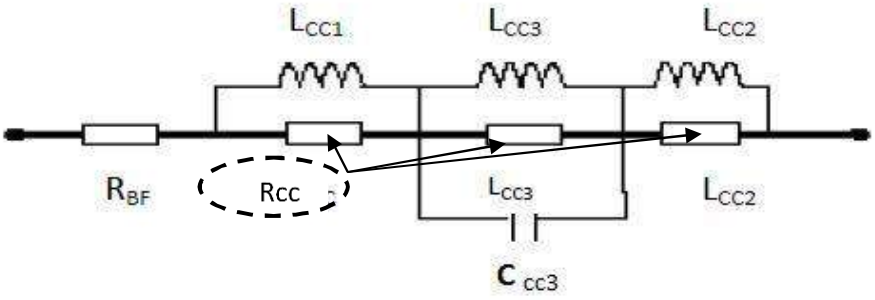


Figure II.16 : Circuit équivalent de Zcc [35].

II.10.7 Modèles-en du transformateur :

La structure de ce modèle est basée sur la théorie du quadripôle en. Elle établit la correspondance entre les différentes impédances qui peuvent être mesurées entre les bornes

d'entrée et de la sortie d'une phase du transformateur, les impédances obtenues sont exploitées pour construire un modèle en du transformateur illustré dans la figure. II.17 [36].

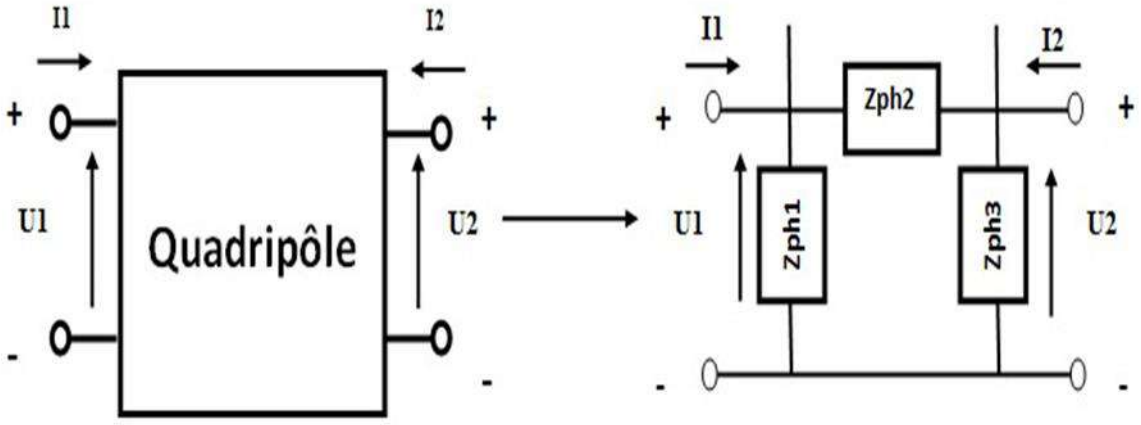


Figure II.17 : Structure de modèle d'un quadripôle [36].

Le circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases est montré dans la figure. II.12 [37].

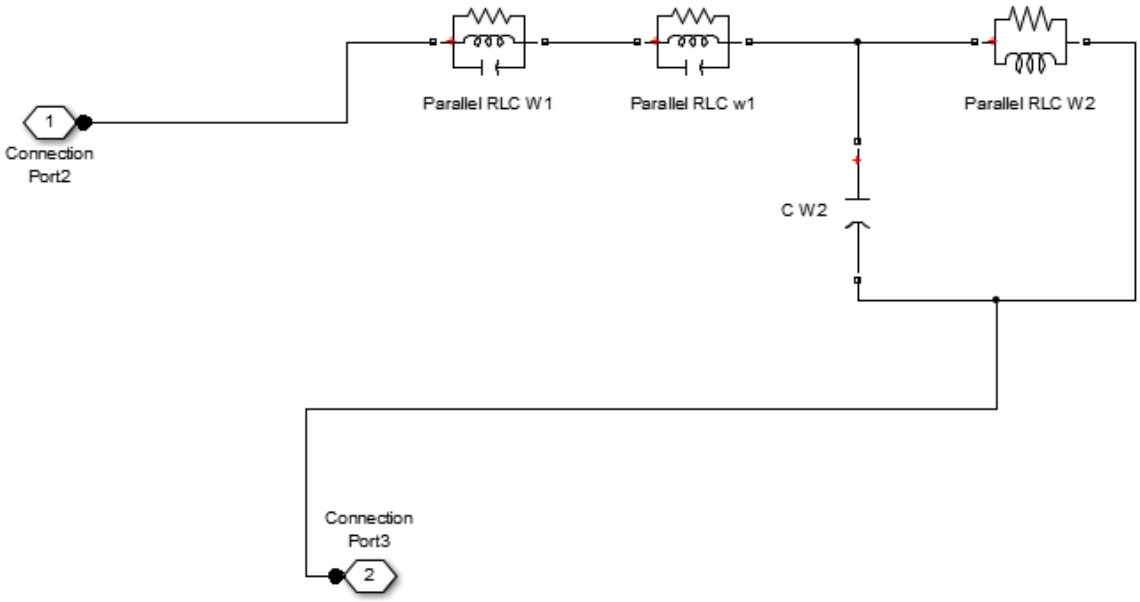


Figure II.18 : Circuit équivalent de l'impédance de chacun des phases [37].

L'analyse théorique repose sur le circuit RLC parallèle, comme le montre sur la figure. II.13 [38].

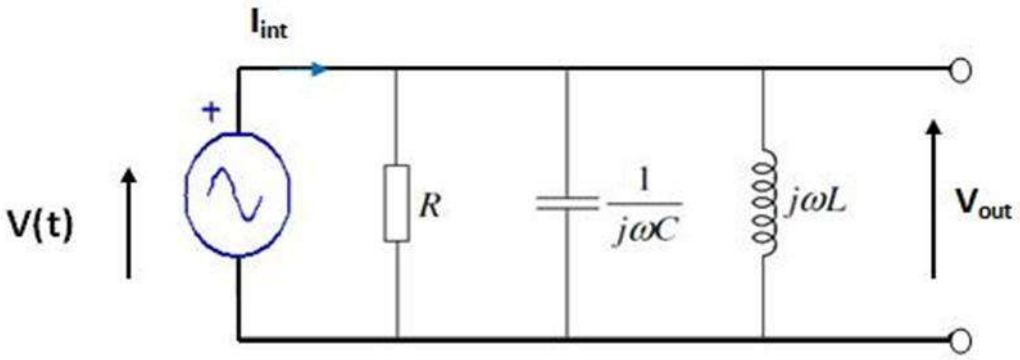


Figure II.19 : Circuit parallèle RLC [38].

II.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présentés un aperçu général sur les types de défaut électrique, ainsi que une étude sur les défauts fréquents dans les transformateurs .Nous avons donnés par la suite une vue d'ensemble des modes de défaillances.

En plus nous avons présentés les modélisations fréquentielle du transformateur en régime MF et la technique de la FRA.

Chapitre III

Application sous MATLAB.

III.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré d'une part, à la modélisation et l'analyse fréquentielle dans les enroulements d'un transformateur triphasé en régime MF par l'utilisation la méthode de l'algorithme Artificial Bee Colony(ABC), et d'autre part, à l' d'identification des paramètres d'un modèle de base d'un transformateur triphasé en moyenne fréquence.

III.2 Objectifs de l'étude :

Les objectifs de ce chapitre sont de :

- Présenter la procédure de calcul des paramètres.
- Calculer l'impédance de chacune des phases, afin d'identifier les paramètres du modèle proposé.
- Optimiser l'allure de la réponse en fréquence des différentes phases en moyenne fréquences (MF), en utilisant deux méthodes : Méthode analytique d'estimation des paramètres et la méthode de l'algorithme ABC.

III.3 Méthodologie de calcul des paramètres :

Afin de déterminer les paramètres du modèle adopté en MF pour l'enroulement du transformateur triphasé, on propose la méthodologie suivante :

- Une simulation est réalisée sur chacune des trois phases du transformateur.
- Méthode analytique d'estimation des paramètres.
- Méthode intelligente (ABC).

III.4 Description du modèle approprié de l'étude :

Le présent travail décrit l'étude de la configuration RLC proposée, et la détermination des valeurs des paramètres de chaque branche. Cette dernière est réalisée sous MATLAB Simulink, dans une gamme de fréquences variant de 0Hz à 20000Hz.

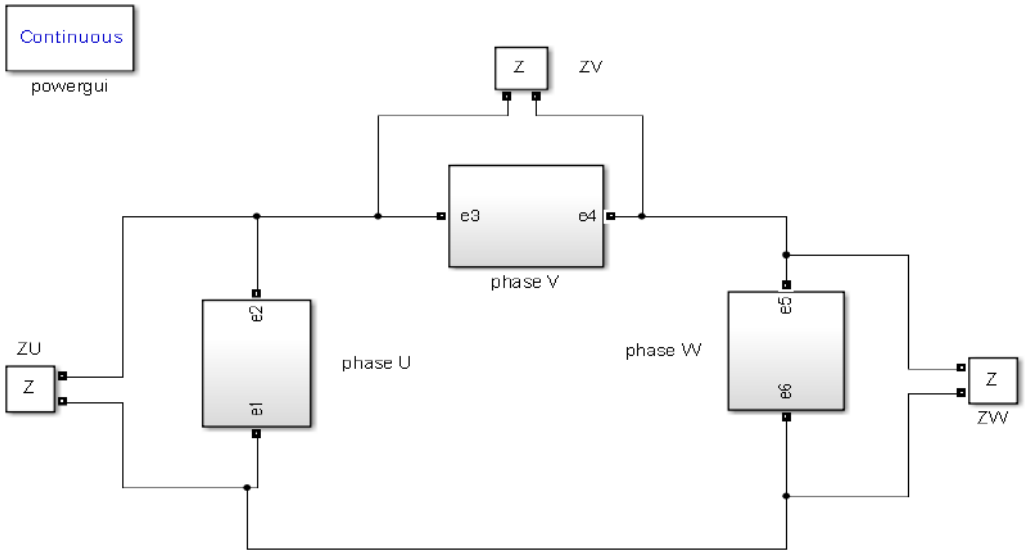


Figure III.1 : Modèle en π simplifié d'un transformateur triphasé en régime MF.

↳ Les circuits équivalents de chaque phase :

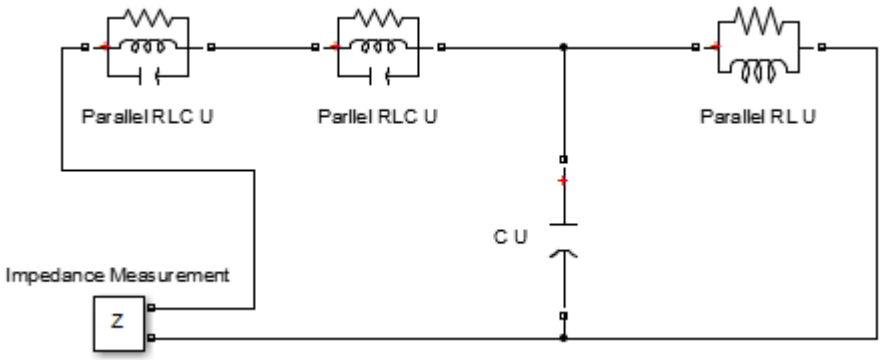


Figure III.2 : Le circuit équivalent de la phase U.

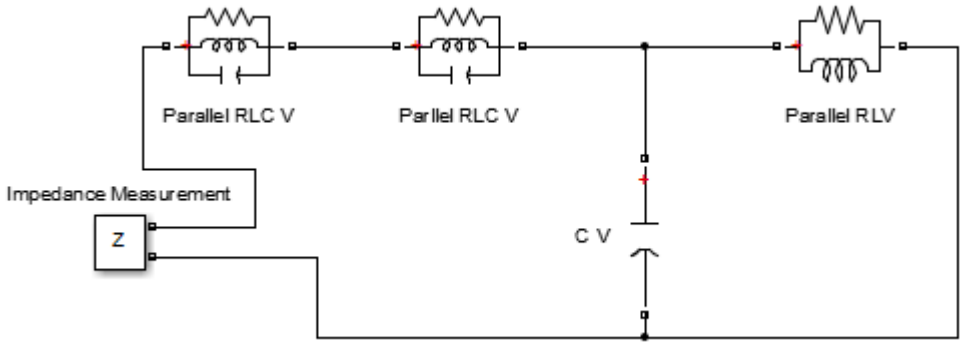


Figure III.3 : Le circuit équivalent de la phase V.

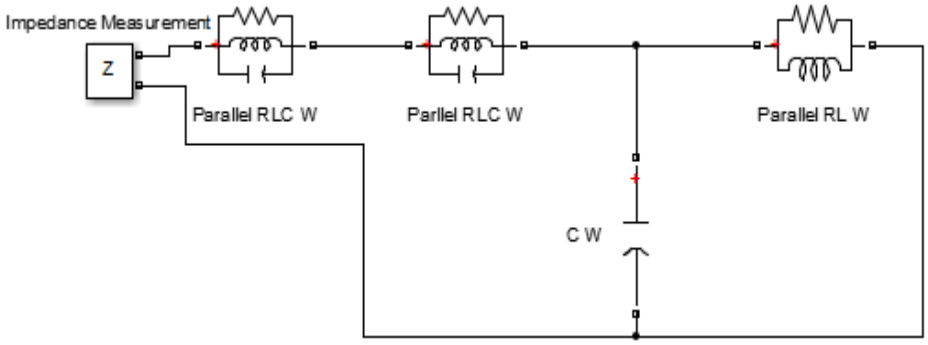


Figure III.4 : Le circuit équivalent de la phase W.

Les figures (III.5 - III.6- III.7), représentent respectivement les allures des impédances ZU, ZV et ZW par Simulink MATLAB.

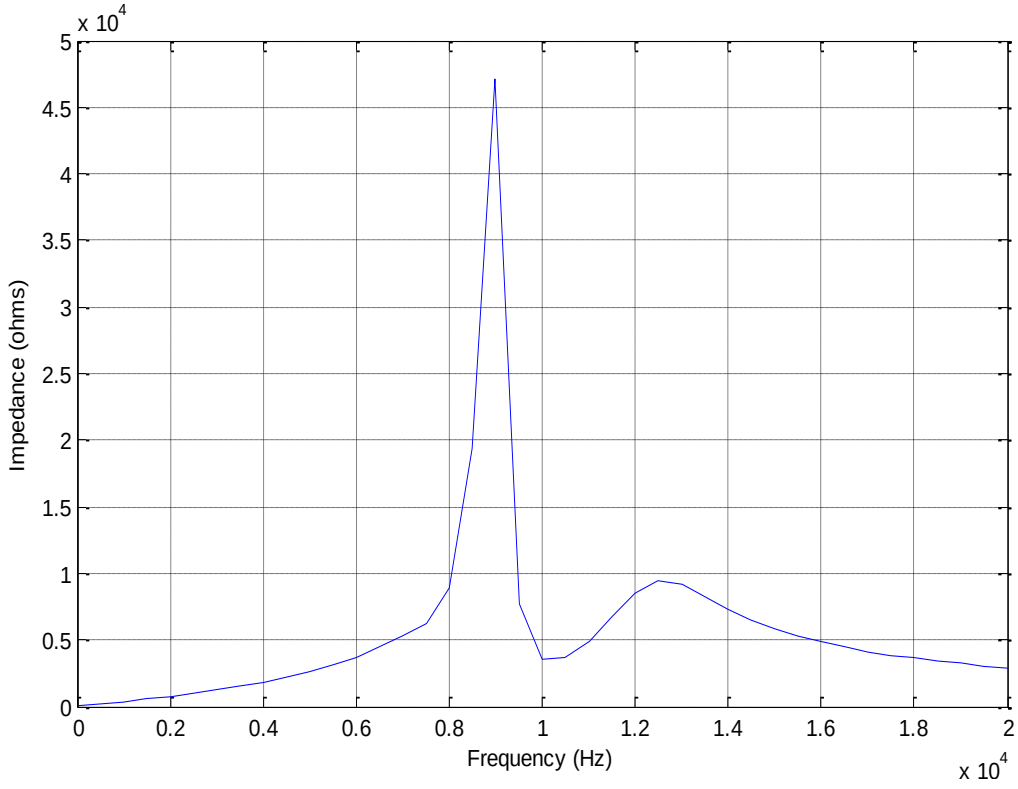


Figure III. 5 : Courbe de l'impédance ZU.

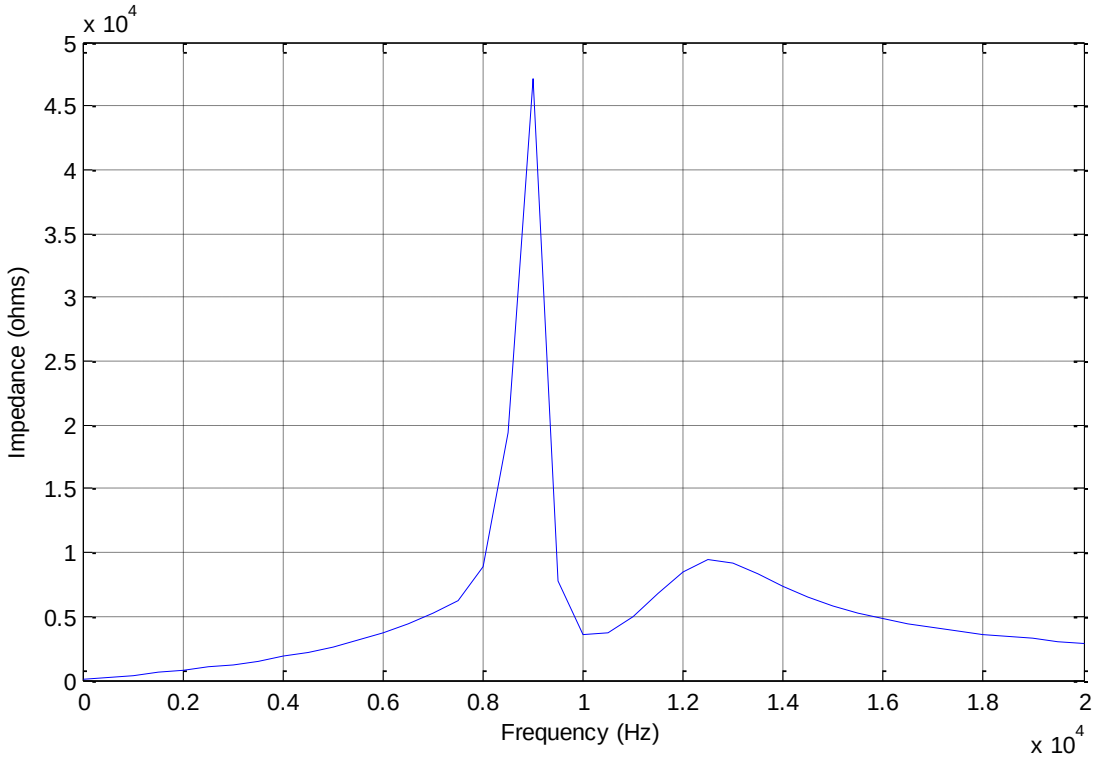


Figure III. 6 : Courbe de l'impédance ZV.

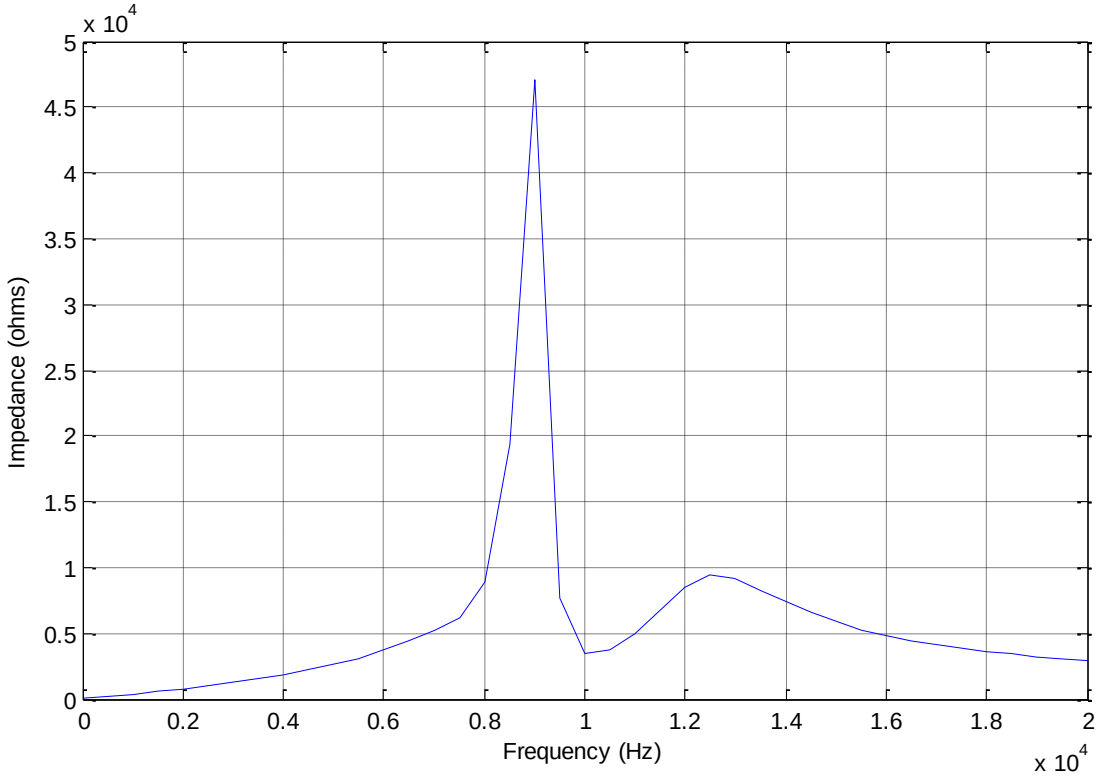


Figure III. 7 : Courbe de l'impédance ZW.

III.5 Calcul des paramètres :

III.5.1 les équations de Z Phases :

Le modèle de transformateur triphasé en moyenne fréquences résultant peut être construit par trois impédances (Z_nU, Z_nV et Z_nW) connectées.

$$Z_nU = \frac{ZU}{2} - \frac{ZV}{2} - \frac{ZW}{2} + \frac{2\cdot(ZV\cdot ZW)}{(ZV+ZW-ZU)} \quad \text{(III.1)}$$

$$Z_nV = \frac{ZV}{2} - \frac{ZU}{2} - \frac{ZW}{2} + \frac{2\cdot(ZU\cdot ZW)}{(ZU+ZW-ZV)} \quad \text{(III.2)}$$

$$Z_nW = \frac{ZW}{2} - \frac{ZV}{2} - \frac{ZU}{2} + \frac{2\cdot(ZV\cdot ZU)}{(ZU+ZV-ZW)} \quad \text{(III.3)}$$

III.5.2 Résultats de simulation :

Donc, le système d'équation des impédances Z_nU, Z_nV et Z_nW est donnée par les équations (III.1 – III.3) respectivement

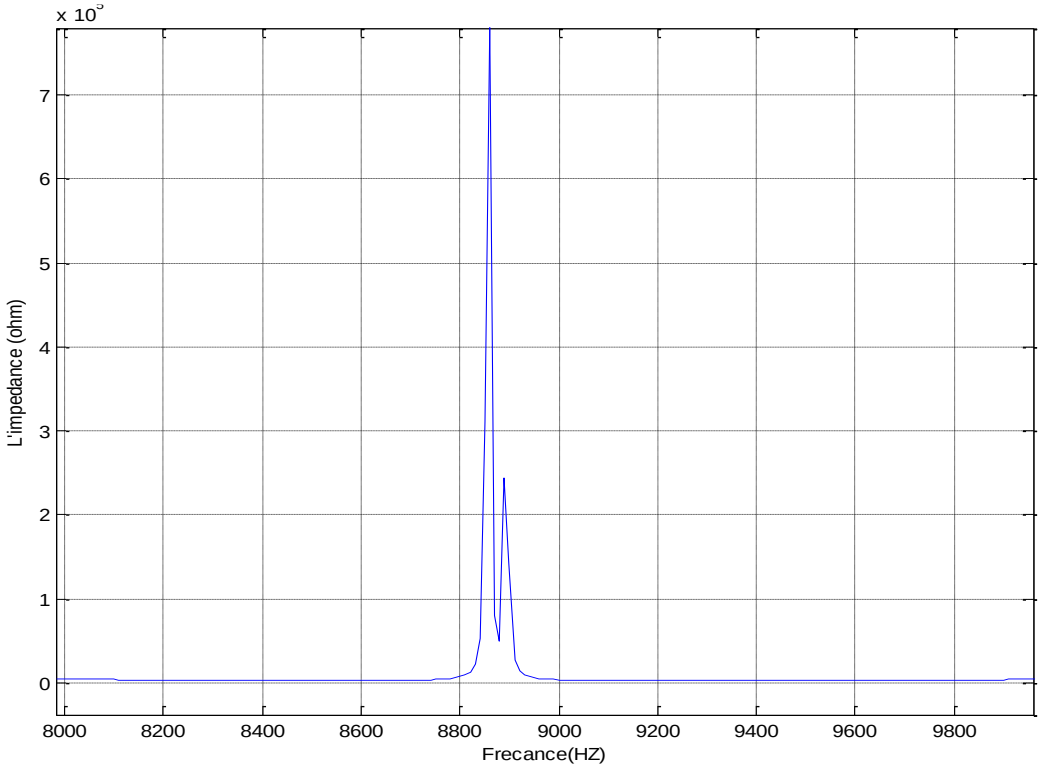


Figure III.8 : Courbe de réponse en fréquence obtenue par l'estimation correspondant la phase U

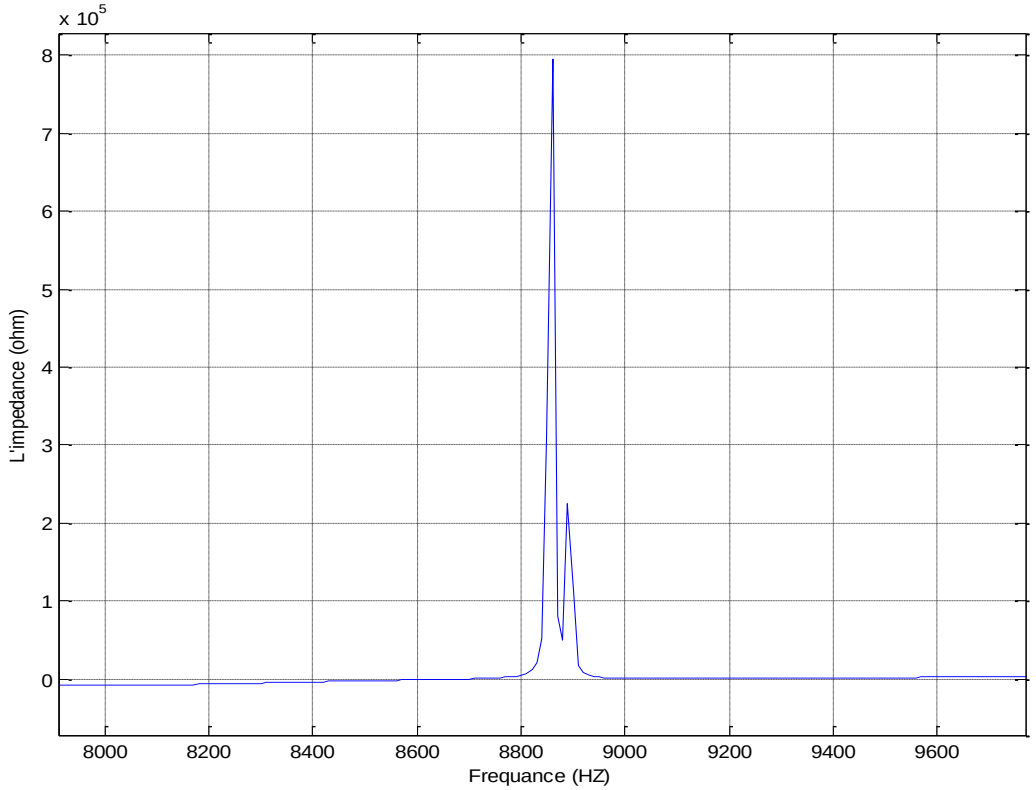


Figure III.9 : Courbe de réponse en fréquence obtenue par l'estimation correspondant la phase V

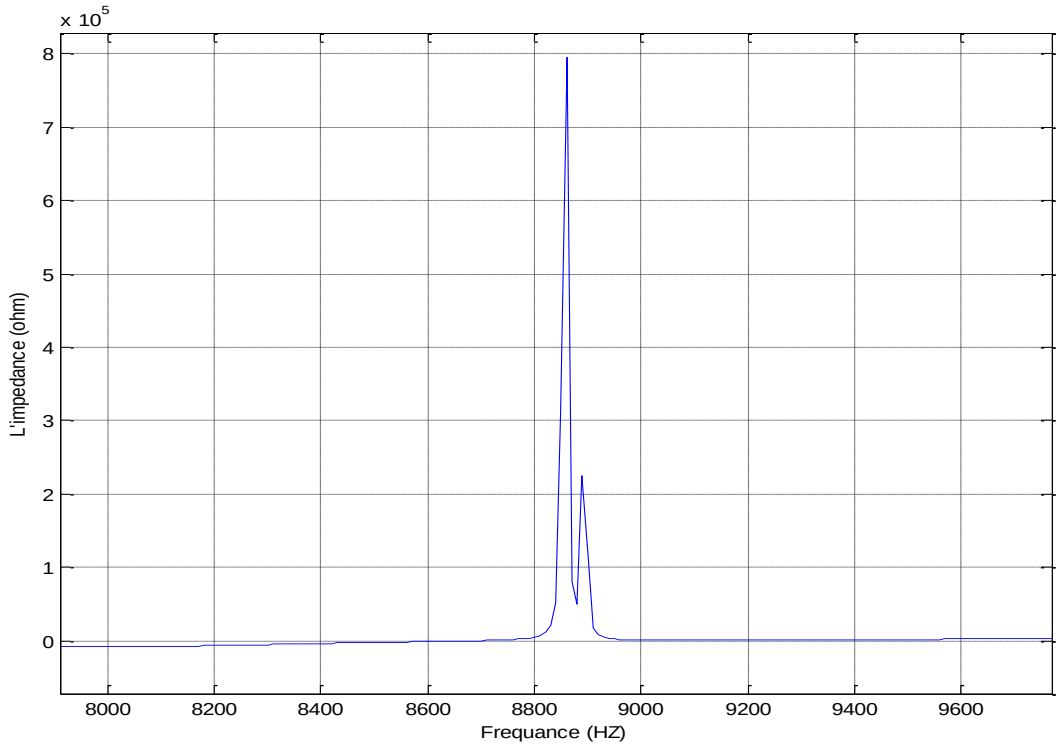


Figure III. 10 : Courbe de réponse en fréquence obtenue par l'estimation correspondant la phase W

III.5.3 Estimation des paramètres du modèle RLC pour chaque phase :

Le pic de résonance de l'impédance du modèle est simulé par une seule branche RLC parallèle dans une bande passante donnée [35] [36].

La courbe de résonance est simulée par une branche RLC parallèle, où la pente positive est montrée par le comportement inductif de L, la pente négative est principalement représentée par le comportement capacitif C et le pic de résonance est la valeur du paramètre R, représenté sur la figure III.11.

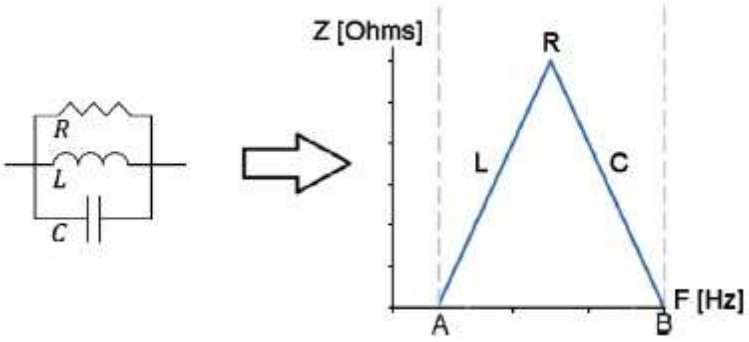


Figure III.11 : Modèle de circuit d'une branche de noyau de transformateur.

Les paramètres RLC sont déterminés en utilisant les équations (III.4 - III.6).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2}}{\sum_{i=1}^{m} \frac{G}{|Y|^2}} \qquad \text{(III. 4)}$$

$$L = \frac{(\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2})^2 - (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\omega^2 * |Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2}{|Y|^2})}{(\sum_{i=1}^{m} \frac{B_X}{\omega^2 * |Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2}{|Y|^2}) - (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{B_X * \omega}{|Y|^2})} \qquad \text{(III. 5)}$$

$$C = \frac{(\sum_{i=1}^{m} \frac{-B_X * \omega}{|Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\omega^2 * |Y|^2}) + (\sum_{i=1}^{m} \frac{l}{|Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{B_X * \omega}{|Y|^2})}{(\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{|Y|^2})^2 - (\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\omega^2 * |Y|^2} * \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2}{|Y|^2})} \qquad \text{(III.6)}$$

III.5.4 Calcul de l'admittance de chaque cellule RLC parallèle :

La méthode d'estimation analytique commence à établir l'admittance caractéristique de chaque phase [36].

La fonction objective est alors définie par (III.5).

$$\frac{1}{Z_i} = Y_i = G_i + j * B_i \qquad \text{(III.7)}$$

Avec: $G_i = \frac{1}{R_i}$; $B_i = (\omega_i * C_i - \frac{B_{Li}}{\omega_i})$; $B_{L_i} = \frac{1}{L_i}$

Où : **Gi** et **Bi** sont les parties réelle et imaginaire de la courbe d'admittance à chaque point de fréquence respectivement.

III.6 Comparaison entre Zestm et Zsiml :

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement simulé par rapport à celles des réponses estimées est illustrée sur les figures (III.12. III.13. III.14) suivantes :

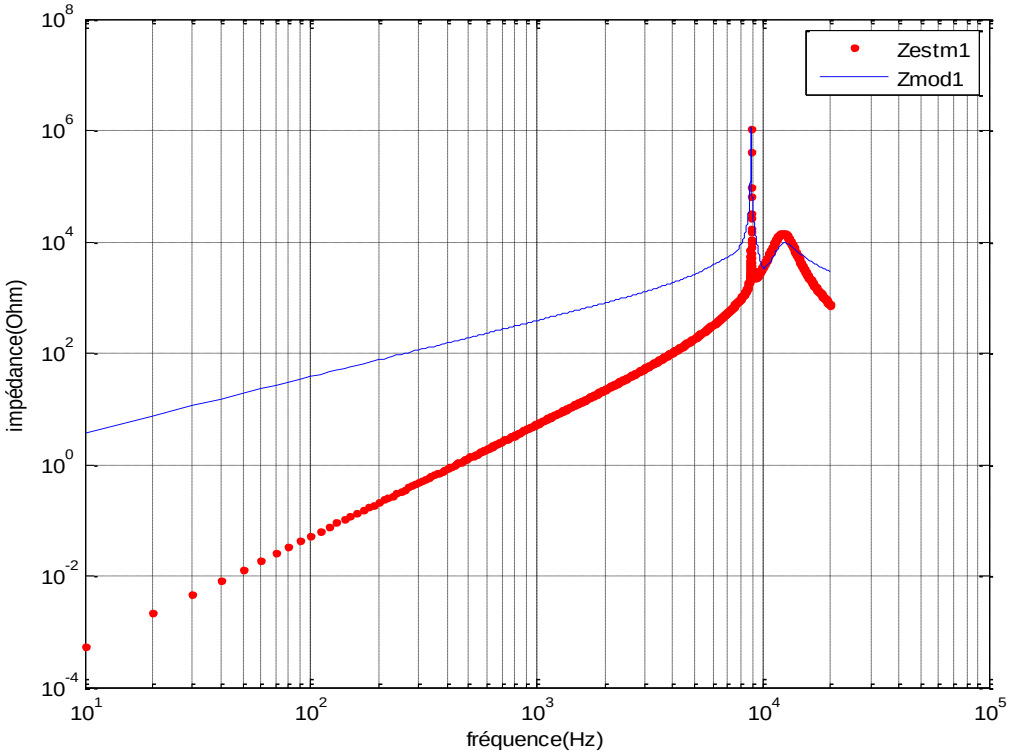


Figure III.12.a : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase U

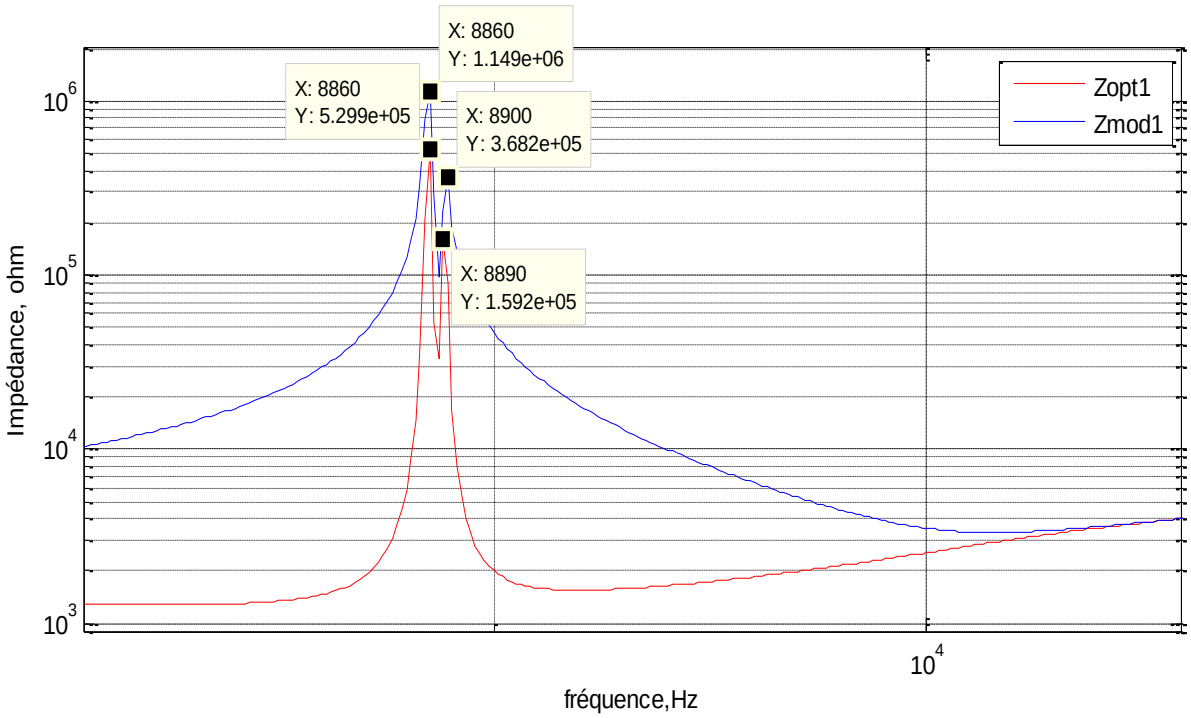


Figure III.12.b : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase U avec leurs valeurs maximales.

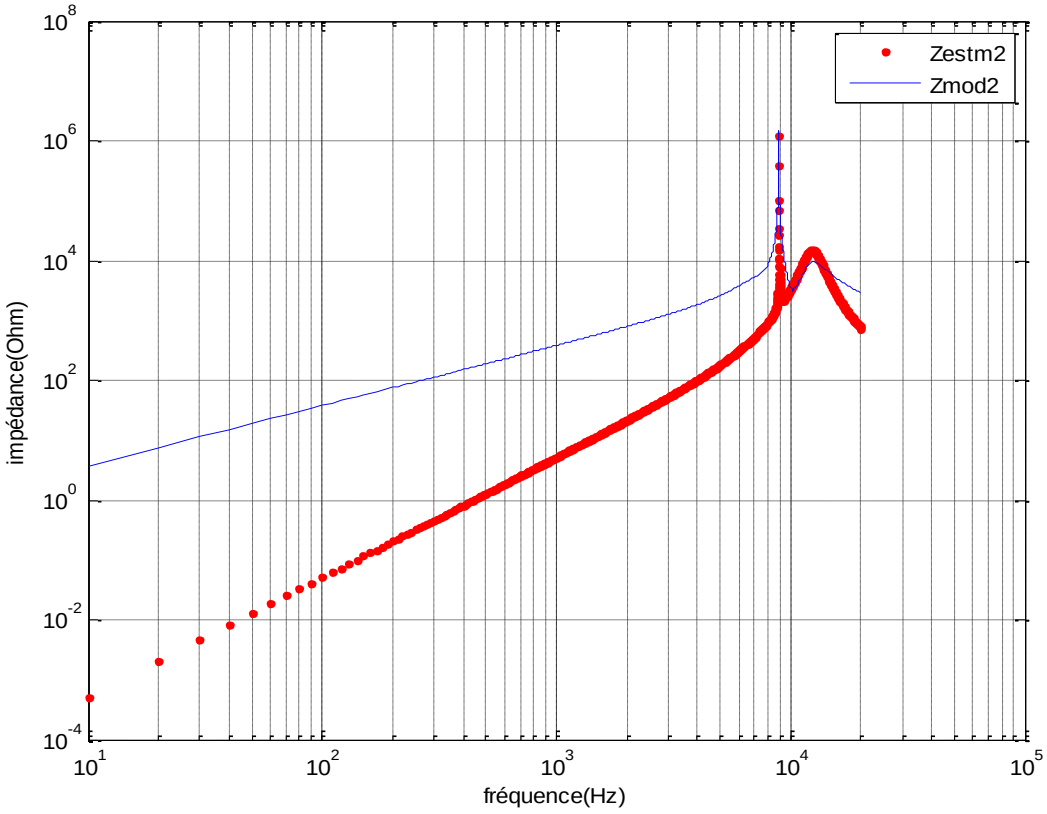


Figure III.13.a : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement Simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase V

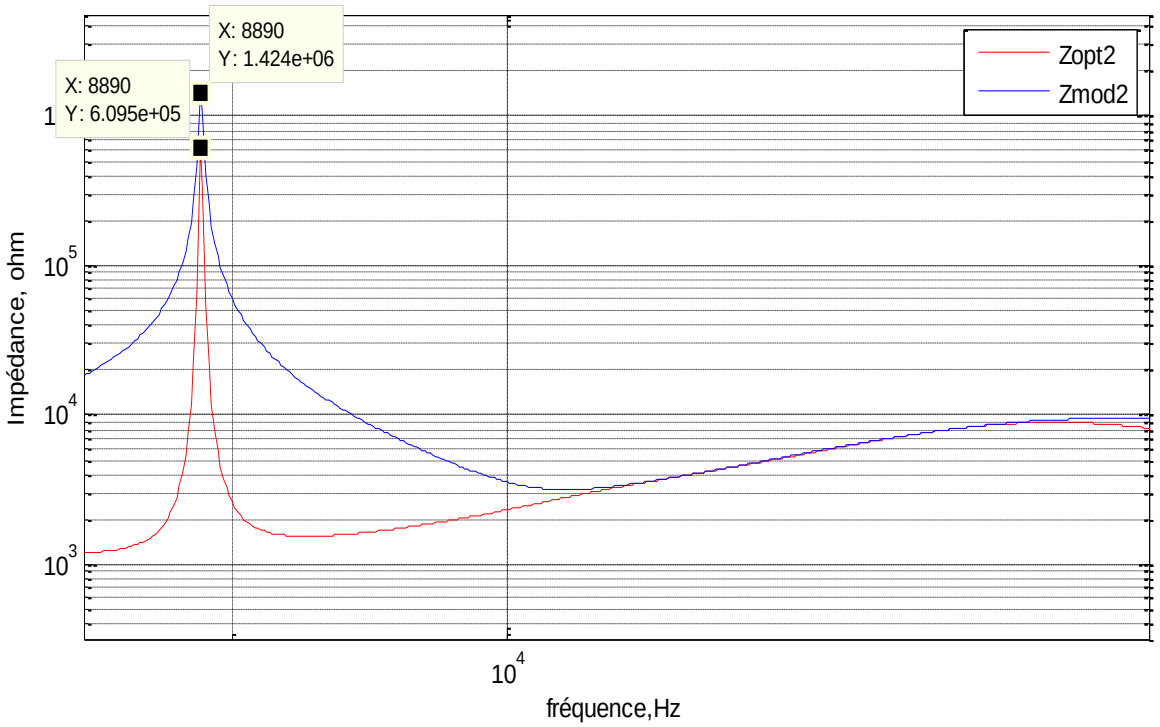


Figure III.13.b : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement Simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase V avec leurs valeurs maximales

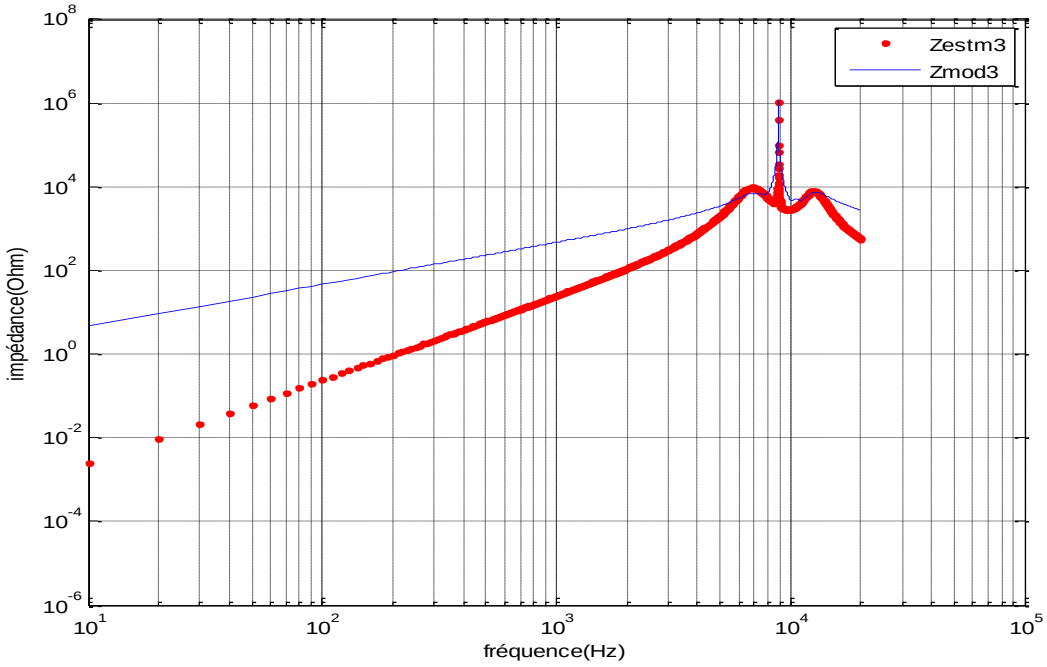


Figure III.14.a : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase W

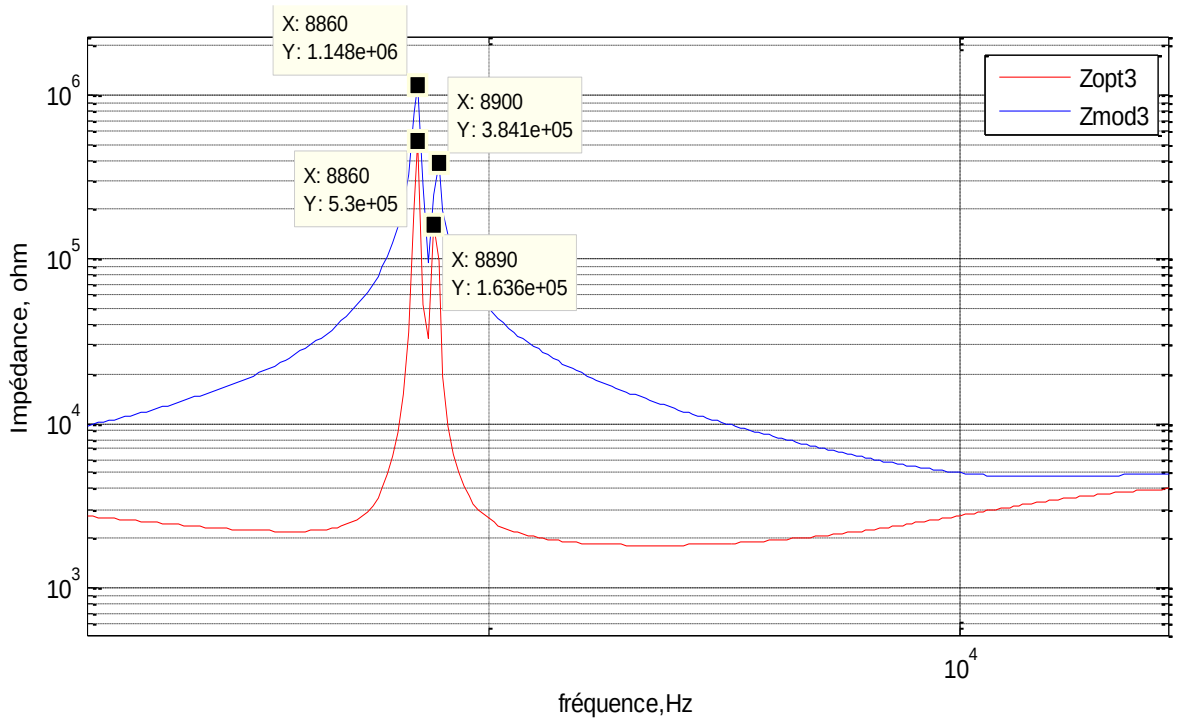


Figure III.14.b : La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement simulé par rapport à celles des réponses estimées pour la phase W avec leurs valeurs maximales.

III.7 Algorithme d'optimisation de colonie d'abeille artificielle (ABC) :

L'algorithme de colonie d'abeilles artificielles ou Artificial Bee Colony (ABC) a été introduit par Dervis Karaboga et développé depuis 2005 par Karaboga et Basturk pour les problèmes d'optimisation continue. C'est un algorithme à population, d'inspiration naturaliste, basé sur le butinage des abeilles [39] [40].

Principe :

Dans cet algorithme, une solution candidate au problème d'optimisation est représentée par une source de nourriture. Chaque source de nourriture possède une quantité de nectar qui caractérise sa qualité (fitness)

La population de la colonie est divisée en trois groupes d'abeilles, parcourant l'espace de recherche en quête de source de nourriture. Ces groupes d'abeilles ne représentent pas les solutions mais un ensemble d'itérations. Chaque groupe d'itérations correspond au vol d'un des trois types d'abeilles : les abeilles ouvrières, les spectatrices et les exploratrices.

Les ouvrières parcourent le voisinage des sources de nourriture afin de trouver une meilleure source que celle visitée. Elles partagent ensuite la qualité de la source avec les spectatrices. Ces dernières se concentrent essentiellement sur les sources de nourriture de meilleure qualité.

Lorsqu'une source de nourriture a été suffisamment explorée, elle est abandonnée et les exploratrices partent aléatoirement à la recherche d'une nouvelle source. L'algorithme de tableau III.1 résume le processus.

Tableau III. 1. Algorithme ABC.

```
Initialisation des sources de nourriture (III.8) et de leur fitness (III.9)
tant que critère de fin non satisfait faire
// Vol des ouvrières
    pour i = 1 à nb Ouvrières faire
        génération d'une nouvelle solution (source de nourriture) Ni selon (III.10)
        si fit(Ni) > fit(Xi) alors
            X^i ← N^i
        fin
        sinon
            nb Visites i ← nb Visites i + 1
        fin
    fin
    Mise à jour de la qualité des sources de nourriture (fitness), selon (III.9).   // Vol des spectatrices
    i ← 1
    tant que i ≤ nb Spectatrices faire
        k ← rand(SN)
        si rand (0, 1) < P_k, selon (III.11) alors
            génération d'une nouvelle solution Nk selon (III.10),
            si fit(Nk) > fit(Xk) alors
                X^k ← N^k
            fin
            sinon
                nb Visites k ← nb Visites k + 1
            fin
            i ← i + 1
        fin
    fin
// Vol des exploratrices
    pour i = 1 à nb Exploratrices faire
    Si la source la plus visitée est abandonnée, remplacement par une nouvelle solution,  Selon (III.8).
    fin
    Sauvegarde de la meilleure source de nourriture.
fin
```

Le nombre d'abeilles ouvrières et de spectatrices correspond au nombre de sources de nourriture. Il y a généralement une abeille exploratrice. Une source de nourriture est un vecteur de dimension D, D étant la dimension du problème, le nombre de sources de nourriture (SN) est un paramètre de l'algorithme [41].

- **Initialisation :**

Premièrement, l'algorithme initialise une population de SN individus, comme d'écrit en équation (III.9), X_{min} et X_{max} sont les vecteurs des valeurs minimum et maximum de chaque dimension du problème.

$$i \in \{1,..,SN\}, j \in \{1,..,D\}$$

$$X_j^i = X_{\min} + rand[0,1](X_{\max j} - X_{\min j}) \qquad \text{(III.8)}$$

A chaque source de nourriture est associée une quantité de nectar définissant une attractivité, la fitness. Cette valeur est calculée selon l'équation (III.9), où f est la fonction objective.

$$fiT(X^i) = \begin{cases} \frac{1}{fiT(X^i)+1}; f(X^i) \geq 0 \\ 1 + |f(X^i)|; f(X^i) \leq 0 \end{cases} \qquad \text{(III.9)}$$

- **Vol des ouvrières :**

Chaque abeille ouvrière produit une nouvelle solution, au voisinage d'une source de nourriture existante, selon (III.10). Pour la i^{ieme} abeille($i \in \{1,$ SN$j \in \{1,2,..,D\}$, une dimension choisie aléatoirement, ϕij est un réel aléatoire, uniformément distribué dans l'intervalle $[-1;\ 1]$ et$k \in \{l, .,SNJ$, une solution choisie aléatoirement $(k \neq i)$.

$$N_j^i = X_j^i + \emptyset_{ij}(X_j^i - N_j^k) \qquad \text{(III.10)}$$

Si la nouvelle source de nourriture Ni ainsi produite possède un meilleur fitness que Xi, elle la remplace. Sinon, un compteur de nombre de visites infructueuses est incrémenté.

- **Vol des spectatrices :**

Cette série d'itérations est semblable à la précédente, sauf qu'une abeille spectatrice visitera une source de nourriture prometteuse, qui possède une bonne quantité de nectar. Cette information est partagée par les ouvrières en utilisant la valeur de fitness (III.5). Elle permet

de calculer une attractivité potentielle sous forme de probabilité de sélection. Il existe plusieurs façons de calculer cette probabilité pi, comme d´écrit par l'équation (III.11) où $fit(Xi)$est la fitness de la i^{ieme} solution et $fit_{\max}$ la valeur de fitness maximale pour toute la population.

$$Pi = \frac{f^{iT(X^i)}}{\Sigma_{k=1}^{SN} f^{it(X^k)}} \qquad \text{(III.11)}$$

Lors d'une itération d'abeille spectatrice, une nouvelle solution N^i est générée de la même manière que lors d'une itération d'abeille ouvrière, en utilisant l'équation (III.11).

- **Vol des exploratrices :**

Lors de ces deux précédentes phases, lorsqu'une nouvelle solution N^i générée à partir d'une solution(Xi), n'améliore pas cette dernière, un compteur de visites nb Visitesi est incrémenté pour la solution(Xi). Lorsque ce compteur atteint une valeur limite, la solution est abandonnée et remplacée par une nouvelle solution générée selon (III.8).

L'avantage de cet algorithme est qu'il ne possède que peu de paramètres : le nombre de sources de nourriture, le nombre d'abeilles exploratrices et le nombre maximal de visites non améliorantes sur une source de nourriture.

La procédure d'ABC de calcul des paramètres R, L et C du modèle étudié est décrite dans l'organigramme suivant :

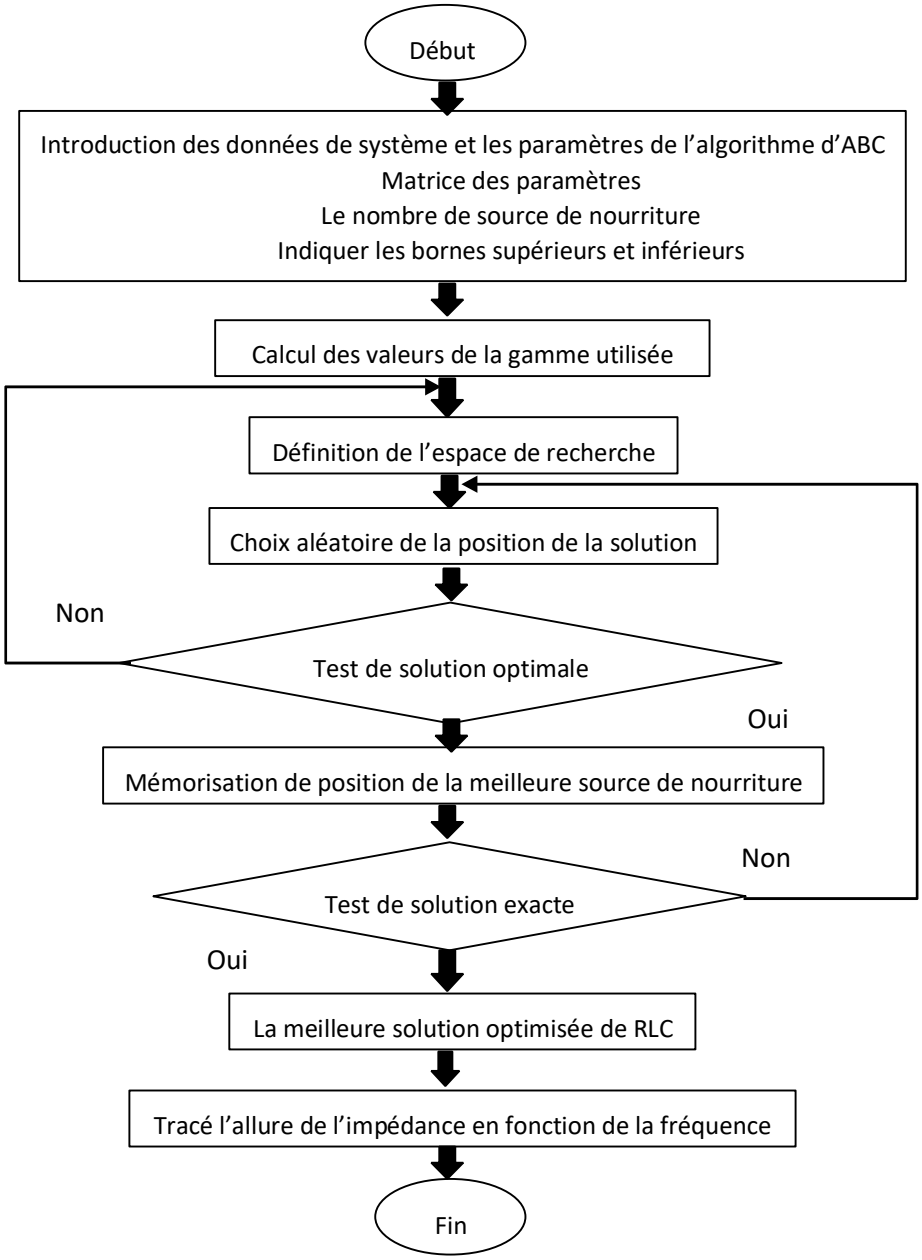


Figure III.15 : Organigramme pour la procédure ABC de calcul des paramètres du modèle approuvé

L'optimisation de la meilleure solution des paramètres R, L et C par la méthode d'ABC est succinctement résumé ci-dessous :

L'espace de recherche est exprimé par l'équation (III. 12) ci-dessous :

$\text{Esp}_{\text{rech}} = \text{rand}\ Esp_{rech} = rand(Sorc_{Norr/}D) * GM_{Va1} + bornes_{\inf}$ (III.12).

Avec :

$\text{GM}_{\text{Val}} = \text{repmat}\ (bornes_{\sup} - bornes_{\inf}), [Sorc_{Norr}1])$

Et :

$bornes_{\inf} = repmat(bornes_{\inf}, [Sorc_{Norr}1])$

L'équation (III.13) ci-dessous utilisé pour optimiser la meilleure solution des paramètres R, L et C.

$$So1_{RLC} = (bornes_{\sup} - bornes_{\inf}) * rand(1, D) + bornes_{\inf} \qquad \text{(III.13)}.$$

Et la fonction objective est démontrée précédemment par l'équation (III.13).

La comparaison des réponses fréquentielles d'un enroulement estimé par rapport à celles des réponses optimisées par l'algorithme d'ABC est illustrée sur les figures (III.16 – III.21).

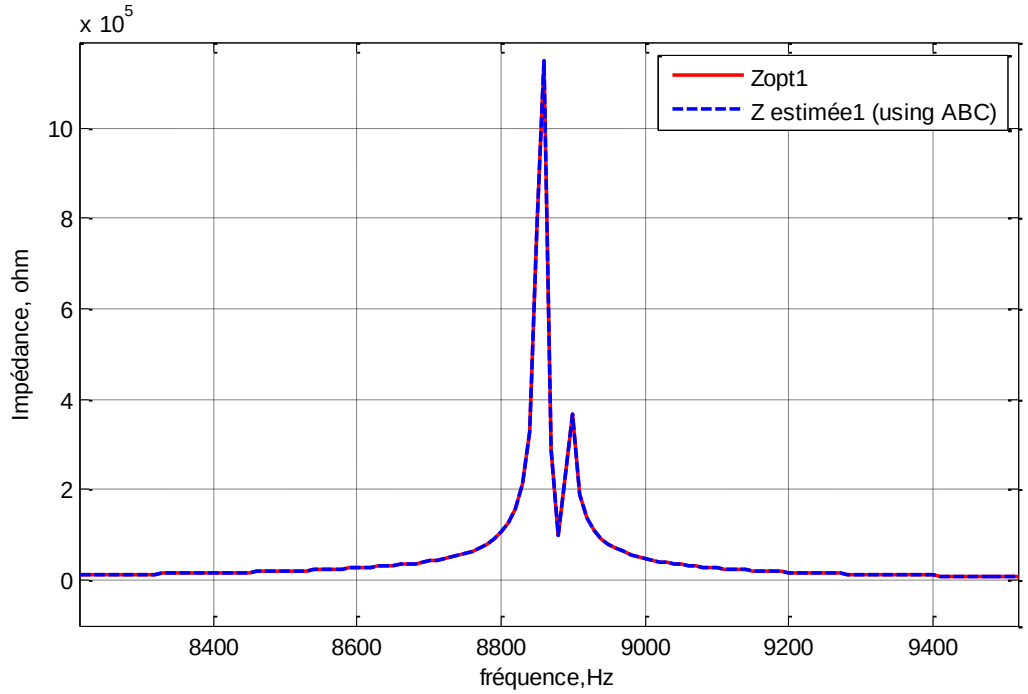


Figure III.16 : La réponse optimisée par l'ABC de l'impédance Z en fonction de fréquence pour la phase U (considéré comme référence)

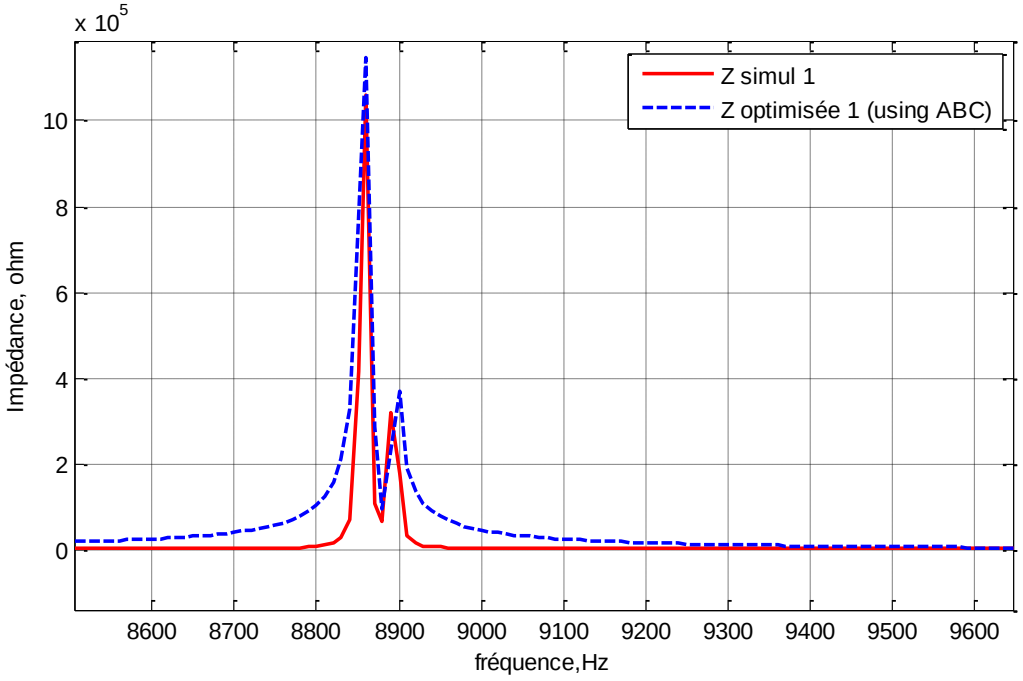


Figure III.17 : La réponse de meilleur solution du l'impédance Zu en fonction de fréquence obtient par l'ABC pour la phase U

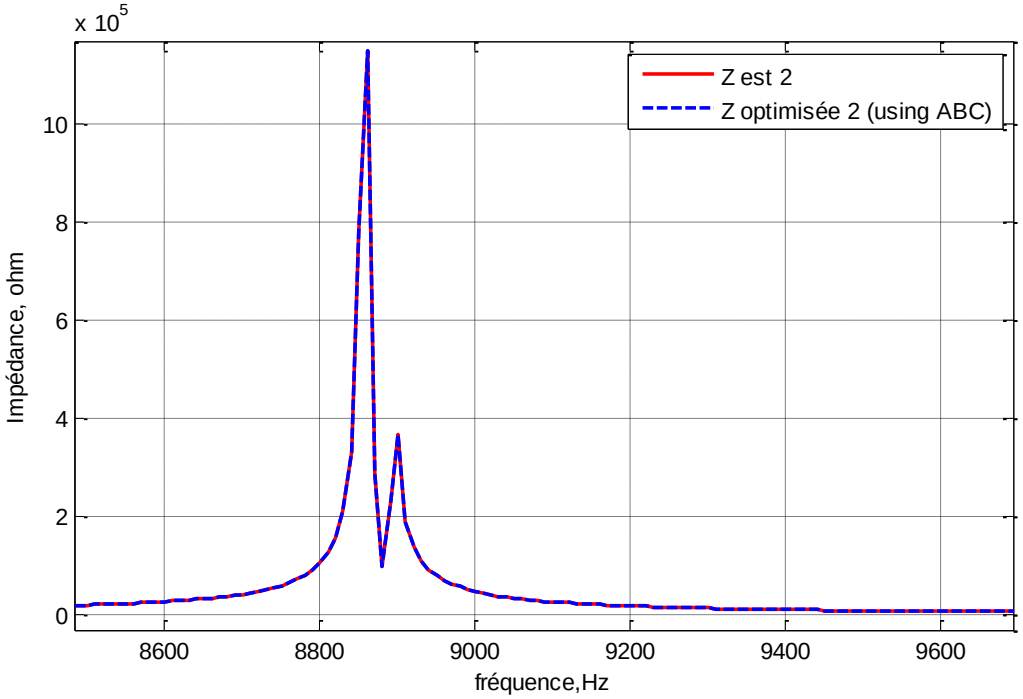


Figure III. 18 : La réponse optimisée par l'ABC de l'impédance Z en fonction de fréquence pour la phase V (considéré comme référence)

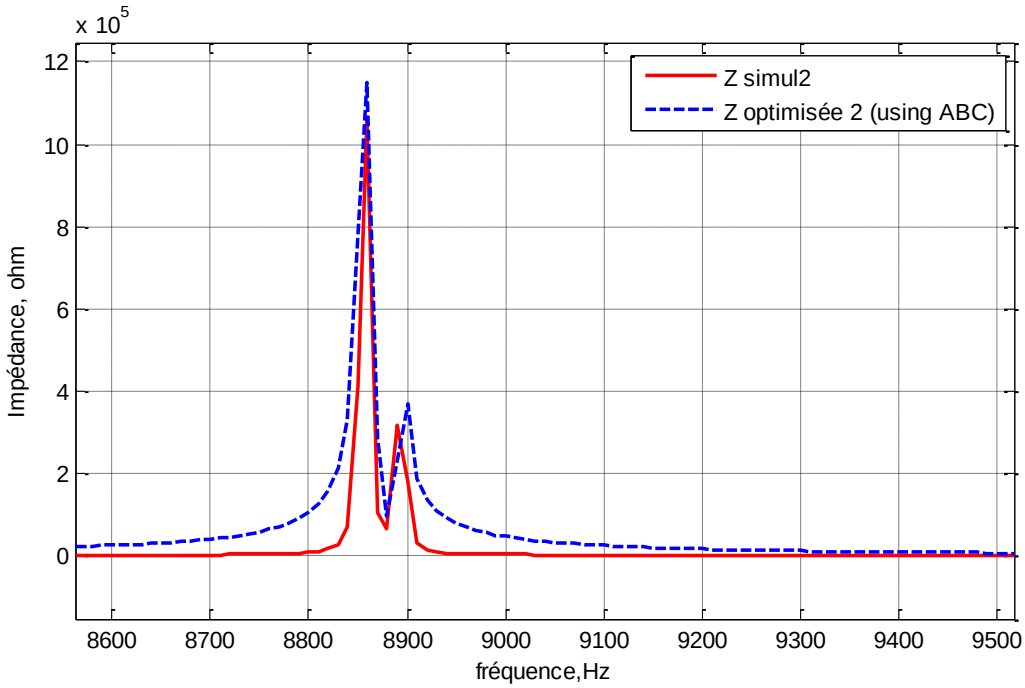


Figure III. 19 : La réponse de meilleur solution du l'impédance Zv en fonction de fréquence obtient par l'ABC pour la phase V

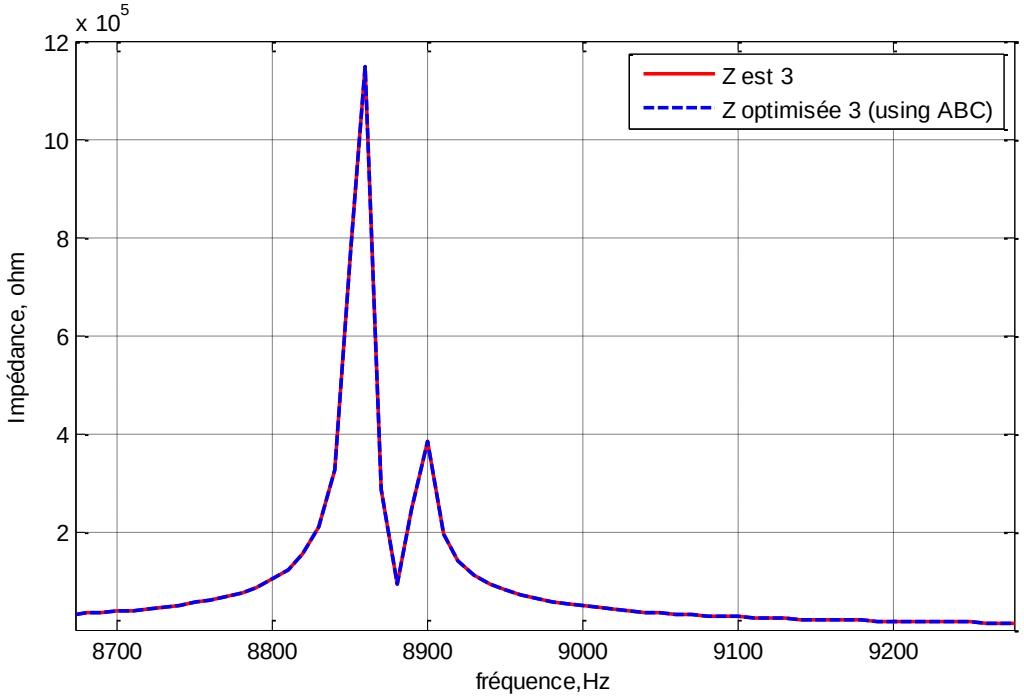


Figure III. 20 : La réponse optimisée par l'ABC de l'impédance Z en fonction de fréquence pour la phase W (considéré comme référence)

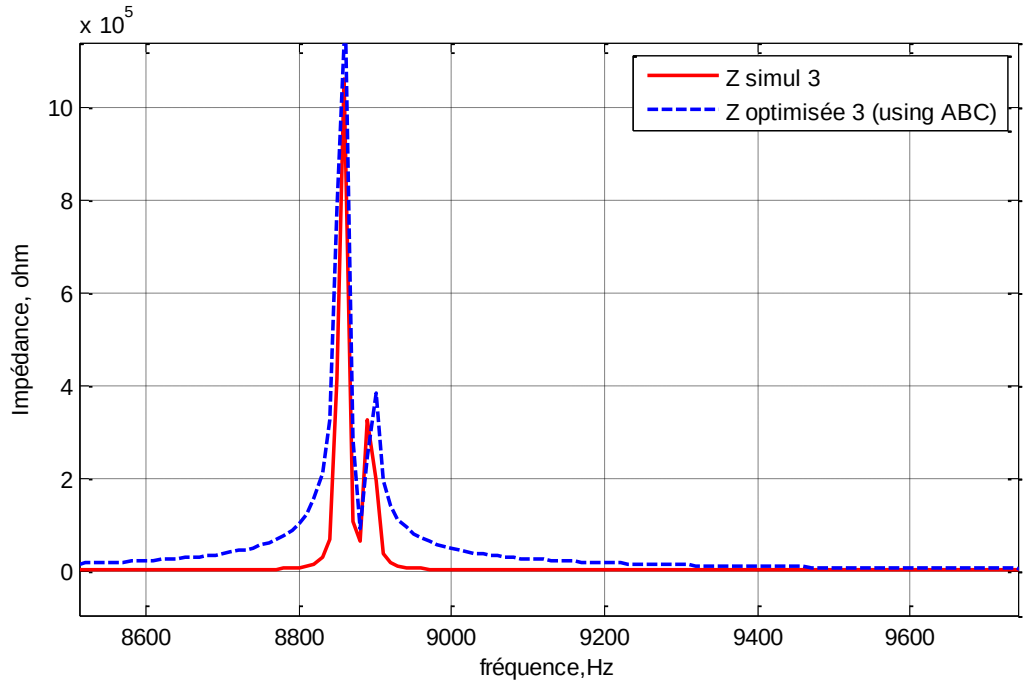


Figure III. 21 : La réponse de meilleur solution du l'impédance Zw en fonction de fréquence obtient par l'ABC pour la phase W

III.7.1 Résultats expérimentaux :

Le tableau III.2 indique les résultats obtenus en appliquant les deux méthodes de calcul. Le tableau est divisé par groupes, chaque groupe est spécifié la méthode utilisée, les valeurs des paramètres R, L et C, le nombre de points de simulation et celles estimées.

Tableau III.2. Valeurs des paramètres obtenues.

	Phase U	**Phase V**	**Phase W**
Gamme de fréquence (Hz)	**[0 -20000]**	**[0 - 20000]**	**[0 -20000]**
Simulation	Valeurs de modèle adopté		
R (MΩ)	5.3910	5.334446	5.3910
L (H)	0.039612	0.0394	0.039612
C (nF)	8.1528	8.0919	8.1528
Algorithme de calcul	L'algorithme d'estimation		
R (MΩ)	5.309055	5.034523	5.4076466
L (H)	0.039612	0.0394323	0.039620
C (nF)	7.95642	7.86561	7.96562
Algorithme de calcul	L'algorithme d'optimisation ABC (les solutions de référence).		
R (Ω)	4314627.8773	1870230.03	4128611.7944
L (H)	0.032646	0.026916	0.033576
C (nF)	7.86545	7.6498	7.8659
Algorithme de calcul	L'algorithme d'optimisation ABC (les meilleures solutions)		
R (Ω)	3808439.1483	3035025.1291	3770918.1481
L (H)	0.03667138477	0.030124948406	0.037702588726
C (nF)	8.1381635306	7.5898474415	8.1291605306

III.7.2 Interprétation des résultats :

La comparaison graphique entre les réponses en fréquence simulées et estimées montrées sur les figures (III.16 – III.21) démontre que :

- Les résultats obtenus par l'estimation sont concordants avec les valeurs de modèle adopté.
- L'algorithme ABC, donne-nous la meilleure solution comparativement par rapport la méthode d'estimation.

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre on a consacré d'une part, à la modélisation et l'analyse fréquentielle dans les enroulements d'un transformateur triphasé en régime MF par l'utilisation la méthode de l'algorithme Artificial Bee Colony(ABC), et d'autre part, à l' d'identification des paramètres d'un modèle de base d'un transformateur triphasé en moyenne fréquence.

D'après l'étude menée, nous avons tiré les observations suivantes :

- L'enroulement du transformateur peut être représenté en moyenne fréquence par deux cellules RLC en séries en parallèle avec une autre cellule RL et C.
- Les résultats obtenus par simulation en utilisant deux méthodes différentes sont concordants avec les valeurs de modèle adopté.
- En comparant les deux méthodes d'identification utilisées pour le calcul des paramètres, l'algorithme ABC s'est avéré le meilleur en termes de précision et de rapidité.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans cette étude avait pour objectif de modélisation et analyse fréquentielle dans les enroulements d'un transformateur triphasé en régime MF, qui est un élément très important dans les réseaux électriques, en utilisant la technique d'ABC.

Premièrement, nous avons mentionnés des informations sur les transformateurs électriques, leur principe de fonctionnement et leur rôle dans les réseaux électriques, et nous avons également mentionnés par la suite les dispositions principales du transformateur triphasé, sa constitution, son principe de fonctionnements et leurs techniques de diagnostics.

Deuxièmement, dans cette partie on a mentionné des informations sur les défauts électriques les plus fréquents dans les transformateurs et leurs types. Nous avons présentés aussi la modélisation fréquentielle du transformateur et s'analyse FRA.

Le modèle que nous avons jugé c'est le modèle le plus adéquat pour notre étude est le modèle qui basé sur la discrétisation de l'enroulement par deux cellules RLC en séries en parallèle avec une autre cellule RL et C, pour sa simplicité d'une part et d'autre part pour il contient à une étude simple et détaillé en moyenne fréquences, exploité pour l'étude et l'analyse fréquentielle dans les enroulements de ce transformateur.

Afin de compléter notre projet de fin d'étude, nous avons consacré au troisième chapitre une méthodologie de calcul des paramètres pour l'enroulement HT de transformateur basée sur l'analyse des impédances Zu, Zv et Zw par simulation.

Finalement, pour des résultats précis on a utilisé la méthode d'Algorithme d'optimisation de colonie d'abeille artificielle (ABC), et obtenus les résultats désirés.

La simulation a été réalisée sous MATLAB, d'après les résultats obtenus, on a relevé les points suivants :

- Les deux méthodes utilisées pour l'identification des paramètres du modèle proposé ont donné des résultats satisfaisants.
- En comparant les deux méthodes utilisées, l'algorithme ABC offre plus de précision et de rapidité
- En conclus, le modèle obtenu présente des avantages importants en matière de modélisation et d'analyse fréquentielle dans les enroulements du transformateur en moyenne fréquence.

Références bibliographiques

[1] « **FRANÇOIS Milsant.** « Électrotechnique machines électriques transformateurs électriques » ,3e édition ».

[2] « **MEZARI Naouel.** « Diagnostic des transformateurs de puissances », mémoire de magister ».

[3] « **THEODORE Wildi** and **SYBILLE Gilbert.** « Electrotechnique : transformateur »,4e édition, Bibliothèque Nationale, Paris, juin 2005 ».

[4] B. R. Gupta, Power system analysis and design 3ed 1998

[5]. **J. Lewis Blackburn Thomas J. Domin,** Protective Relaying Principles & Applications Third Edition, 2007.

[6] **MEZARI Naouel,** « Diagnostic des transformateurs de puissances », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Tizi Ouzou. Juillet 2011

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

[8]. **Bernard Hochart**, « transformateur de puissance » livre 2eme edition.1988

[9]. **Saliha Boudraa**, « Analyse des gaz dissous les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de magister, département d'électrotechnique, université de Batna.2005

[10] **HAMADI .Z** and **KRATBI S** « Analyse des défaillances dans les enroulements d'un transformateur triphasé, basée sur l'analyse de l'impédance du transformateur » mémoire de master, université de MEDEA, 2016.

[11] Formation Transformateurs GRTE avril 2005.

[112] **Florian OMICRON Predl**. « Interpretation of Sweep Frequency Response Analysis

(SFRA) Measurement Results, www.omicronenergy.cominfo@omicronenergy.com »

Australia.

[13] **ANKITA Namdeo** and Dr. **SHAILJA Shuklafault**. « Identification of 45MVA

Transformer Winding by Changing Capacitance Value Using Frequency Response Analysis with Artificial Bee Colony », Method, International Journal of Novel Research in Electrical and Mechanical Engineering Vol. 2, Issue 3, pp: (3-11), Available at:

www.noveltyjournals.com, Month: September-December 2015.

[14] **V. Sokolov** "Failure Statistics. Transformer and Bushing Design Review.

Typical Failures Modes and Failure Causes. What Can are Learned from Post

Mortem Inspection", Fifth AVO New Zealand International Technical Conference 2006.

[15] **V. Sokolov, Z. Berler, V. Rashkes** " Effective Methods of the Assessment of the Insulation System Conditions in Power Transformers: A View Based on Practical Experience", Proceedings of the EIC/EMCWE'99 Conference, October 2628, 1999, Cincinnati.

[16] : Omicron électronique 'FRA Analyzer Manuel d'utilisation' Référence –VESD0662 Version du manuel : FRA.FR, 2006.

[17] **C. Sweetser** et **T. McGrail,** Sweep frequency response analysis transformé applications, vol. 1. Citeseer, 2003.

[18] : Megger 'FRAX 101 Analyzeur de réponse de la fréquence de balayage' FRAX101_DS_fr_V01.

[19**]: Bergman, C**. 'SFRA- an application that creats cutomer value?' Thesis Département Electrical Enginnering Sweden, 2006.

[20] : **Gueller.B, Veverka.A,** «Processus impultionnelles dans les machines électriques», Energya, Moscou, 1973.

[21] **ANDRIANIRINA Rakotomalala**. « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance en régimes hautes fréquences », Thèse de Doctorat, L'école centrale de Lyon, 1992.

[22] **MORCHED.A, .MARTI .L** and **J OTTEVANGERS.** « A high frequency transformer model for EMTP ». IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 8, No. 3, July 1993.

[23]**DOMMEL.H.W.** « Electromagnetic Transients program (EMTP) Theory Book », Bonneville, 1986.

[24] **ANDRIANIRINA rakotomalala**. « Contribution a la modélisation des transformateurs De puissance en régime haute fréquence » .Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Le 27 octobre 2006.

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

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

[27] Jose Ignacio ANGUS GOMES .M and 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.

[28] **SATISH, SUBRAT K** and **SAHOO.L.** « Locating faults in a transformer winding: An experimental study, Electric Power Systems Research, journal homepage: www.elsevier.com/locate/epsr », 2008.

[29] **RAGAVAN .K, SATISH .L** and **SENIOR MEMBER.** « IEEE, IEEE transactions on power delivery, vol. 22, NO. 3, Localization of Changes in a Model Winding Based on Terminal Measurements: Experimental Study », JULY 2007.

[30] **BURAIS N** and **AURIOL Ph.** « Digital modelling of transformer windings subjected to a surge voltage », Symposium of power and measurement transformera, Positano, Italie, Septembre 1979.

[31] **FERGESTAD P. L** and **FTENDRIKSEN T.** « Transient oscillations in multiwinding transformers », IEEE, Vol. PAS-93, N°3, pp. 500-509, 1974.

[32] **MCNUTT W. J., BLALOCK T. J**. and **HINTON R. A.** « Response of transformers windings to System transient voltages », IEEE, Vol. PAS-93, N°2, pp. 457-467, 1974.

[33] **HOUASSINE.H.** « Etude des surtensions dans les blocs alternateur-transformateurs des centrales électriques », Thèse de Doctorat, Département de Génie électrique, Université de Tizi- Ouzou 2010.

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

[35] **Dr.CHADELI.** « Représentation d'un réseau passif par un quadripôle, chapitre VI, les quadripôles passifs, cours d'électronique Général I _2ème année LMD Génie Electrique », Université de YAHIA Fares de Médéa 2010.2013, 2014.

[36] **GONZALEZ GARCIA Carlos**. « Procedimiento de Modelado basado en el Análisis de la Respuesta en Frecuencia y aplicación en Transformadores Trifásicos de Potencia para su Caracterización y Diagnóstico, universidad carlos iii de madrid, departamento de tecnología electrónica leganés, tesis doctoral », 9 de enero de 2012.

[37] **WILDER Herrera, GUILLERMO Aponte, JORGE Pleite** and **GONZALEZ GARCIA Carlos**. « A novel methodology for transformer low-frequency model parameters identification», « Electrical Power and Energy Systems, journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijepes», « Elsevier Ltd. All rights reserved, Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez, Calle 13, No. 100-00, Cali, Colombia, Universidad Carlos III de Madrid, Av. Universidad 30-28911 Leganés, Madrid, Spain », 2013.

[38] **PROF. DR. PETRY HOMRICH Roberto.** « UFRGS Porto Alegre ,Modelo elétrico da impedance do transformador baseado em células rlc passivas, Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil » , julho de 2010 .

[39] **D. Karaboga,** « An idea based on honey bee swarm for numerical optimization », Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer …, 2005

[40] **D. Karaboga** et **B. Basturk**, « On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm », Appl. Soft Comput., vol. 8, no 1, p. 687–697, 2008

[41] **P. Loubiere**, « Amélioration des métaheuristiques d'optimisation à l'aide de l'analyse de sensibilité », PhD Thesis, Paris Est, 2016

Annexes

Programme d'Analyse de la Réponse Fréquentielle (FRA)

```
clc;
clear all;
ZmU=[-2.64282419469003e-12 + 3.79102066022448e-06i…….....]';
Z1=abs(ZmU);
teta1=angle(ZmU)*(180/pi)';
ZmV=[-1.29613313299373e-11 + 4.63387373077831e-06i; 0.00380615651384964 +
9.26779410355687i;.....]';
Z2=abs(ZmV);
teta2=angle(ZmV)*(180/pi);
ZmW=[-1.29613313299373e-11 + 4.63387373077831e-06i;0.00380615651384964 +
9.26779410355687i;.....]';
Z3=abs(ZmW);
teta3=angle(ZmW)*(180/pi);
f=[0;10;20;30;40;50;60;70;80;90;100;110;120;.....20000]';
%ni=1:1000;
ZU=((ZmU./2)-(ZmV./2)-(ZmW./2)+((2.*(ZmW.*(ZmU))./(ZmV+ZmW-ZmU))))';
 ZV=((ZmU./2)-(ZmV./2)-(ZmW./2)+((2.*(ZmU.*(ZmW)))./(ZmU+ZmW-ZmV)))';
ZW=((ZmU./2)-(ZmV./2)-(ZmW./2)+((2.*(ZmV.*(ZmW)))./(ZmU+ZmV-ZmW)))';
figure(1)
plot(f,ZU)
figure(2)
plot(f,ZV)
figure(3)
plot(f,ZW)
```

Programme Analytique d'Estimation des paramètres.

```
function resultats = optimisation(phase1,phase2,phase3,Iinf,Isup)
%%
phase1=[0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 ..... 20000
          3.79102066022540e-06 3.79102461361707    .....2923.87757373898
         -90.0000399424551 -89.9923928972303 .....80.9035428332573]

phase2=[0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100..... 20000
           3.77460107317318e-06 26.4235468450453.....2946.37834217791
          -90.0000399424551...80.9035428332573]

phase3=[0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100..... 20000
           4.63387373079644e-06.....2794.83544129393
         -90.0000399424551...80.9035428332573]
Iinf=1;
Isup=200;
 %phase 1
teta1=(pi/180)*phase1(3,:);
frec1=abs(phase1(1,:));
Zopt1=(phase1(2,:)).*(cos(teta1)+j*sin(teta1))
Max_Zopt1=max(Zopt1)
 %phase 2
teta2=(pi/180)*phase2(3,:);
frec2=abs(phase2(1,:));
Zopt2=(phase2(2,:)).*(cos(teta2)+j*sin(teta2));
%phase 3
```

```
teta3=(pi/180)*phase3(3,:);
frec3=abs(phase3(1,:));
Zopt3=(phase3(2,:)).*(cos(teta3)+j*sin(teta3));

%%  %%%%  calcule des imp Zph1,Zph2,Zph3 (méthode Analitique)  (eq III.13___III.15) %%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%=======Zph1==========%%%%%%%%%
Zph1=((Zopt1.^2+Zopt2.^2+Zopt3.^2)-2.*(Zopt1.*Zopt2+Zopt1.*Zopt3+Zopt2.*Zopt3))./(2.*(Zopt1-
Zopt2-Zopt3));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%=======Zph2==========%%%%%%%%%
Zph2=((Zopt1.^2+Zopt2.^2+Zopt3.^2)-2.*(Zopt1.*Zopt2+Zopt1.*Zopt3+Zopt2.*Zopt3))./(2.*(Zopt2-
Zopt1-Zopt3));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%=======Zph3==========%%%%%%%%%ù
Zph3=((Zopt1.^2+Zopt2.^2+Zopt3.^2)-2.*(Zopt1.*Zopt2+Zopt1.*Zopt3+Zopt2.*Zopt3))./(2.*(Zopt3-
Zopt1-Zopt2));

%% %%%%%% l'allure des imp Zph1,Zph2,Zph3  %%%%%
% figure(1)
% plot(frec1,abs(Zph1),'b','LineWidth',2)
% ylabel('Impédance, ohm')
% xlabel('Fréquence,HZ')
% legend('Zph1' );
% grid on
%
% figure(2)
% plot(frec2,abs(Zph2),'b','LineWidth',2)
% ylabel('Impédance, ohm')
% xlabel('Fréquence,HZ')
% legend('Zph2' );
% grid on
%
% figure(3)
% plot(frec3,abs(Zph3),'b','LineWidth',2)
% ylabel('Impédance, ohm')
% xlabel('Fréquence,HZ')
% legend('Zph3' );
% grid on

%% %%%%    %calcul des paramètres optimisés
RLC_U=calcularRLC(Zph1,frec1,Iinf,Isup);
RLC_V=calcularRLC(Zph2,frec2,Iinf,Isup);
RLC_W=calcularRLC(Zph3,frec3,Iinf,Isup);
%% %%%%%  La pulsation %%%%%%
w1=2*pi*frec1;
w2=2*pi*frec2;
w3=2*pi*frec3;
%%  %%%%%% calcule des imp Zph1,Zph2,Zph3 ( La fct obj ) %%%%%
%phase U
YU=complex(1/RLC_U(2),(RLC_U(3)*w1-1./(RLC_U(1)*w1)));
ZcellU=1./YU;
%phase V
YV=complex(1/RLC_V(2),(RLC_V(3)*w2-1./(RLC_V(1)*w2)));
ZcellV=1./YV;
%phase W
YW=complex(1/RLC_W(2),(RLC_W(3)*w3-1./(RLC_W(1)*w3)));
ZcellW=1./YW;
```

```
%%   %%%%%   Z optimisée (d'aprés La fct obj)  %%%%%%

Zest1=ZcellU.*(ZcellV+ZcellW)./(ZcellU+ZcellV+ZcellW);
Zest2=ZcellV.*(ZcellU+ZcellW)./(ZcellU+ZcellV+ZcellW);
Zest3=ZcellW.*(ZcellV+ZcellU)./(ZcellU+ZcellV+ZcellW);

%% %%%%%% Les Modules et l'ang %%%%%
%phase U
Zmod1=abs(Zopt1);
Zestm1=abs(Zest1);
teta_mod1=(180/pi)*(angle(Zopt1));
teta_estm1=(180/pi)*(angle(Zest1));
%phase V
Zmod2=abs(Zopt2);
Zestm2=abs(Zest2);
teta_mod2=(180/pi)*(angle(Zopt2));
teta_estm2=(180/pi)*(angle(Zest2));
%phase W
Zmod3=abs(Zopt3);
Zestm3=abs(Zest3);
teta_mod3=(180/pi)*(angle(Zopt3));
teta_estm3=(180/pi)*(angle(Zest3));

%%
%%%% comparaison entre Zestm_UVW et Zmod_UVW  %%%%

figure(4)
loglog(frec1,Zestm1, 'b' ,frec1,Zmod1, 'r' ,frec2,Zestm2, 'g' ,frec2,Zmod2, 'k' ,frec3,Zestm3, 'm'
,frec3,Zmod3, 'c' );
legend('Zsiml1' , 'Zopt1' , 'Zsiml2' , 'Zopt2', 'Zsiml3' , 'Zopt3' );
grid on
% %%%% l'alure des fcts obj (optimisés + mesuré)  %%%%%%
figure(5)
loglog(frec3,Zopt3, 'r' ,frec3,Zmod3, 'b' );
xlabel('fréquence,Hz')
ylabel('Impédance, ohm')
legend('Zopt3' , 'Zmod3' );
grid on
figure(6)
loglog(frec2,Zopt2, 'r' ,frec2,Zmod2, 'b' );
xlabel('fréquence,Hz')
ylabel('Impédance, ohm')
legend('Zopt2' , 'Zmod2' );
grid on
figure(7)
loglog(frec1,Zopt1, 'r' ,frec1,Zmod1, 'b' );
xlabel('fréquence,Hz')
ylabel('Impédance, ohm')
legend('Zopt1' , 'Zmod1' );
grid on
```

Méthode d'optimisation ABC

```
function resultats = optimisation(phase1,phase2,phase3,Iinf,Isup)
```

```
%% %%%%%%%%%%%%%%% LA MESURE %%%%%%%%%%%%%%%% :

w=2.*pi.*[0 10 20 30 40 50 60 70 .. . . . . ……. 20000];

%%%%%%%%=======ZU==============%%%%%%%%%
Zcompx1=[-2.64282419469003e-12 - 3.79102066022448e-06i 0.000503330507042678... . . . .
……..462.256305239151 + 2887.10567428357i];

 Z1=abs(Zcompx1);
%
%  %%%%%%%%=======ZV==============%%%%%%%%%
% Zcompx2=[-2.64282419469003e-12 - 3.79102066022448e-06i 0.000503330507042678 -
……3.79102458020373i  + 2887.10567428357i];
%
%  Z2=abs(Zcompx2);

 %%%%%%%%=======ZW==============%%%%%%%%%
% Zcompx3=[-1.29613313299373e-11 - 4.63387373077831e-06i. . . .
……..... . 398.206535005698 + 2766.32187197936i];
%
%  Z3=abs(Zcompx3);

 Iinf=1;
Isup=200;

%% %%%%%%%%%%==========  matrice d'inductance  ==========%%%%%%%%%
%%
% prgm 1  RLC=[7.2960e3,2.211e-2,7.5721e-9;
%            7.41e3,2.192e-2,7.5838e-9;
%            7.2960e3,2.1211e-2,7.5721e-9];
%
% prgm 2  RLC2=[5.3910e6,3.9612e-2,8.1528e-9;
%             5.33e6,3.94e-2,8.0919e-9;
%             5.3910e6,3.9612e-2,8.1528e-9];

          RLC2=[5.3910e6,3.9612e-2,8.1528e-9;
           5.33e6,3.94e-2,8.0919e-9;
           5.3910e6,3.9612e-2,8.1528e-9];

 %%%%%%%%%% Les limits sup et inf (upper and lower bounds) %%%%%%%%%% :
%%===== ZU ====%%%
 Rumax=5.3910e6;
 Rumin=7.2960e3;
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%
 Lumax=3.9612e-2;
 Lumin=2.211e-2;
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%
 Cumax=8.1528e-9;
 Cumin=7.5721e-9;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%
RLC0max=[Rumax ;Lumax ;Cumax]' ;
RLC0min=[Rumin ;Lumin ;Cumin]' ;

%% %%======= ZV ====%%%
% Rvmax=5.33e6;
```

```
% Rvmin=7.41e3;
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Lvmax=3.94e-2;
% Lvmin=2.192e-2;
% %%%%%%%%%%%%%%%%%
%  Cvmax=8.0919e-9;
%  Cvmin=7.5838e-9;
% %%%%%%%%%%%%%%%%%
% RLC0max=[Rvmax ;Lvmax ;Cvmax]' ;
% RLC0min=[Rvmin ;Lvmin ;Cvmin]' ;
% %
% % %%======= ZW ====%%%
%  Rumax=5.3910e6;
%  Rumin=7.2960e3;
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%
%  Lumax=3.9612e-2;
%  Lumin=2.211e-2;
% %%%%%%%%%%%%%%%%%
%  Cumax=8.1528e-9;
%  Cumin=7.5721e-9;
% %%%%%%%%%%%%%%%%%
% RLC0max=[Rumax ;Lumax ;Cumax]' ;
% RLC0min=[Rumin ;Lumin ;Cumin]' ;
%% %%%%%===========Parameters ABC====================%%%%%%%%%
D=length(RLC0min);
FoodNumber = 10; %% /// Le nombre de sources de nourriture == la moitié de la taille de la colonie ///
%%

%%
Range = repmat((RLC0max-RLC0min),FoodNumber ,1 );
Lower = repmat(RLC0min, [FoodNumber 1]);
Foods = rand(FoodNumber ,D) .* Range + Lower;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  ini=0;
for i=1:FoodNumber
  ObjVal1 = Z1-(sqrt((1./Foods(i,1)).^2  +((w*Foods(i,3))-(1./(w*Foods(i,2))))));

  ini=ini+1 ;
end
  disp(['Foods(i,1) =',num2str(Foods(i,1))]);
  disp(['Foods(i,2) =',num2str(Foods(i,2))]);
  disp(['Foods(i,3) =',num2str(Foods(i,3))]);
figure(1)
 plot (w/(2*pi),(Zcompx1.*2),'r',w/(2*pi),abs(((ObjVal1))),'b--','LineWidth',2)
 xlabel('fréquence,Hz')
ylabel('Impédance, ohm')
 legend('Zopt1','Z estimée1 (using ABC)')
 grid on

%%%%%%%%%%l%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
sol=(RLC0max-RLC0min).*rand(1,D)+RLC0min;
disp(['meilleure sol =',num2str(sol)]);
ObjVal1 =  Z1-sqrt((1/sol(1)).^2+ ((w*sol(3))-(1./(w*sol(2)))).^2).^2 ;
Zobjval1=abs(ObjVal1);
```

```
 figure(2)
plot (w./(2.*pi),(Z1),'r',w./(2.*pi),abs(ObjVal1),'b--','LineWidth',2)
legend('Z est 2','Z optimisée 2 (using ABC)','erreur = 2.945 %')
 xlabel('fréquence,Hz')
ylabel('Impédance, ohm')
grid on

% figure(3)
% plot(w./(2.*pi),(Z2),'r',w./(2.*pi),abs(ObjVal1),'b--','LineWidth',2)
%  ylabel('Impédance, ohm')
%  xlabel('Fréquence,HZ')
% legend('Z mesurée 2','Z optimisée 2 (using ABC)','erreur = 3.235 %')
% grid on

%% %%%%%% errrrrrrrrrrrrrrrrrr entre Zmes et Zestm
eZ1=errorZ(Zobjval2,Z,Iinf,Isup);
eZ2=errorZ(Zobjval2,Z,Iinf,Isup);
eZ3=errorZ(Zobjval2,Z,Iinf,Isup);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
dataeZ=[eZ1];
dataeZ=[eZ2];
dataeZ=[eZ3];
resultats=[dataeZ];
end
function et=errorZ(Z,Zobjval2,Iinf,Isup)
 et=0;
 for i=Iinf:2:Isup
 e=(abs(Z(i)-Zobjval2(i)))/(abs(Zobjval2(i)));
 if e<0.1
 et=et+e;
 else
    et=et+0.1;
 end
 end
 et=et*100/i;
end
```