



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أكلي محمد أولحاج - البويرة

Université Akli Mohand Oulhadj Bouira

كلية العلوم التطبيقية

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Électrique



MÉMOIRE DE MASTER

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Réaliser par :

SEMAOUN MOHAMED

GUEROUAZ LOTFI

Thème

**Étude de ferrorésonance dans les réseaux électriques
- Transformateur -**

Soutenu : Le/...../2026

Membres du Jury :

Mr :

.....	Prof.	Univ. Bouira	Président
.....	M.C.A.	Univ. Bouira	Rapporteur
.....	M.C.B.	Univ. Bouira	Examineur
.....	M.A.A.	Univ. Bouira	Examineur

Promotion : 2026



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Bouira, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie électrique



Bouira le : 11/06/2026

Autorisation de soutenance d'un mémoire de Master

Je soussigné, l'enseignant: Abdelghani YAHIOU

Encadreur des étudiants :

- 1- SEMAOUN Mohamed
- 2- GUEROUAZ Lotfi

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Les autorise à soutenir leur **mémoire** de Master.

Signature du rapporteur

YAHIOU Abdelghani

Résumé

Ce mémoire présente une étude de la ferorrésonance dans les réseaux électriques à l'aide de MATLAB/Simulink. Le travail repose sur une partie théorique consacrée aux réseaux, aux transformateurs et au comportement non linéaire du circuit magnétique, puis sur une partie d'application basée sur la simulation d'un réseau triphasé avec capacités phase-terre, disjoncteur monophasé et transformateurs de tension JDZJ-10. Trois cas sont étudiés : transformateurs linéaires à vide, transformateurs saturables à vide et transformateurs saturables avec charge nominale. Les résultats montrent que la saturation magnétique et la valeur de la capacité du réseau favorisent l'apparition des surtensions, du déplacement du point neutre et de la distorsion harmonique. Cette étude met en évidence l'intérêt de la simulation numérique pour comprendre, prévoir et limiter la ferorrésonance dans les réseaux électriques.

MOTS CLÉS : Ferorrésonance, réseaux électriques, MATLAB/Simulink, transformateur saturable, JDZJ-10, saturation magnétique, tension du neutre, Non-linéaire, THD.

Abstract

This dissertation presents a study of ferroresonance in electrical power networks using MATLAB/Simulink. The work is based on a theoretical part dealing with power networks, transformers and the nonlinear magnetic behavior of the core, followed by an application part devoted to the simulation of a three-phase network including phase-to-ground capacitances, a single-phase circuit breaker and JDZJ-10 voltage transformers. Three cases are analyzed: unloaded linear transformers, unloaded saturable transformers and saturable transformers with nominal load. The results show that magnetic saturation and network capacitance promote overvoltages, neutral-point displacement and harmonic distortion. This study highlights the usefulness of numerical simulation for understanding, predicting and reducing ferroresonance in electrical power systems.

KEY WORDS: Ferroresonance, power networks, MATLAB/Simulink, saturable transformer, JDZJ-10, magnetic saturation, neutral voltage, Non-linear, THD.

ملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة ظاهرة الرنين الحديدي في الشبكات الكهربائية باستعمال برنامج MATLAB/Simulink. يعتمد العمل على جزء نظري يتناول الشبكات الكهربائية والمحولات والسلوك غير الخطي للدائرة المغناطيسية، ثم على جزء تطبيقي يعتمد على محاكاة شبكة ثلاثية الطور تضم ساعات بين الطور والأرض، قاطعاً أحادي الطور ومحولات جهد من نوع JDZJ-10. تمت دراسة ثلاث حالات: محولات خطية بدون حمل، محولات قابلة للتشبع بدون حمل، ومحولات قابلة للتشبع مع حمل اسمي. أظهرت النتائج أن التشبع المغناطيسي وقيمة سعة الشبكة يساهمان في ظهور ارتفاعات الجهد، وانزياح نقطة التعادل والتشوه التوافقي. وتبرز هذه الدراسة أهمية المحاكاة العددية في فهم ظاهرة الرنين الحديدي والتنبؤ بها والحد من أثارها في الشبكات الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: الرنين الحديدي، الشبكات الكهربائية، MATLAB/Simulink، المحول القابل للتشبع، JDZJ-10، التشبع المغناطيسي، توتر نقطة التعادل، غير خطي، THD.

Remerciements

En tout premier lieu, nous rendons grâce à Allah, qui nous a bénis de santé, de patience de courage et de volonté sans lesquelles ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Ce mémoire n'est pas le fruit d'un effort solitaire. Il est le reflet de rencontres, de soutiens et de confiances accordés avec générosité, et il nous tient à cœur d'en honorer chaque artisan.

Nos premiers remerciements s'adressent à notre encadreur, Monsieur Abdelghani Yahiou, dont la bienveillance, la rigueur scientifique et la disponibilité ont guidé chacune de nos étapes. Sa confiance en nous et ses orientations pertinentes ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous exprimons également notre sincère reconnaissance à notre co-encadreur, Monsieur Mellah Hacene, pour ses remarques éclairées, son regard critique et son soutien constant qui ont enrichi ce travail bien au-delà de nos attentes.

Une pensée toute particulière va à Madame Aggoune Ghania, Cheffe du Département de Génie Électrique, pour son dévouement au service des étudiants et son engagement exemplaire au quotidien.

Nous saluons avec respect l'ensemble du corps enseignant du Département de Génie Électrique de l'Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, pour le savoir transmis avec passion et la rigueur inculquée au fil des années.

À nos collègues et amis de promotion, ces années partagées, les nuits de révision, les doutes surmontés ensemble et les victoires célébrées à deux : tout cela restera gravé. Merci d'avoir rendu ce parcours humain autant qu'académique.

À nos amis hors les murs de l'université, pour les mots d'encouragement au bon moment, la légèreté offerte dans les instants de pression et la fidélité de leur présence : vous comptez plus que vous ne le pensez.

Enfin, et surtout à nos parents et à nos familles : aucun mot ne saurait mesurer la profondeur de notre gratitude. Vos sacrifices silencieux, votre foi inébranlable en nous et votre amour indéfectible sont les fondations invisibles sur lesquelles repose chaque ligne de ce mémoire. Ce travail vous appartient autant qu'à nous.

À toutes celles et ceux qui ont croisé notre chemin et y ont laissé une empreinte positive, qu'elle soit grande ou discrète : merci.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mon cher père, symbole de patience, de courage et de sacrifice, pour son soutien, ses conseils et tous les efforts qu'il a fournis afin de me voir réussir.

À ma chère mère, source de tendresse, d'amour et de bénédiction, pour ses prières, son affection et sa présence rassurante qui m'ont toujours donné la force d'avancer.

À mes chères sœurs, Imen, Amat El Bari et Sara, avec tout mon amour et ma gratitude. Je leur souhaite une vie pleine de réussite, de bonheur et de belles réalisations, particulièrement à Sara, à qui je souhaite beaucoup de succès dans son baccalauréat.

À une chère amie Massylia, que j'estime profondément, je souhaite également beaucoup de réussite dans son baccalauréat, ainsi qu'un avenir brillant et rempli de bonheur.

À toute ma famille, pour son amour, son soutien et ses encouragements constants tout au long de mon parcours.

À mes chers amis, pour leur présence, leur aide précieuse, leurs encouragements et tous les moments partagés durant ces années d'études.

À toutes les personnes qui m'ont soutenu, conseillé et encouragé, de près ou de loin, dans la réalisation de ce travail.

Je dédie ce mémoire avec tout mon amour, ma profonde gratitude et mon respect le plus sincère.

SEMAOUN MOHAMED

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mon cher père, symbole de patience, de courage et de sacrifice, pour son soutien, ses conseils et tous les efforts qu'il a fournis afin de me voir réussir.

À ma chère mère, source de tendresse, d'amour et de bénédiction, pour ses prières, son affection et sa présence rassurante qui m'ont toujours donné la force d'avancer.
À mes chers frères, Fouad et Madjdi, avec toute mon affection, ma gratitude et mon respect. Je leur souhaite une vie remplie de bonheur, de réussite et de prospérité.

À l'épouse de mon frère, pour sa gentillesse, son soutien et sa bienveillance. Je lui adresse mes sincères remerciements et mes meilleurs vœux de bonheur et de réussite.

À mon cher neveu Yanis et à ma chère nièce Emilia, à qui je souhaite un avenir radieux, plein de succès, de joie et d'épanouissement.

À toute ma famille, pour son amour, son soutien et ses encouragements constants tout au long de mon parcours.

À mes chers amis, pour leur présence, leur aide précieuse, leurs encouragements et tous les moments partagés durant ces années d'études.

À toutes les personnes qui m'ont soutenu, conseillé et encouragé, de près ou de loin, dans la réalisation de ce travail.

Je dédie ce mémoire avec tout mon amour, ma profonde gratitude et mon respect le plus sincère.

GUEROVAZ LOTFI

SOMMAIRE

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

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET LES TRANSFORMATEURS

I.1 Introduction	5
I.2 Généralités sur les réseaux électriques	5
I.2.1 Définition et rôle d'un réseau électrique	5
I.2.2 Organisation générale du système électrique.....	5
I.2.3 Classification selon le niveau de tension	6
I.2.4 Principaux composants d'un réseau électrique.....	7
I.3 Généralités sur les transformateurs	8
I.3.1 Définition et principe de fonctionnement d'un transformateur	8
I.3.2 Constitution du transformateur	9
I.3.2.1 Le circuit magnétique.....	9
I.3.2.2 Les enroulements	10
I.3.2.3 Le système d'isolation	10
I.3.3 Types de transformateurs	11
I.3.3.1 Transformateur monophasé	11
I.3.3.2 Transformateur triphasé	12
I.3.3.3 Transformateur de puissance	13
I.3.3.4 Transformateur de tension (TT)	13
I.3.3.5 Transformateur de courant (TC).....	13
I.3.3.6 Transformateur de distribution	14
I.3.3.7 Transformateur à colonnes	15
I.3.3.8 Transformateur cuirassé	15
I.3.3.9 Transformateur d'interconnexion ou autotransformateur	16
I.4 Comportement magnétique du circuit ferromagnétique.....	17

I.4.1 Matériaux ferromagnétiques	17
I.4.2 Le phénomène d'hystérésis et la courbe B-H.....	18
I.4.3 Non-linéarité du noyau magnétique	19
I.4.4 La saturation magnétique	21
I.5 Les transitoires du transformateur (Régimes transitoires)	21
I.5.1 Le courant d'enclenchement (courant d'appel)	21
I.5.2 Surtensions de commutation (Les transitoires de manœuvre)	22
I.6 Modélisation électrique du transformateur	23
I.6.1 Schéma équivalent du transformateur monophasé linéaire sans saturation	23
I.6.2 Schéma équivalent du transformateur monophasé avec saturation	24
I.7 Les surtensions	26
I.7.1 Définition	26
I.7.2 Origine des surtensions	27
I.7.2.1 Origine interne	27
I.7.2.2 Origine externe	27
I.7.3 Classification des surtensions	27
I.7.4 Conséquences des surtensions	28
I.8 Conclusion	28

CHAPITRE II : THÉORIE DE FERRORESONANCE

II.1 Introduction	30
II.2 Résonance électrique dans les circuits linéaires	30
II.2.1 Définition	30
II.2.2 Résonance série	30
II.2.3 Résonance parallèle	34
II.3 Ferrorésonance	35
II.3.1 Définition	35
II.3.2 Ferrorésonance série	35
II.3.3 Ferrorésonance parallèle	37
II.4 Différence entre résonance et ferrorésonance	38

II.5 Conditions d'apparition de la ferorrésonance	39
II.6 Classification des régimes ferorrésonants	40
II.6.1 Régime fondamental	40
II.6.2 Régime sous-harmonique	40
II.6.3 Régime quasi-périodique	41
II.6.4 Régime chaotique	42
II.7 Différentes approches pour l'étude de la ferorrésonance :.....	42
II.7.1 Méthode analytique	42
II.7.2 Simulation par analogie	43
II.7.3 Essai réel sur terrain	43
II.7.4 Mesure en laboratoire	43
II.7.5 Simulation numérique	44
II.8 Situations de réseaux électriques favorisant la ferorrésonance	44
II.8.1 Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un ou plusieurs disjoncteurs ouverts	44
II.8.2 Transformateurs de tension (TT) connectés à un système à neutre isolé	45
II.8.3 Transformateur condensateur de tension (TCT)	46
II.8.4 Transformateur alimenté accidentellement sur une ou deux phases	47
II.9 Conclusion	48

CHAPITRE III : APPLICATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

III.1 Introduction.....	50
III.2 Description du logiciel de simulation MATLAB/Simulink	50
III.3 Description du transformateur utilisé	50
III.3.1 Transformateur de potentiel JDZJ-10.....	50
III.3.2 Identification des paramètres du transformateur	51
III.3.2.1 Données nominales du transformateur, [4].....	51
III.3.2.2 Calcul des grandeurs de bases	52
III.3.2.3 Caractéristique de saturation du transformateur JDZJ-10	52
III.4 Description du réseau simulé	54

III.5 Simulation et interprétation des résultats.....	56
III.5.1 Transformateur linéaire à vide.....	56
III.5.1.1 Interprétations des résultats :	60
III.5.2 Transformateur saturable (non-linéaire) à vide	60
III.5.2.1 Interprétations des résultats	64
III.5.3 Transformateur saturable (non linéaire) avec charge nominale	65
III.5.3.1 Interprétation des résultats	69
III.6 Interprétation générale des résultats	70
III.7 Conclusion	71
Conclusion générale.....	73
Bibliographie.....	78

Liste des figures

Figure I.1: Schéma général d'un réseau électrique.	6
Figure I.2: Niveaux de tension normalisés, [8].....	7
Figure I.3: Le circuit magnétique du transformateur.	9
Figure I.4: Le système d'Isolation.	10
Figure I.5: Le système de refroidissement.....	11
Figure I.6: Transformateur monophasé.	12
Figure I.7: Transformateur triphasé.....	12
Figure I.8: Transformateur de puissance.	13
Figure I.9: Transformateur de courant (TC).	14
Figure I.10: Transformateur de distribution.	14
Figure I.11: Transformateur à colonnes.	15
Figure I.12: Transformateur d'interconnexion ou autotransformateur.....	16
Figure I.13: Exemple de cycle d'hystérésis [17]	19
Figure I.14: Comportement non linéaire du noyau magnétique [17].	20
Figure I.15 : Courant d'appel d'un transformateurs [19].....	22
Figure I.16: Schéma équivalent d'un transformateur monophasé linéaire sans saturation.....	23
Figure I.17: Schéma équivalent du transformateur monophasé avec saturation.....	25
Figure I.18: Exemple de surtension [21].....	26
Figure II.1 : Schéma électrique d'un circuit série alimenté par une source sinusoïdale.	31
Figure II.2: Représentation de Fresnel d'un circuit série alimentée par une tension V_s .	31
Figure II.3 : Caractéristiques de et V_C , V_L , I et V_s [22].....	33
Figure II.4 : Exemple de surtension résonance [21].....	33
Figure II.5 : Circuit R, L, C parallèle alimenté par une source de courant.....	34
Figure II.6 : Circuit ferrorésonant série.	35

Figure II.7 : Ferrorésonance série - résolution graphique [18].	37
Figure II.8 : Circuit ferrorésonant parallèle.	37
Figure II.9 : Régime fondamentale [3].	40
Figure II.10 : Régime sous-harmonique [3].	41
Figure II.11 : Régime quasi-périodique [3].	41
Figure II.12 : Régime chaotique [3].	42
Figure II.13 : Transformateur de tension connecté en série avec un disjoncteur ouvert.	45
Figure II.14 : Ferrorésonance de TT entre phase et terre avec transformateur de source à neutres isolés	46
Figure II.15 : Schéma électrique d'un transformateur condensateur de tension.	46
Figure II.16 : Exemples de systèmes déséquilibres a risque de ferrorésonance.	47
Figure III.1: Transformateur de potentiel JDZJ-10 [35].	51
Figure III.2: Courbe caractéristique de saturation du transformateur de tension JDZJ-10 [7].	53
Figure III.3: Réseau électrique simule avec des transformateurs saturables.	54
Figure III.4: Réseau électrique simule avec des transformateurs linéaires.	55
Figure III.5: Réseau simule avec des transformateurs saturables avec une charge résistive nominale.	55
Figure III.6: Modèle de réseau simule avec transformateurs linéaires à vide sous MATLAB/Simulink	56
Figure III.7: Formes d'onde des tensions V_{abc} et du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$.	57
Figure III.8: Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$	57
Figure III.9: Formes d'onde des tensions V_{abc} et du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$	58
Figure III.10: Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$	58
Figure III.11: Formes d'onde des tensions V_{abc} et du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$	59

Figure III.12: Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$	59
Figure III.13: Modèle de réseau simule avec transformateurs saturables à vide sous MATLAB/Simulink	61
Figure III.14: Formes d'onde des tensions V_{abc} et du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$	61
Figure III.15: Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$	62
Figure III.16: Formes d'onde des tensions V_{abc} et du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$	62
Figure III.17: Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$	63
Figure III.18: Formes d'onde des tensions V_{abc} et du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$	63
Figure III.19: Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$	64
Figure III.20: Modèle de réseau simule avec transformateurs saturables à vide sous MATLAB/Simulink	65
Figure III.21: Formes d'onde des tensions V_{abc} et du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$	66
Figure III.22: Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$	66
Figure III.23: Formes d'onde des tensions V_{abc} et du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$	67
Figure III.24: Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$	67
Figure III.25: Formes d'onde des tensions V_{abc} et du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$	68
Figure III.26: Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$	68

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des réseaux électriques selon le niveau de tension [8].....	7
Tableau I.2: Matériaux ferromagnétiques les plus utilisés et leurs propriétés [16].....	17
Tableau II.1 : Comparaison entre résonance linéaire et ferrorésonance [3].....	39
Tableau III.1: Valeurs de caractéristique de saturation en pu [7].	53

Symboles et abréviations

	Désignation	Unité
B	Induction magnétique	Tesla (T)
f	Fréquence	Hertz (Hz)
f_0	Fréquence propre ou fréquence de résonance	Hertz (Hz)
H	Champ magnétique	A/m
I	Courant électrique	Ampère (A)
I_1	Courant primaire du transformateur	Ampère (A)
I_2	Courant secondaire du transformateur	Ampère (A)
I_m	Courant magnétisant	Ampère (A)
L_1, L_2	Inductances de fuite primaire et secondaire	Henry (H)
L_m	Inductance magnétisante	Henry (H)
m	Rapport de transformation	Sans unité
N_1, N_2	Nombre de spires du primaire et du secondaire	Sans unité
P_{fer}	Pertes fer du transformateur	Watt (W)
P_{cu}	Pertes cuivre dans les enroulements	Watt (W)
R_1, R_2	Résistances des enroulements primaire et secondaire	Ohm (Ω)
R_m	Résistance représentant les pertes fer	Ohm (Ω)
μ	Perméabilité magnétique	H/m
U_m	Tension maximale du matériel	Volt (V)
V_1	Tension primaire du transformateur	Volt (V)
V_2	Tension secondaire du transformateur	Volt (V)
Φ	Flux magnétique dans le noyau	Weber (Wb)
ω	Pulsation angula	Rad/s

Abréviations

	Signification
BTA	Basse tension A
BTB	Basse tension B
BT	Basse tension
BT	Basse tension
CEI	Commission Électrotechnique Internationale

HTA	Haute tension A
HTB	Haute tension B
FFT	Transformée de Fourier rapide
<i>THD</i>	Taux de distorsion harmonique
TBT	Très basse tension
TT	Transformateur de tension
TC	Transformateur de courant

Introduction générale.

Introduction générale

L'énergie électrique occupe aujourd'hui une place centrale dans le fonctionnement de nos sociétés modernes. Des foyers résidentiels aux grandes industries, en passant par les infrastructures de santé et de communication, la continuité et la qualité de l'alimentation électrique constituent des exigences fondamentales que les ingénieurs et les exploitants de réseaux s'efforcent de garantir en permanence. Cette dépendance croissante vis-à-vis de l'électricité a conduit au développement de réseaux de transport et de distribution de plus en plus complexes, soumis à des contraintes d'exploitation de plus en plus sévères, [1].

Dans ce contexte, la maîtrise des phénomènes susceptibles de perturber ou d'endommager les équipements du réseau représente un enjeu majeur pour les spécialistes en génie électrique. Parmi ces phénomènes, les surtensions occupent une place particulièrement préoccupante, car elles peuvent provoquer des graves problèmes sur les matériels, voire des coupures d'alimentation aux conséquences économiques et sociales importantes. Ces surtensions peuvent avoir des origines très diverses comme la foudre, les manœuvres de commutation, les défauts monophasés, etc., mais l'une d'entre elles reste encore aujourd'hui mal connue et sous-estimée par de nombreux praticiens : c'est la ferrorésonance.

La ferrorésonance est un phénomène électrique non linéaire qui résulte de l'interaction entre une capacité et l'inductance non linéaire du noyau ferromagnétique saturable d'un transformateur [2]. Contrairement à la résonance classique observée dans les circuits linéaires, la ferrorésonance peut se manifester pour une large plage de valeurs de tension et de fréquence, ce qui la rend particulièrement imprévisible et difficile à détecter. Ses manifestations peuvent prendre plusieurs formes : oscillations à la fréquence fondamentale, régimes sous-harmoniques, oscillations quasi-périodiques, ainsi que des régimes chaotiques. Autant de situations qui génèrent des surtensions pouvant atteindre plusieurs fois la tension nominale et des surintensités susceptibles de détruire les équipements de mesure, les transformateurs de tension et les parafoudres [3] [4].

La ferrorésonance a été observée pour la première fois en 1907 par Joseph Bethenod, qui a mis en évidence ce phénomène dans des circuits contenant des inductances non linéaires. Le terme « ferrorésonance » a ensuite été introduit et défini par l'ingénieur français Paul Boucherot en 1920 [5].

Dans les années 1920-1930, plusieurs chercheurs ont approfondi l'étude du phénomène, notamment :

- Volterra (1927) : analyse mathématique du phénomène.
- Duffing : développement de l'équation non linéaire associée au phénomène.
- Rudenberg (1939) : étude de la ferrorésonance dans les réseaux électriques.

La ferrorésonance provoque des problèmes dans les réseaux électriques, Parmi ces causes l'ouverture monophasée d'un disjoncteur ou l'alimentation d'un transformateur à vide via un câble souterrain long. La difficulté principale réside dans le fait que les conditions d'apparition de la ferrorésonance dépendent simultanément de plusieurs paramètres parmi notamment : la valeur de la capacité, le niveau de tension, la saturation du transformateur et les conditions initiales du circuit ce qui rend son analyse et sa prévention difficiles [6].

Dans cette perspective, la simulation numérique est devenue un outil indispensable pour l'étude de la ferrorésonance. Des environnements comme MATLAB/Simulink, équipés de bibliothèques dédiées aux systèmes électriques de puissance, permettent de modéliser avec précision le comportement non linéaire des transformateurs et de déduire les différents régimes ferrorésonants dans des conditions contrôlées [7]. Cette approche permet d'explorer l'influence de chaque paramètre du circuit sur la nature et l'intensité du phénomène.

Ainsi, la problématique de ce travail peut être formulée comme suit : comment modéliser et analyser, à l'aide de MATLAB/Simulink, l'influence des capacités phase-terre, et de la saturation magnétique et de la charge sur l'apparition et la sévérité de la ferrorésonance dans un réseau électrique comportant des transformateurs de tension ?

Les objectifs principaux de notre travail sont :

- Présenter les fondements théoriques des réseaux électriques et du comportement magnétique non linéaire des transformateurs.
- Analyser en profondeur le phénomène de ferrorésonance, ses conditions d'apparition et ses différents régimes.
- Modéliser un circuit ferrorésonant représentatif sous MATLAB/Simulink, en intégrant les caractéristiques réelles du transformateur de tension JDZJ-10.
- Simuler et analyser les trois principaux régimes de ferrorésonance en faisant varier la capacité à la terre.

- Interpréter les résultats obtenus et proposer des éléments de réflexion pour la détection et la prévention du phénomène.

Ce mémoire est devisé en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre expose une présentation des généralités sur les réseaux électriques et sur les transformateurs et leurs organisations.
- Le deuxième chapitre présente phénomène de ferrorésonance et leurs types et la différence entre la résonance classique.
- Le troisième chapitre présente la modélisation et la simulation avec le circuit étudié, les paramètres du transformateur JDZJ-10 et des simulations sous MATLAB/Simulink pour différents régimes. Et discussion des résultats obtenus.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale qui résume les principaux enseignements de ce travail.

Chapitre I.

Généralités sur les réseaux électriques et les transformateurs.

I.1 Introduction

À l'origine, le réseau électrique a été construit avec un objectif fondamental : transporter l'énergie produite par les grandes centrales de génération thermiques, hydrauliques ou nucléaires vers les consommateurs, parfois situés à des centaines de kilomètres des points de production [1].

Avec le temps, ce système s'est considérablement complexifié, intégrant des milliers de kilomètres de lignes, des centaines de postes de transformation, ainsi qu'une multitude d'équipements de protection et de régulation, tous coordonnés pour garantir en permanence la qualité de l'énergie et la continuité du service [5].

Parmi les phénomènes susceptibles de perturber ce réseau, la ferrorésonance occupe une place particulière, directement liée au comportement non linéaire du noyau ferromagnétique des transformateurs.

Dans ce premier chapitre nous allons exposer les bases théoriques nécessaires pour la compréhension du sujet, en abordant successivement les réseaux électriques, les transformateurs, le comportement magnétique du circuit ferromagnétique et les surtensions.

I.2 Généralités sur les réseaux électriques

I.2.1 Définition et rôle d'un réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'équipements et de dispositifs destinés à transporter l'énergie électrique depuis les centres de production jusqu'aux consommateurs finaux, en assurant la continuité, la sécurité et la qualité de l'alimentation. Il regroupe plusieurs éléments essentiels : générateurs, lignes électriques, postes de transformation et dispositifs de sécurité [8]. Son exploitation repose sur trois objectifs fondamentaux : assurer une distribution fiable et continue de l'électricité même en cas de perturbations, garantir la qualité de la forme d'onde de tension conformément aux engagements contractuels, et optimiser l'exploitation pour réduire les pertes d'énergie et les coûts de maintenance.

I.2.2 Organisation générale du système électrique

Un système électrique est organisé en plusieurs niveaux complémentaires qui assurent ensemble le cheminement de l'énergie depuis sa source jusqu'à son utilisation finale. Cette organisation hiérarchique distingue trois grandes fonctions : le transport, la répartition et la distribution [1] [8].

- Le réseau de transport est l'épine dorsale du système électrique. Il achemine l'énergie produite par les grandes centrales vers les grands centres de consommation à des niveaux de tension très élevés, généralement entre 225 kV et 400 kV, afin de minimiser les pertes par effet Joule sur de longues distances [1].
- Le réseau de répartition, situé en position intermédiaire et opérant entre 63 kV et 150 kV, assure la redistribution régionale de l'énergie et alimente les grands consommateurs industriels.
- Le réseau de distribution constitue le dernier maillon avant l'utilisateur final, se déclinant en moyenne tension (5 à 30 kV) et en basse tension (230/400 V) [5] [8].

La Figure I.1 présente le schéma général d'un réseau électrique

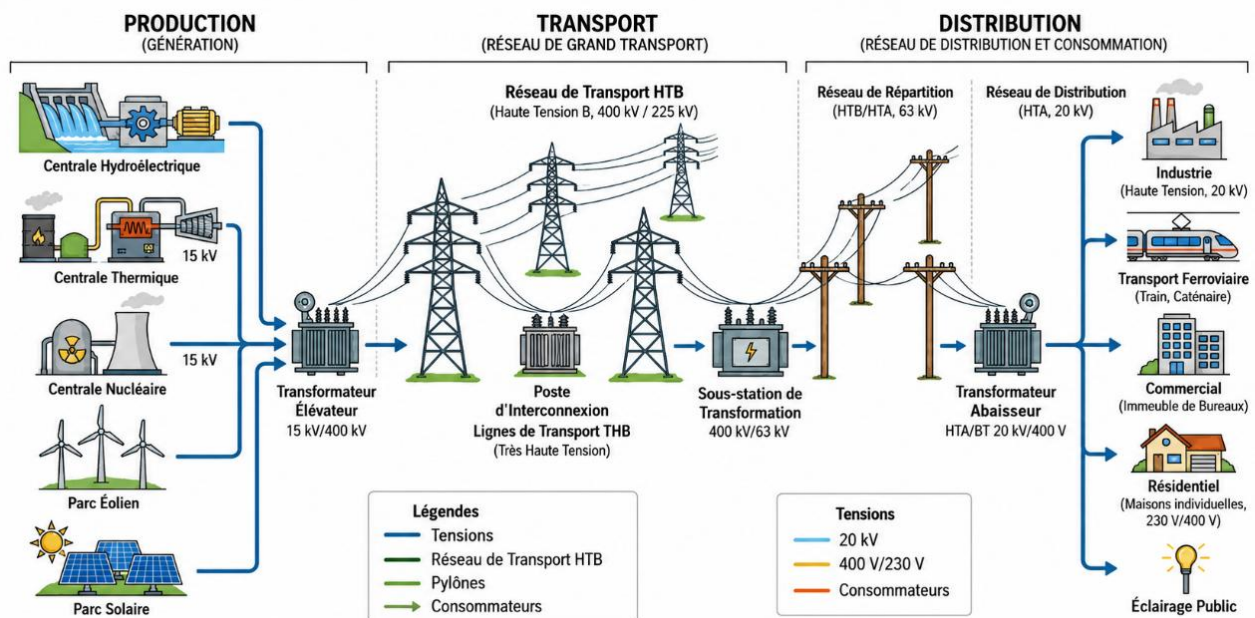


Figure I.1 : Schéma général d'un réseau électrique.

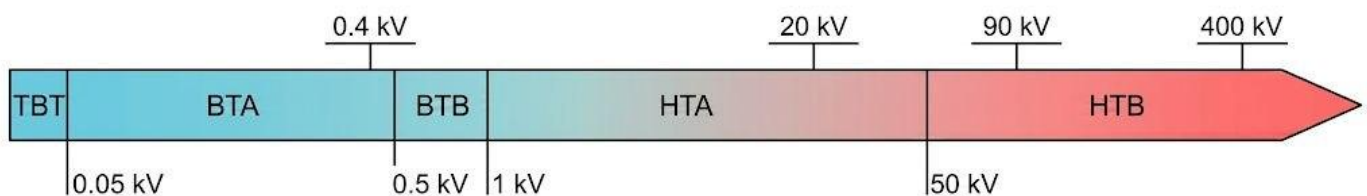
I.2.3 Classification selon le niveau de tension :

La classification des réseaux électriques selon le niveau de tension conditionne directement le type de matériel utilisé, les normes de sécurité applicables et les distances de transport. Le tableau ci-dessous résume les différentes catégories selon les normes internationales en vigueur [9] [10] :

Tableau I.1 : Classification des réseaux électriques selon le niveau de tension, [8].

Catégorie	Niveau de tension	Application principale
Très Haute Tension (THT)	$U > 150 \text{ kV}$ (225 kV, 400 kV)	Transport longue distance et interconnexions
Haute Tension (HT)	$50 \text{ kV} \leq U \leq 150 \text{ kV}$	Répartition régionale
Moyenne Tension (MT)	$1 \text{ kV} \leq U \leq 50 \text{ kV}$	Distribution primaire (5–30 kV)
Basse Tension (BT)	$U < 1 \text{ kV}$ (230/400 V)	Distribution finale, habitations et commerces

Les niveaux de tension sont classés comme ci-dessous :

**Figure I.2**: Niveaux de tension normalisés [8].

I.2.4 Principaux composants d'un réseau électrique

Un réseau électrique est constitué de plusieurs composants dont chacun remplit une fonction précise dans la chaîne de l'énergie :

Les centrales de production : elles convertissent l'énergie primaire thermique, hydraulique, nucléaire ou renouvelable en énergie électrique, puis élèvent la tension produite par des transformateurs avant injection dans le réseau de transport [5].

Les lignes aériennes et câbles souterrains : les lignes aériennes, constituées de conducteurs en aluminium armé d'acier (ACSR) suspendus à des pylônes, assurent le transport de l'énergie sur de longues distances à faible coût. Les câbles souterrains, préférés en zones urbaines, présentent une capacité linéique bien supérieure source directe de ferrorésonance lorsqu'ils alimentent un transformateur à vide [2] [10].

Les postes de transformation : les postes de transformation sont des nœuds stratégiques du réseau, ils abritent les transformateurs de puissance et les équipements de protection, de mesure et de commande nécessaires au changement de niveau de tension entre deux parties du réseau [5] [9].

Les postes sources : interfaces entre le réseau de répartition à haute tension et le réseau de distribution à moyenne tension, ils alimentent les départs MT desservant une zone géographique déterminée et sont équipés de dispositifs de protection et d'automatismes de reconfiguration [8].

Les appareils de coupure et de protection : disjoncteurs, sectionneurs et fusibles permettent les manœuvres d'exploitation et l'isolement rapide des zones défaillantes. Certaines manœuvres monophasées constituent des conditions favorables au déclenchement de la ferromagnétisme.

I.3 Généralités sur les transformateurs

I.3.1 Définition et principe de fonctionnement d'un transformateur

Un transformateur est un dispositif statique formé d'un enroulement unique ou de deux enroulements ou davantage couplés, avec son noyau magnétique, afin de générer un couplage mutuel entre les circuits. Les transformateurs sont employés exclusivement dans les systèmes de puissance électrique afin d'assurer le transfert d'énergie par induction électromagnétique entre des circuits fonctionnant à fréquence identique, généralement en modifiant les niveaux de tension et de courant [11].

Plusieurs catégories de transformateurs sont employées dans diverses applications, notamment dans les domaines de l'audio, de la radio, des instruments et de l'énergie. Cet ouvrage est consacré uniquement aux applications des transformateurs de puissance relatives à la transmission et à la distribution de l'énergie électrique. Les transformateurs de puissance sont couramment employés par les entreprises de distribution électrique traditionnelles, les centrales électriques ainsi que les installations industrielles.

Son principe de fonctionnement repose sur le phénomène d'induction électromagnétique, découvert par Michael Faraday en 1831. Lorsqu'une tension alternative est appliquée à l'enroulement primaire, elle fait circuler un courant qui crée un flux magnétique alternatif variable Φ dans le noyau. Ce flux, guidé par le circuit magnétique, traverse l'enroulement secondaire et y induit par induction une force électromotrice alternative dont la valeur dépend

du nombre de spires de chacun des deux enroulements.

La relation fondamentale qui régit le fonctionnement d'un transformateur idéal est donnée par le rapport de transformation m , défini comme suit :

$$m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{I.1})$$

Cette relation montre que si le nombre de spires au secondaire est supérieur à celui du primaire ($N_2 > N_1$), la tension est élevée et le courant est réduit on parle de transformateur élévateur. Dans le cas contraire ($N_2 < N_1$), la tension est abaissée et le courant augmente on parle de transformateur abaisseur [12].

I.3.2 Constitution du transformateur

I.3.2.1 Le circuit magnétique

Le circuit magnétique est appelé noyau ou noyau ferromagnétique constitue le cœur du transformateur. C'est lui qui assure le couplage magnétique entre les enroulements primaire et secondaire en canalisant et en guidant le flux magnétique créé par le courant d'excitation. Il est fabriqué à partir de tôles en acier au silicium, empilées les unes sur les autres et légèrement isolées entre elles par un vernis ou un oxyde, afin de réduire les courants de Foucault qui seraient source de pertes et d'échauffement excessif [12]. L'utilisation de l'acier au silicium n'est pas anodine ce matériau présente une perméabilité magnétique élevée et des pertes par hystérésis relativement faibles, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications à fréquence industrielle. La figure I.3 illustre le circuit magnétique du transformateur.

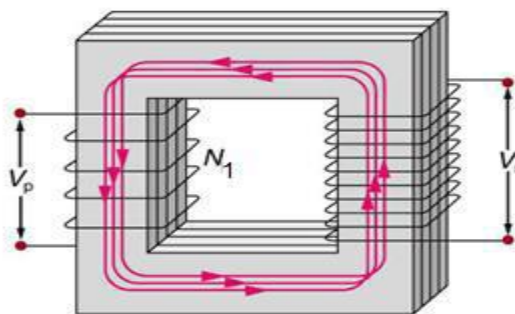


Figure I.3: Le circuit magnétique du transformateur.

I.3.2.2 Les enroulements

Les enroulements également appelés bobinages sont les éléments conducteurs du transformateur. Ils sont constitués de spires de fil conducteur, généralement en cuivre ou en aluminium, bobiné autour du noyau magnétique. On distingue l'enroulement primaire, connecté à la source d'alimentation, et l'enroulement secondaire, connecté à la charge. Dans les transformateurs de puissance, ces enroulements sont soigneusement conçus pour minimiser les résistances et les réactances de fuite, tout en supportant les contraintes thermiques et mécaniques liées aux courants de court-circuit [12]. Le nombre de spires de chaque enroulement détermine directement le rapport de transformation.

I.3.2.3 Le système d'isolation

L'isolation est un aspect absolument critique dans la conception d'un transformateur, en particulier pour les équipements fonctionnant à des niveaux de tension élevés. Elle assure la séparation électrique entre les différentes parties sous tension entre les enroulements eux-mêmes, entre les enroulements et le noyau, et entre les enroulements et la cuve tout en résistant aux contraintes thermiques, mécaniques et diélectriques auxquelles le transformateur est soumis tout au long de sa vie [12]. Les matériaux isolants utilisés sont variés : papier imprégné d'huile, résine époxy, gaz SF₆ pour certains transformateurs à isolation gazeuse. Dans les transformateurs immergés dans l'huile les plus courants dans les réseaux de distribution, l'huile minérale joue un double rôle elle assure l'isolation entre les parties conductrices et participe également au refroidissement de l'ensemble. La figure I.4 illustre le système d'isolation.

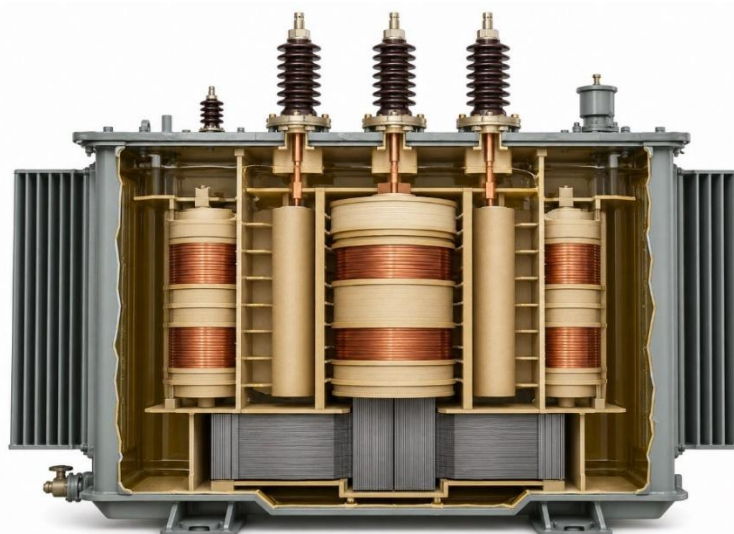


Figure I.4: Le système d'Isolation.

I.3.2.4 Le système de refroidissement

Le refroidissement est une fonction essentielle du transformateur, car toute perte d'énergie qu'elle soit due aux pertes fer dans le noyau ou aux pertes cuivre dans les enroulements se traduit par une élévation de température qui peut, si elle n'est pas maîtrisée, dégrader les matériaux isolants et réduire la durée de vie de l'équipement [12]. Selon la puissance et les conditions d'installation, différentes solutions de refroidissement sont adoptées. Les transformateurs de faible puissance sont généralement refroidis naturellement par l'air ambiant ou par l'huile en circulation naturelle.

Pour les transformateurs de plus forte puissance, des systèmes de refroidissement forcé ventilateurs, pompes à huile, échangeurs thermiques sont mis en œuvre pour évacuer plus efficacement la chaleur produite. La figure I.5 montre le système de refroidissement du transformateur.



Figure I.5: Le système de refroidissement.

I.3.3 Types de transformateurs

I.3.3.1 Transformateur monophasé

Le transformateur monophasé est la forme la plus fondamentale du transformateur. Il est constitué d'un seul enroulement primaire et d'un seul enroulement secondaire, couplés magnétiquement par un noyau ferromagnétique commun, et fonctionne avec une alimentation à une seule phase alternative [12]. Bien que les réseaux de transport et de distribution modernes soient majoritairement triphasés, le transformateur monophasé reste très présent dans de

nombreuses applications : alimentation des voies ferrées électrifiées, transformateurs de mesure, alimentation de certains équipements industriels spécifiques, et bien sûr dans les réseaux de distribution rurale où il est largement utilisé pour alimenter les habitations isolées à partir du réseau monophasé [13]. La Figure I.6 présente un transformateur monophasé.



Figure I.6 : Transformateur monophasé.

I.3.3.2 Transformateur triphasé

Le transformateur triphasé est le type le plus utilisé dans les réseaux électriques de puissance. Il regroupe en un seul équipement trois transformateurs monophasés couplés magnétiquement, permettant ainsi de transformer simultanément les trois tensions d'un système triphasé [12]. Par rapport à trois transformateurs monophasés séparés de même puissance totale, le transformateur triphasé présente des avantages considérables : il est plus compact, plus léger, moins coûteux à fabriquer et présente un meilleur rendement. C'est pourquoi on le retrouve massivement dans les postes de transformation, les postes sources et les centrales de production, où les puissances mises en jeu sont importantes et où l'encombrement et le coût sont des facteurs déterminants [13]. Les connexions des enroulements primaire et secondaire peuvent être réalisées en étoile (Y) ou en triangle (Δ), donnant lieu à différents groupes de couplage qui influencent directement le comportement du transformateur vis-à-vis des harmoniques et des défauts de réseau. La Figure I.7 représente un transformateur triphasé

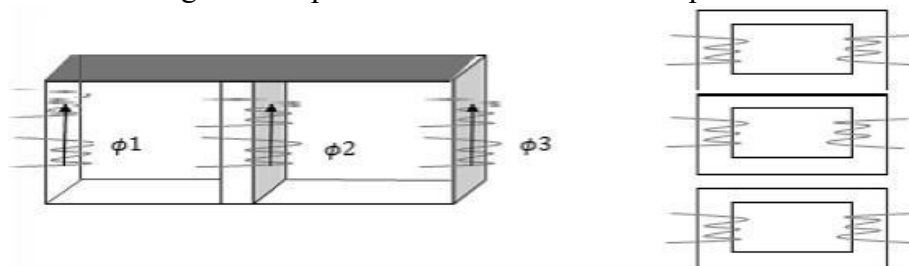


Figure I.7 : Transformateur triphasé.

I.3.3.3 Transformateur de puissance

Le transformateur de puissance est conçu pour fonctionner en permanence à pleine charge dans les réseaux de transport et de répartition. Il est dimensionné pour transiter des puissances considérables de quelques MVA à plusieurs centaines de MVA à des niveaux de tension très élevés [12]. Sa conception privilégie le rendement et la robustesse sur la durée, au détriment parfois de la compacité. On le retrouve principalement dans les postes de transformation THT/HT et HT/MT. La Figure I.8 montre un transformateur de puissance.



Figure I.8 : Transformateur de puissance.

I.3.3.4 Transformateur de tension (TT)

Le transformateur de tension est un transformateur de mesure dont la fonction est de réduire la haute tension du réseau à une valeur standardisée généralement 100 V compatible avec les appareils de mesure et de protection [12]. Contrairement aux transformateurs de puissance, il fonctionne pratiquement à vide, sa charge étant constituée uniquement des circuits de mesure et de protection qui lui sont connectés [14].

I.3.3.5 Transformateur de courant (TC)

Le transformateur de courant est l'autre grand type de transformateur de mesure. Sa fonction est de réduire les courants élevés circulant dans le réseau à une valeur standardisée, généralement 1 A ou 5 A permettant leur mesure par des appareils de faible calibre [13]. Contrairement au transformateur de tension, il fonctionne en permanence en court-circuit relatif, sa charge appelée "charge nominale" ou "burden" étant très faible. Son secondaire ne

doit jamais être ouvert en service, sous peine de voir apparaître des surtensions dangereuses pouvant détruire l'équipement et mettre en danger le personnel [15]. La Figure I.9 illustre un transformateur de courant (TC)



Figure I.9 : Transformateur de courant (TC).

I.3.3.6 Transformateur de distribution

Le transformateur de distribution est la version la plus répandue du transformateur dans les réseaux électriques. Il assure l'abaissement final de la tension du réseau moyenne tension (5 à 30 kV) vers la basse tension (230/400 V) utilisée par les consommateurs finals [13]. Moins puissant que le transformateur de puissance, généralement entre 25 kVA et quelques MVA, il est néanmoins présent en très grand nombre sur le territoire, souvent installé sur des pylônes en zone rurale ou dans des postes de transformation en zone urbaine. La Figure I.10 présente un transformateur de distribution



Figure I.10: Transformateur de distribution.

I.3.3.7 Transformateur à colonnes

Le transformateur à colonnes également appelé transformateur à noyau est une configuration dans laquelle les enroulements sont bobinés autour des colonnes du circuit magnétique. Dans cette disposition, le flux magnétique circule à l'intérieur du noyau et les enroulements l'entourent extérieurement [12]. Cette architecture est la plus répandue pour les transformateurs de distribution et de puissance, car elle offre plusieurs avantages pratiques : une bonne accessibilité aux enroulements pour la maintenance, une meilleure dissipation thermique grâce à la surface externe importante des bobinages, et une fabrication relativement aisée. Dans un transformateur triphasé à colonnes, le circuit magnétique comporte trois colonnes verticales reliées entre elles par deux culasses horizontales, chaque colonne portant les enroulements d'une phase [13]. La figure I.11 présente le transformateur à colonnes0



Figure I.11 : Transformateur à colonnes.

I.3.3.8 Transformateur cuirassé

Le transformateur cuirassé ou transformateur à enveloppe présente une architecture inverse par rapport au transformateur à colonnes. Dans cette configuration, c'est le circuit magnétique qui entoure et enveloppe les enroulements, comme une armure protectrice d'où le terme "cuirassé" [12]. Le flux magnétique se divise en deux chemins symétriques autour des enroulements centraux, ce qui confère à cette structure une meilleure tenue aux efforts mécaniques lors des courts-circuits, puisque les enroulements sont mécaniquement supportés

par le noyau de toutes parts. Cette configuration est particulièrement appréciée pour les transformateurs de très forte puissance et pour les applications où la robustesse mécanique est primordiale, comme les transformateurs de fours électriques ou les transformateurs de traction [13]. Elle est généralement plus difficile à fabriquer et moins accessible pour la maintenance que la configuration à colonnes.

I.3.3.9 Transformateur d'interconnexion ou autotransformateur

Ce type de transformateur sert à assurer l'interconnexion de deux systèmes opérant à des niveaux de tension distincts (par exemple, 400 kV et 220 kV, 345 kV et 138 kV). Il n'existe pas d'isolement électrique entre leurs enroulements primaire et secondaire, une partie des voltampères est transférée par conduction tandis que l'autre l'est par induction. La conception d'un autotransformateur s'avère plus économique lorsque le rapport entre la tension de l'enroulement secondaire et celle de l'enroulement primaire tend vers l'unité. Les autotransformateurs se distinguent par une vaste gamme de prises et la présence d'un enroulement tertiaire en configuration triangle, qu'il soit chargé ou non. L'enroulement tertiaire non alimenté fonctionne comme un enroulement stabilisateur en offrant une trajectoire aux courants de troisième harmonique [13]. La Figure I.12 illustre un autotransformateur (transformateur d'interconnexion).



Figure I.12 : Transformateur d'interconnexion ou autotransformateur.

I.4 Comportement magnétique du circuit ferromagnétique

I.4.1 Matériaux ferromagnétiques

Les matériaux ferromagnétiques constituent une famille particulière de matériaux magnétiques, caractérisée par une perméabilité magnétique très élevée et une capacité à se magnétiser fortement sous l'action d'un champ extérieur. Parmi eux, le fer, le nickel, le cobalt et leurs alliages sont les plus connus et les plus utilisés dans les applications électrotechniques [12]. Dans les transformateurs, le matériau de prédilection est l'acier au silicium, dont la teneur en silicium généralement comprise entre 3 % et 4 % permet de réduire significativement les pertes par hystérésis et d'augmenter la résistivité électrique du matériau, limitant ainsi les courants de Foucault. Ces tôles sont de plus laminées à froid dans le sens du laminage, ce qui leur confère une structure cristalline orientée favorisant la magnétisation dans la direction de laminage et réduisant encore davantage les pertes dans le fer [16]. Ce qui distingue fondamentalement les matériaux ferromagnétiques des autres matériaux magnétiques est l'existence de domaines de Weiss des petites régions microscopiques à l'intérieur desquelles tous les moments magnétiques atomiques sont alignés spontanément dans la même direction. En l'absence de champ magnétique extérieur, ces domaines sont orientés aléatoirement, de sorte que l'aimantation globale du matériau est nulle.

Tableau I.2: Matériaux ferromagnétiques les plus utilisés et leurs propriétés [16].

Matériau ferromagnétique	Perméabilité relative μ_r	Induction de saturation B_{sat}	Pertes fer
Acier au silicium non orienté	Moyenne à élevée	$\approx 1,8\text{--}2,0\text{ T}$	Moyennes
Acier au silicium à grains orientés / CRGO	Élevée, surtout dans le sens de laminage	$\approx 2,0\text{ T}$	Faibles
Acier au silicium Hi-B / CRGO amélioré	Très élevée	$\approx 2,0\text{ T}$	Très faibles
Acier amorphe	Élevée, selon la nuance	$\approx 1,5\text{--}1,6\text{ T}$	Très faibles
Ferrite Mn-Zn	$\approx 600\text{--}20\,000$	$\approx 0,32\text{--}0,55\text{ T}$	Faibles à haute fréquence
Fer pur	Très élevée après recuit	$\approx 2,15\text{ T}$	Élevées en courant alternatif

I.4.2 Le phénomène d'hystérésis et la courbe B-H

Si on soumet un matériau ferromagnétique à un champ magnétique alternatif qui est précisément le cas dans un transformateur alimenté en courant alternatif on observe que la relation $B - H$ ne suit pas le même chemin lors de la montée et lors de la descente du champ. Ce décalage entre les deux courbes est ce qu'on appelle le phénomène d'hystérésis [12]. Concrètement, lorsqu'on augmente H jusqu'à une valeur maximale puis qu'on le réduit progressivement jusqu'à zéro, l'induction B ne revient pas à zéro : il subsiste une aimantation résiduelle appelée rémanence (B_r). Pour ramener B à zéro, il faut appliquer un champ dans le sens opposé, dont la valeur est appelée champ coercitif (H_c). En faisant varier H de manière cyclique entre une valeur positive et une valeur négative, on décrit une courbe fermée appelée cycle d'hystérésis [16] [17].

L'aire de ce cycle d'hystérésis représente l'énergie dissipée sous forme de chaleur dans le matériau à chaque cycle d'aimantation. Ces pertes appelées pertes par hystérésis sont proportionnelles à la fréquence du réseau et constituent une composante importante des pertes à vide d'un transformateur. Pour les minimiser, on cherche à utiliser des matériaux à cycle d'hystérésis étroit les matériaux dits à faibles pertes comme les aciers au silicium à grains orientés [16] [18].

La relation entre l'induction magnétique B (en Tesla) et le champ magnétique H (A/m) dans un matériau ferromagnétique est représentée par la courbe $B - H$, également appelée courbe de première aimantation ou courbe de magnétisation. Cette courbe est l'une des caractéristiques les plus fondamentales d'un matériau magnétique, car elle traduit directement son comportement sous l'effet d'un champ exciteur [12] [17].

Contrairement à ce qui se passe dans les matériaux non magnétiques où B et H sont liés par une relation linéaire simple :

$$B = \mu_0 H \quad (I.2)$$

Dans les matériaux ferromagnétiques, cette relation est fortement non linéaire. La courbe $B - H$ présente une allure caractéristique en trois zones distinctes :

- La première zone correspond à la magnétisation initiale, où B croît lentement avec H . Les domaines de Weiss commencent à s'orienter dans le sens du champ, mais les mouvements sont encore limités et réversibles.
- La deuxième zone est la zone de forte perméabilité, où une faible augmentation de H provoque une augmentation rapide et importante de B . C'est la zone de fonctionnement normale d'un transformateur bien dimensionné, où la perméabilité magnétique est maximale.

$$\mu = B / H \quad (\text{I.3})$$

- La troisième zone est la zone de saturation, où malgré une augmentation importante de H , B n'augmente plus que très lentement. Presque tous les domaines de Weiss sont déjà alignés dans le sens du champ, et le matériau a atteint son aimantation maximale, [17]. C'est précisément cette zone de saturation. Comme se présente dans la figure I.13.

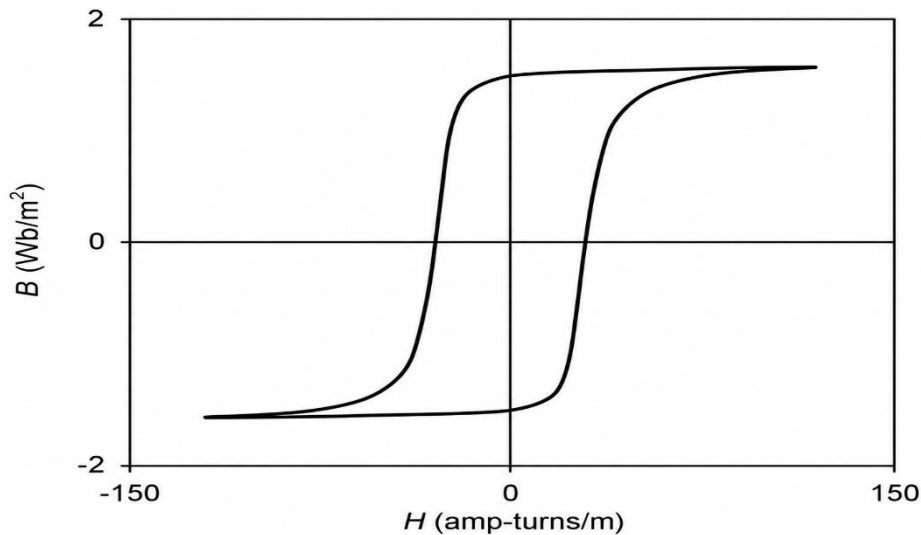


Figure I.13: Exemple de cycle d'hystérésis [17].

I.4.3 Non-linéarité du noyau magnétique

Le comportement du transformateur ne peut pas toujours être représenté par un modèle parfaitement linéaire, car son noyau magnétique est constitué d'un matériau ferromagnétique dont la perméabilité varie avec le niveau d'excitation. Lorsque le transformateur fonctionne dans sa zone normale, le flux magnétique reste généralement proportionnel au courant d'aimantation, et l'inductance magnétisante peut être considérée comme presque constante. Dans ce cas, le modèle linéaire donne une représentation acceptable du fonctionnement du transformateur [12].

Lorsque la tension appliquée augmente, ou lorsque certaines conditions de réseau provoquent une élévation anormale du flux, le noyau peut entrer progressivement en saturation. Dans cette zone, une faible augmentation du flux nécessite une forte augmentation du courant d'aimantation. La relation entre le flux magnétique et le courant n'est donc plus linéaire. Elle suit la courbe de saturation $\phi = f(i)$, qui présente une zone quasi-linéaire pour les faibles niveaux d'excitation, puis une déviation progressive vers la saturation pour les niveaux plus élevés [13].

L'inductance magnétisante L_m du transformateur n'est donc pas une constante, elle varie en permanence selon le point de fonctionnement sur cette courbe. Comme nous avons dans la figure I.14.

L'inductance magnétisante devient :

$$L_m = \frac{d\phi}{di} = f(\phi) \quad (\text{I.4})$$

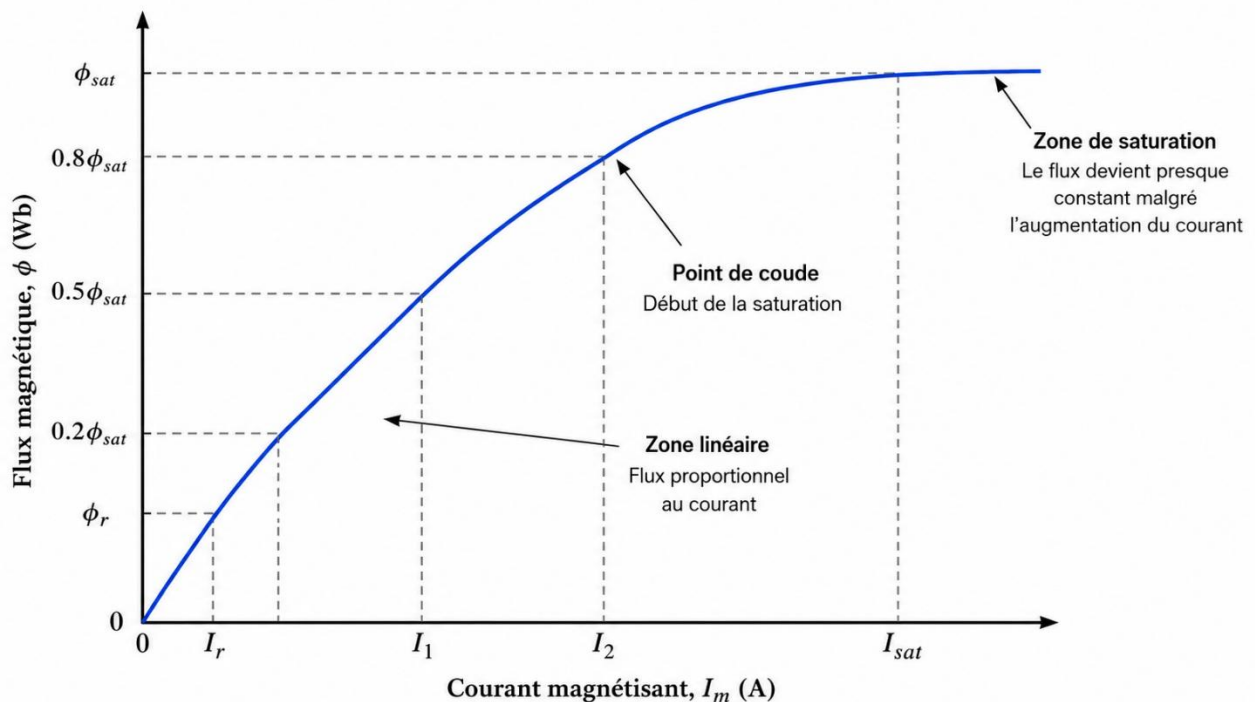


Figure I.14 : Comportement non-linéaire du noyau magnétique [17].

I.4.4 La saturation magnétique

La saturation magnétique est le phénomène par lequel un matériau ferromagnétique atteint son niveau maximal d'aimantation, au-delà duquel une augmentation du champ exciteur ne produit plus qu'une augmentation négligeable de l'induction [12]. Ce phénomène est inévitable dans tout matériau ferromagnétique et constitue une limite physique fondamentale de son comportement magnétique.

Dans un transformateur, la saturation se produit lorsque la tension d'alimentation dépasse la valeur nominale, ou lors de transitoires comme la mise sous tension, les défauts monophasés ou les manœuvres de commutation. Lorsque le noyau sature, plusieurs conséquences importantes apparaissent [16].

Le courant d'excitation devient fortement non sinusoïdal et peut atteindre des valeurs très élevées, parfois plusieurs dizaines de fois le courant nominal. Cette déformation génère des harmoniques importantes qui se propagent dans le réseau.

La perméabilité magnétique du matériau chute brutalement, entraînant une diminution importante de l'inductance du transformateur.

I.5 Les transitoires du transformateurs (Régimes transitoire)

Dans le domaine de l'électrotechnique, les transitoires d'un transformateur (ou régimes transitoires) désignent les phénomènes électromagnétiques temporaires et de courte durée qui se produisent lorsque le transformateur subit une modification brutale de son état de fonctionnement [19]. Voici les principaux transitoires qui affectent un transformateur :

I.5.1 Le courant d'enclenchement (courant d'appel)

Dans le domaine de l'électrotechnique, les transitoires d'un transformateur ou régimes transitoires désignent les phénomènes électromagnétiques temporaires et de courte durée. Ce phénomène se produit lorsqu'un transformateur est mis sous tension à vide. À cause de l'hystérésis du noyau magnétique, le flux magnétique peut atteindre jusqu'à deux fois sa valeur nominale. Le noyau sature, ce qui pousse le transformateur à tirer un courant d'appel pouvant dépasser de 5 à 10 fois le courant nominal [18] [19]. La Figure I.15 montre le courant d'appel d'un transformateur.

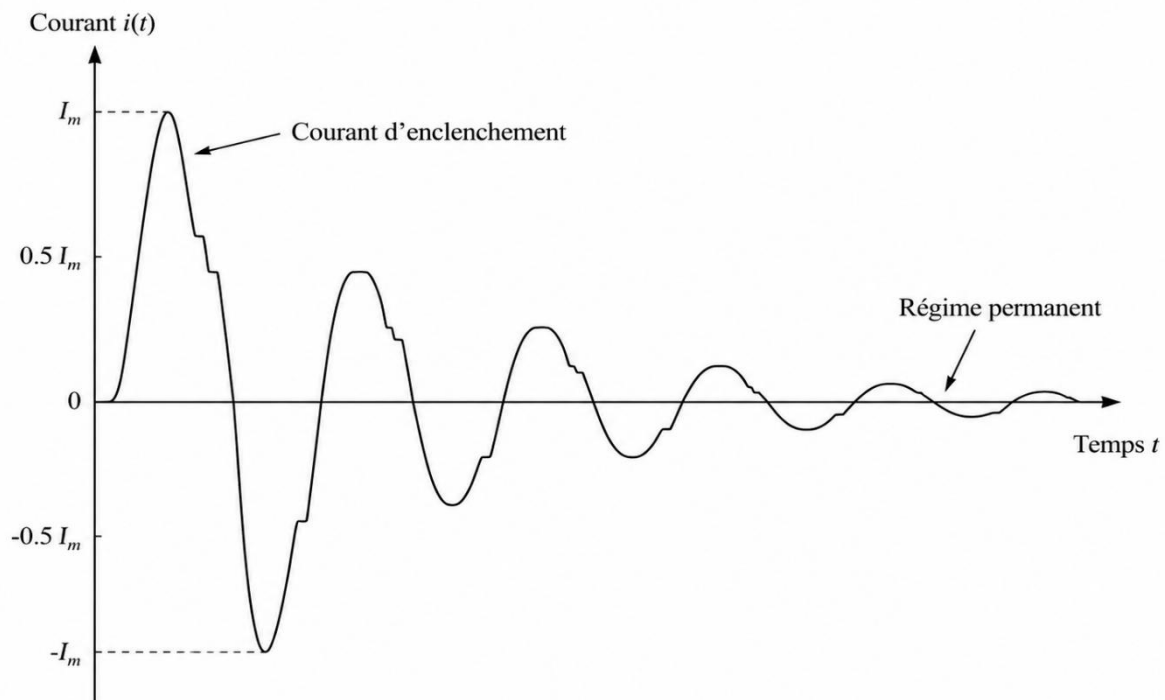


Figure I.15 : Courant d'appel d'un transformateur [19].

I.5.2 Surtensions de commutation (les transitoires de manœuvre)

Elles apparaissent lors de l'ouverture ou de la fermeture des disjoncteurs.

- **Ferrorésonance :** Une interaction entre la capacité du réseau et l'inductance non linéaire du transformateur, causant des surtensions soutenues et de la distorsion harmonique.
- **Coupage de courant virtuel :** Fréquent avec des disjoncteurs à vide, où le courant est interrompu avant son passage naturel à zéro. L'énergie magnétique est alors convertie en de très hautes tensions [19].

I.6 Modélisation électrique du transformateur

I.6.1 Schéma équivalent du transformateur monophasé linéaire sans saturation

Le transformateur peut être représenté par un schéma équivalent. Ce schéma regroupe l'ensemble des impédances du transformateur, résistances et inductances, ainsi que son rapport de transformation et les différentes pertes qui lui sont associées. Il offre ainsi un outil pratique et efficace pour analyser le comportement du transformateur au sein d'un circuit électrique plus complexe, tout en conservant ses principales caractéristiques et en facilitant considérablement les calculs [20].

Le schéma équivalent complet du transformateur monophasé linéaire est représenté par la Figure I.16 ci-dessous. Il est constitué des éléments suivants :

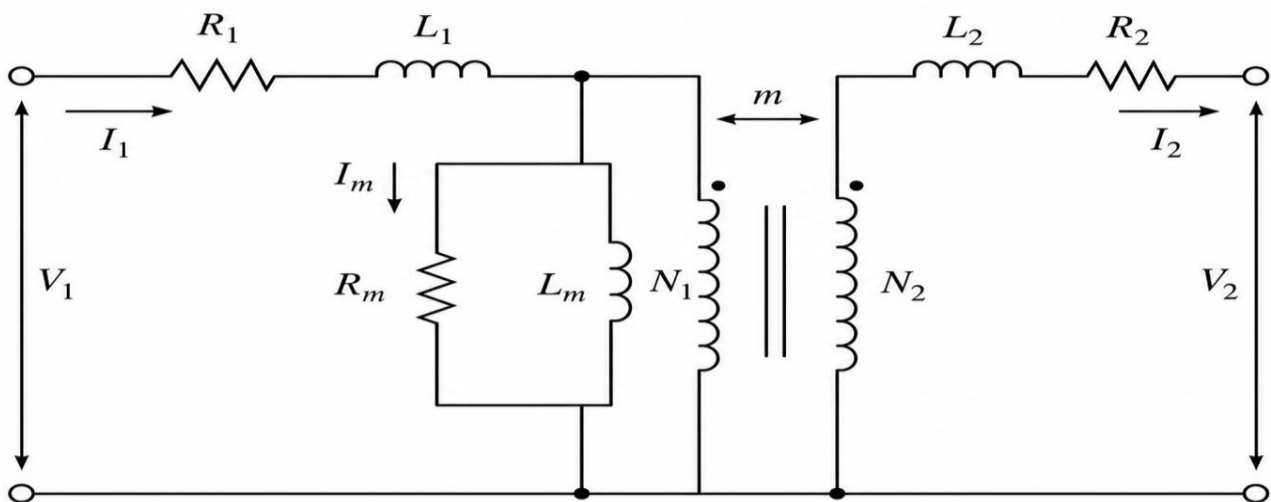


Figure I.16 : Schéma équivalent d'un transformateur monophasé linéaire sans saturation.

Les équations qui présentent ce modèle sont les suivantes [11] [12] :

Rapport de transformation :

$$m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Pertes fer représentées par R_m :

$$p_{fer} = \frac{V_m^2}{R_m} \quad (I.5)$$

Réactances de fuite :

$$X_1 = \omega L_1 \quad (I.6)$$

$$X_2 = \omega L_2 \quad (I.7)$$

Avec :

$$\omega = 2\pi f \quad (I.8)$$

Pertes cuivre dans les enroulements :

$$P_{cuivre1} = R_1 I_1^2 \quad (I.9)$$

$$P_{cuivre2} = R_2 I_2^2 \quad (I.10)$$

Équation de tension dans les enroulements :

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1 \quad (I.11)$$

$$V_2 = E_2 + R_2 I_2 + jX_2 I_2 \quad (I.12)$$

I.6.2 Schéma équivalent du transformateur monophasé avec saturation

Lorsque le transformateur est soumis à une surtension, à une mise sous tension, à un défaut ou à une interaction avec les capacités du réseau, le noyau ferromagnétique peut quitter sa zone linéaire et entrer progressivement en saturation. Dans ce cas, l'inductance magnétisante ne peut plus être considérée comme constante, car elle dépend de l'état magnétique du noyau et de la courbe d'aimantation du matériau [11] [17].

La différence principale entre le modèle linéaire et le modèle saturable se situe donc au niveau de la branche magnétisante. Dans le modèle linéaire, l'inductance L_m est fixe. Dans le modèle avec saturation, elle devient une inductance non linéaire, souvent notée $L_m(im)$ ou représentée

par une relation non linéaire entre le flux ϕ et le courant magnétisant (i_m) [2] [13]. Cette relation est généralement déduite de la courbe $B - H$ du matériau magnétique ou d'une caractéristique flux-courant obtenue expérimentalement [13]. Le schéma équivalent complet du transformateur monophasé avec saturation est représenté par la Figure I.17 ci-dessous

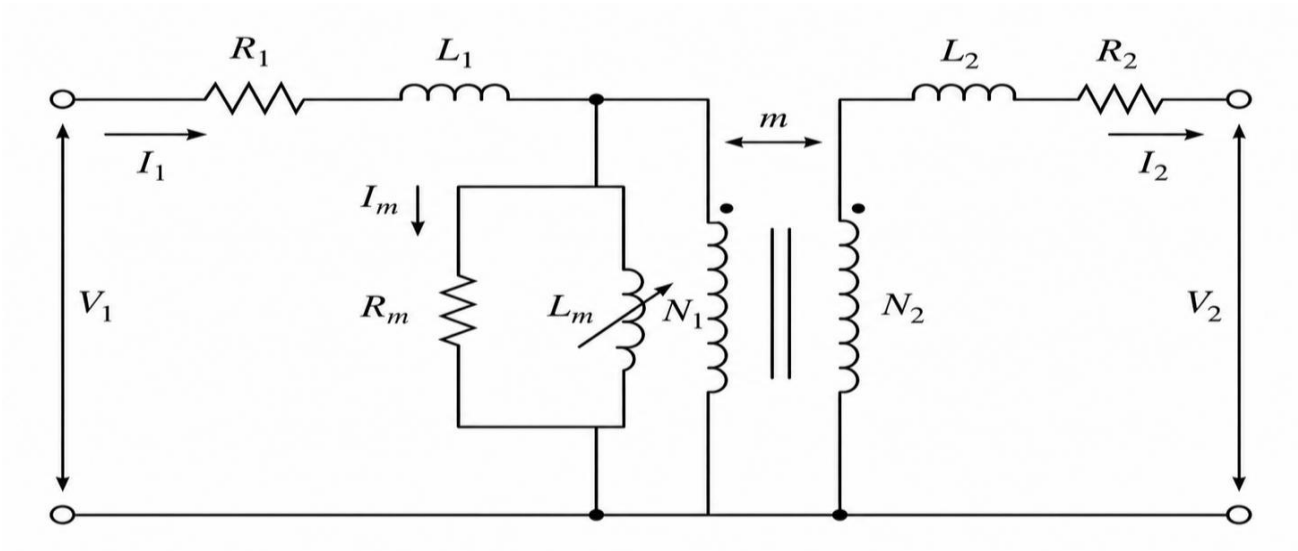


Figure I.17 : Schéma équivalent du transformateur monophasé avec saturation.

Lorsque le secondaire est à vide on obtient les équations suivantes :

Tension de primaire :

$$V_p = V_m(\sin \omega t + \theta_0) \quad (\text{I.13})$$

Où V_m est la tension de source nominale en valeur crête, ω est la pulsation angulaire et θ_0 est la phase initiale, la loi de Kirchhoff appliquée au circuit primaire donne [12] :

$$V_p = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (\text{I.14})$$

En développant le terme de flux en faisant intervenir la caractéristique non linéaire $\phi(i)$ du noyau ferromagnétique, on obtient [12] :

$$V_p = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\varphi(t)}{di} \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{I.15})$$

Lorsque la résistance de magnétisation R_m est très élevée, le courant dans le noyau peut être approximé par le courant primaire $i(t)$. La dérivée temporelle du flux peut alors être représentée par une inductance équivalente du noyau $L_{\text{noyau}(\varphi)}$, définie comme la pente locale de la caractéristique $\varphi(i)$ [12] :

$$L_{\text{noyau}(\varphi)} = \frac{d\varphi(t)}{di} \quad (\text{I.16})$$

Donc :

$$V_p = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + L_{\text{noyau}(\varphi)} \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{I.17})$$

I.7 Les surtensions

I.7.1 Définition

Une surtension correspond à toute tension mesurée entre un conducteur de phase et la terre, ou entre conducteurs de phase, dont la valeur de crête excède celle associée à la tension maximale admissible pour le matériel, telle que spécifiée par la norme CEI 71-1. Elles peuvent survenir entre différentes phases ou circuits, ce qui les qualifie de mode différentiel ($U_m\sqrt{2}$), ou bien entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre, désignées alors comme des perturbations de mode commun ($U_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$) [21]. La Figure I.18 illustre un exemple de surtension.

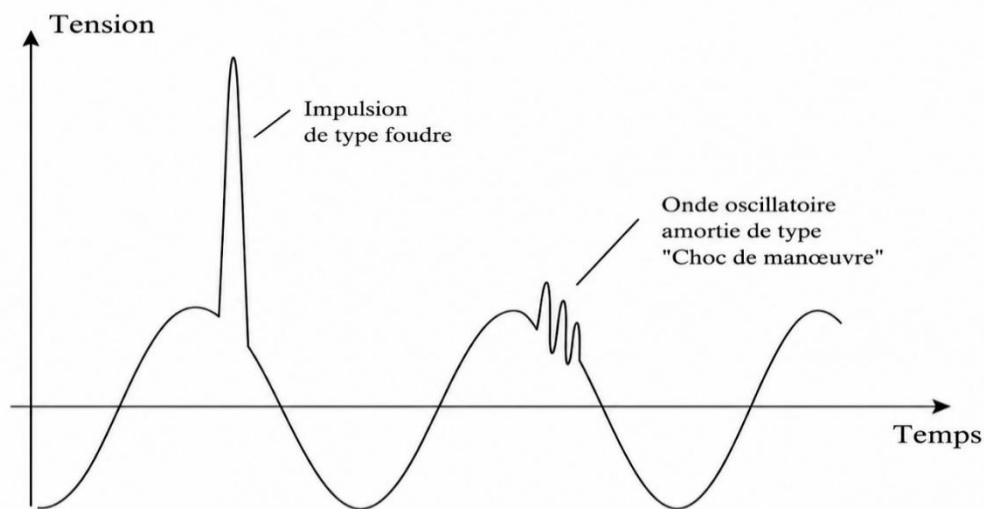


Figure I.18 : Exemple de surtension [21].

I.7.2 Origine des surtensions

I.7.2.1 Origine interne

Les surtensions d'origine interne sont liées au fonctionnement propre du réseau électrique et aux phénomènes qui apparaissent à l'intérieur de celui-ci. Elles dépendent principalement de la structure du réseau, de ses paramètres électriques, de l'état des équipements et des conditions de manœuvre ou de défaut. Elles peuvent apparaître, par exemple, lors de la coupure du courant magnétisant d'un transformateur, situation qui peut entraîner une élévation importante de la tension aux bornes de certains éléments du réseau [21].

Parmi les principales surtensions d'origine interne, on peut citer :

- Les surtensions provoquées par un défaut à la terre ;
- Les surtensions liées aux manœuvres de commutation ;
- Les surtensions dues aux phénomènes de résonance ou de ferrorésonance.

I.7.2.2 Origine externe

Les surtensions d'origine externe proviennent de phénomènes situés en dehors du réseau étudié, mais capables de s'y propager et d'affecter ses équipements. Elles sont généralement indépendantes du fonctionnement normal du réseau et peuvent atteindre des amplitudes très élevées. L'exemple le plus connu est la surtension atmosphérique provoquée par la foudre. Une surtension peut également être transmise d'un réseau haute tension vers un réseau interne industriel à travers un transformateur [21].

Les surtensions d'origine externe comprennent principalement :

- Les surtensions atmosphériques dues aux coups de foudre ;
- Les surtensions transférées depuis un réseau haute tension vers une installation interne.

I.7.3 Classification des surtensions

Selon la norme CEI 71-1, les surtensions peuvent être classées en fonction de leur durée, de leur forme d'onde et de leur vitesse d'évolution. D'après leur durée, on distingue principalement les surtensions temporaires et les surtensions transitoires [21].

Une surtension temporaire correspond à une élévation de la tension à la fréquence industrielle, qui peut se maintenir pendant plusieurs périodes, voire pendant quelques secondes. Elle est généralement associée à des défauts, à des déséquilibres du réseau ou à certains phénomènes internes.

Une surtension transitoire, quant à elle, correspond à une augmentation brève de la tension, dont la durée est généralement très courte et ne dépasse pas quelques millisecondes. Elle peut être oscillante ou non oscillante, et elle est souvent caractérisée par un amortissement rapide.

Les surtensions transitoires peuvent être subdivisées en plusieurs catégories :

- Les surtensions à front lent.
- Les surtensions à front rapide.
- Les surtensions à front très rapide.

I.7.4 Conséquences des surtensions

Les surtensions représentent un danger important pour les réseaux électriques, car elles peuvent provoquer des contraintes électriques, thermiques et mécaniques sur les équipements. Leurs effets dépendent principalement de leur amplitude, de leur durée, de leur fréquence d'apparition et de la tenue diélectrique des matériels exposés. Lorsqu'elles dépassent les limites admissibles, elles peuvent réduire la durée de vie des équipements, perturber l'exploitation du réseau et compromettre la sécurité des personnes.

Les principales conséquences des surtensions sont les suivantes :

- La rupture de l'isolation lorsque la tension appliquée dépasse la tenue diélectrique prévue pour l'équipement.
- Le vieillissement accéléré des isolants sous l'effet de surtensions répétées, même lorsque celles-ci ne provoquent pas une destruction immédiate.
- L'endommagement de certains éléments du réseau, pouvant entraîner des interruptions prolongées de l'alimentation électrique.
- La perturbation des circuits de contrôle, de commande, de protection et de communication, soit par conduction, soit par rayonnement électromagnétique.
- L'apparition de contraintes électrodynamiques et thermiques importantes, pouvant conduire à la déformation des conducteurs, à la fusion de certains éléments, à un

incendie ou à une explosion, notamment dans le cas des surtensions provoquées par la foudre [21].

I.8 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons traité les bases nécessaires pour l'étude du phénomène de ferrorésonance. Nous avons d'abord présenté les réseaux électriques et leurs organisation générale et leurs niveaux de tension et leurs architectures principales et leurs composants essentiels. Ensuite l'étude générale du transformateur et sa constitution et leur comportement magnétique ainsi que sa modélisation. Enfin nous avons traité les surtensions en général leurs classifications et leurs conséquences.

Chapitre II.

Théorie de ferrorésonance.

II.1 Introduction

Le phénomène de ferrorésonance présente un intérêt important en génie électrique, car il peut provoquer des surtensions de longue durée, des surintensités, une déformation importante des formes d'ondes, un échauffement anormal du transformateur, des déclenchements intempestifs des protections et, dans certains cas, la destruction d'équipements électriques [2]. Il peut être déclenché par une manœuvre qui semble normale, comme l'ouverture monophasée d'un disjoncteur, la fusion d'un fusible, l'enclenchement d'un transformateur à vide ou la disparition d'un défaut à la terre.

La difficulté principale de l'analyse vient du caractère fortement non linéaire du circuit magnétique. Contrairement à la résonance linéaire, pour laquelle une excitation donnée conduit généralement à une solution permanente unique, un circuit ferrorésonant peut posséder plusieurs régimes stables pour les mêmes paramètres. Le régime final dépend alors des conditions initiales : charge initiale des capacités, flux rémanent dans le noyau, instant de commutation, valeur de la capacité équivalente et niveau des pertes.

Dans ce chapitre on traite la ferrorésonance et sa complexité, il est indispensable de rappeler les principes fondamentaux de la résonance dans les circuits linéaires, afin de bien mesurer la différence entre la résonance classique et la ferrorésonance, ce chapitre couvre ainsi les approches d'étude disponibles et les situations du réseau les plus propices à son apparition.

II.2 Résonance électrique dans les circuits linéaires

II.2.1 Définition

L'association d'éléments inductifs L , capacitifs C et résistifs R , connectés soit en série, soit en parallèle, entraîne des répartitions de courants et de tensions qui peuvent représenter un risque pour les équipements [21].

II.2.2 Résonance série

La résonance série se produit dans un circuit composé d'une résistance R , une inductance L et d'une capacité C connectées en série, alimenté par une source de tension alternative. Comme on remarques dans la figure II.1.

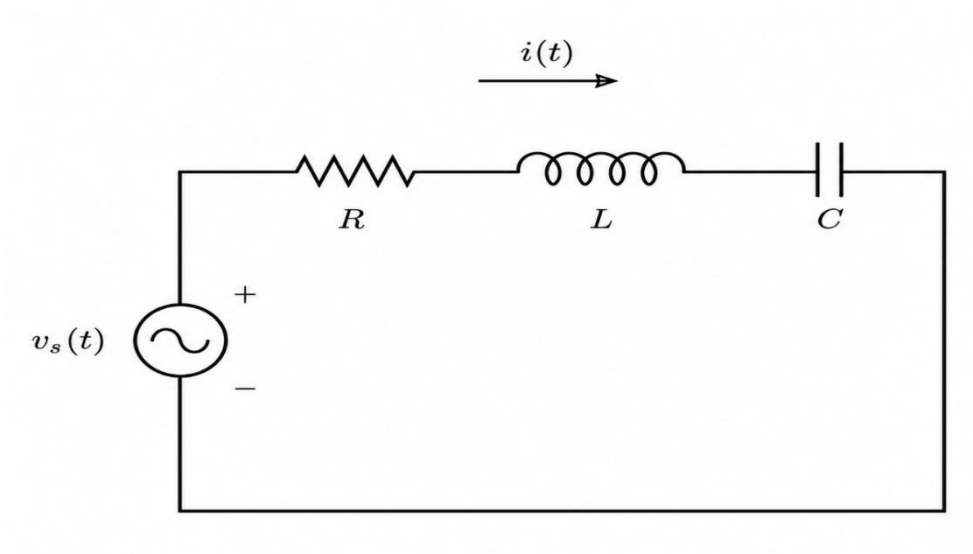


Figure II.1 : Schéma électrique d'un circuit RLC série alimentée par une source sinusoïdale.

La tension V_s est la somme vectorielle des tensions aux bornes de chaque élément [21]

La figure II.2 représente la représentation de Fresnel d'un circuit RLC série alimenté par une tension V_s :

$$V_s = V_R + V_L + V_c \quad (\text{II.1})$$

$$V_s = RI + jL\omega I + \frac{1}{jC\omega} I \quad (\text{II.2})$$

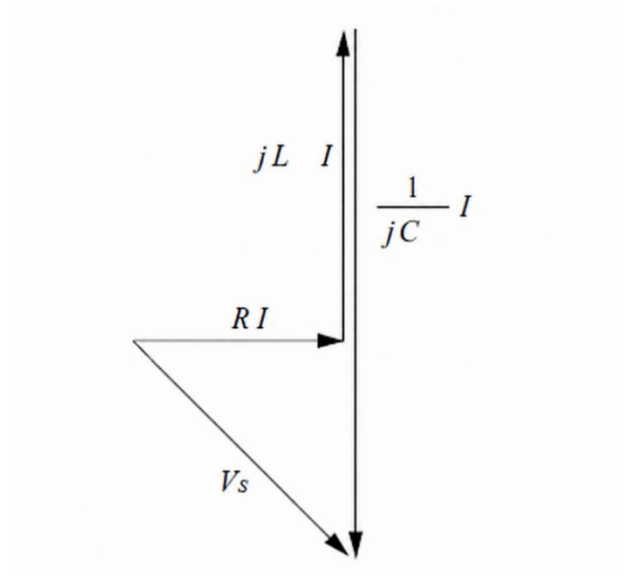


Figure II.2 : Représentation de Fresnel d'un circuit R, L, C série alimentée par une tension V_s .

La résonance apparaît lorsque la réactance inductive X_L et la réactance capacitive X_C sont égales :

En appliquant la condition de résonance ($X_L = X_C$), on obtient les relations suivantes :

$$X_L = X_C \quad (\text{II.3})$$

$$jL\omega I = \frac{1}{jC\omega} \quad (\text{II.4})$$

L'inductance et la capacité en série se comportent comme un court-circuit :

Dans ces conditions, la tension aux bornes de la résistance est donnée par la relation suivante :

$$V_S = RI \quad (\text{II.5})$$

Pour des valeurs données de l'inductance L et de la capacité C , la pulsation de résonance ω_r est définie par l'équation suivante :

$$LC\omega_r^2 = 1 \quad (\text{II.6})$$

En résolvant l'équation précédente, on obtient l'expression de la pulsation de résonance suivante

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{II.7})$$

La fréquence propre de résonance correspondante est donnée par la relation suivante :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{II.8})$$

Sous cette condition, les tensions qui se présentent à travers de l'inducteur, L et du condensateur, C peuvent atteindre plusieurs fois la tension source. La figure II.3 illustre les caractéristiques de la tension du condensateur, de la tension de l'inducteur et du courant d'alimentation lorsque la fréquence principale est variée de 20 Hz à 600 Hz. Lorsqu'on est à la résonance, le graphique indique que la tension à travers l'inducteur et le condensateur atteint des valeurs maximales lorsque la fréquence naturelle du système est réglée autour de 400 Hz. Cette condition indique également que V_L et V_C dépassent la tension d'alimentation principale. De plus, le courant dans le circuit atteint son maximum, car l'impédance du circuit est minimale et essentiellement résistive [22]. La Figure II.3 montre l'évolution des tensions et du courant en fonction de la fréquence dans un circuit résonant série.

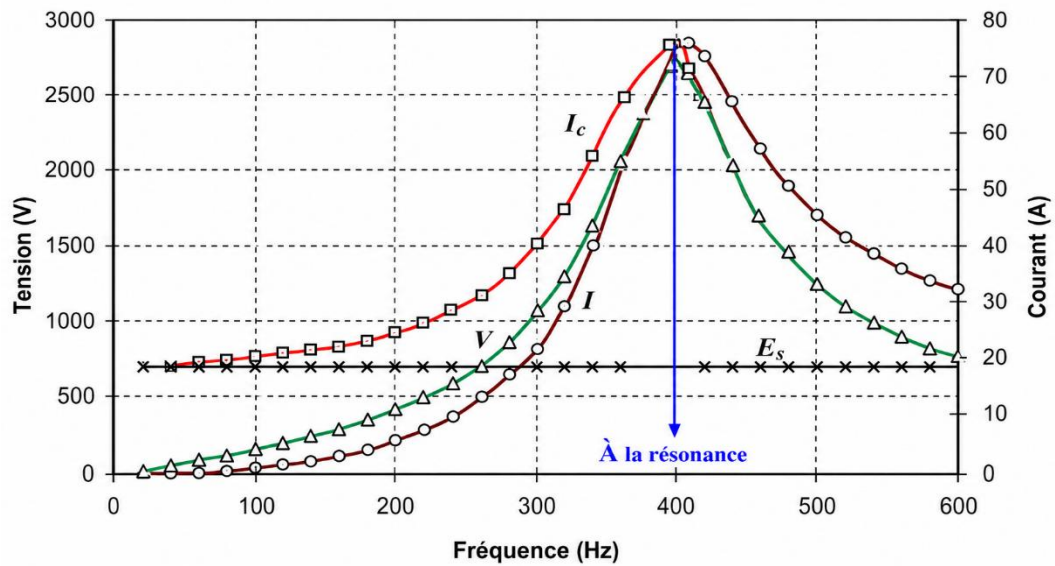


Figure II.3 : Caractéristiques de V_c, V_L, I et V_s [22].

On introduit donc un facteur de surtension f , qui correspond de la tension V_L ou V_c par la tension d'alimentation V_s [21] :

$$f = \frac{V_L}{V_s} = \frac{L\omega_r I}{RI} \quad (\text{II.9})$$

$$f = \frac{L\omega_r}{R} = \frac{1}{RC\omega_r} \quad (\text{II.10})$$

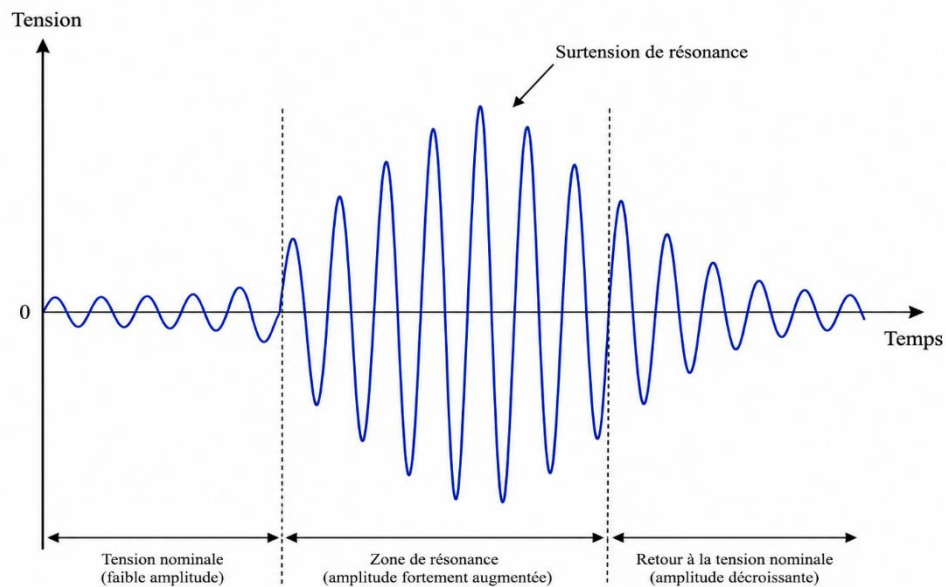


Figure II.4 : Exemple de surtension résonance [21].

II.2.3 Résonance parallèle

La résonance parallèle se produit dans un circuit composé d'une résistance R , d'une inductance L et d'une capacité C connectées en parallèle, alimenté par une source de courant J , [21]. Comme on remarque dans la figure II.5 ci-dessous.

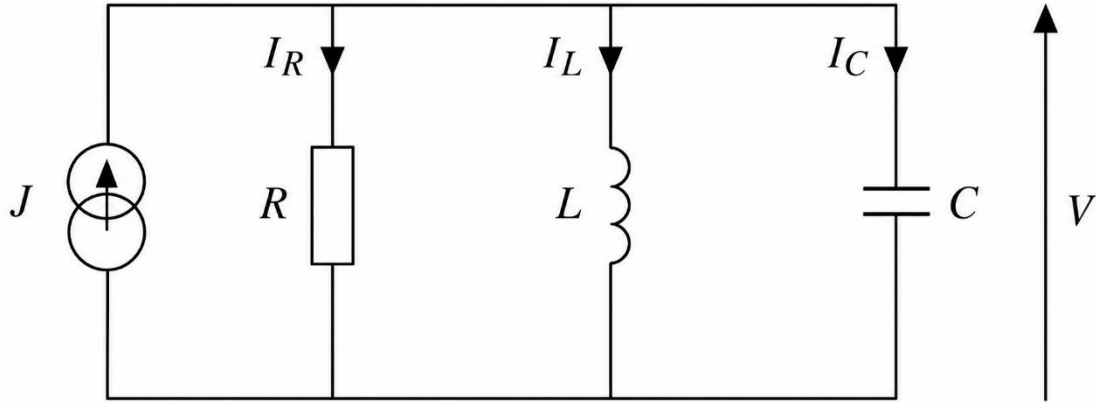


Figure II.5 : Circuit R, L, C parallèle alimenté par une source de courant.

La tension V est commune aux trois éléments :

L'expression du courant total dans le circuit parallèle s'écrit comme suit :

$$J = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega} + jC\omega \right) V \quad (\text{II.11})$$

Le phénomène de résonance se produit quand $I_L = -I_C$:

À la condition de résonance ($I_L = -I_C$), les relations suivantes sont obtenues :

$$\frac{V}{jL\omega} = -jC\omega V \quad (\text{II.12})$$

$$LC\omega^2 = 1 \quad (\text{II.13})$$

Pour L et C données, la pulsation ω_r telle que $LC\omega_r^2 = 1$ est appelée pulsation de résonance.

On établit donc le facteur de surtension, qui correspond au rapport : entre la tension observée aux bornes du circuit R, L, C parallèle lors de la résonance, et la tension qui serait observée à la résonance si l'inductance (ou la capacité) était le seul composant du circuit.

Le facteur de surtension est défini par la relation suivante :

$$f = \frac{RJ}{L\omega_r J} = \frac{R}{L\omega_r} = RC\omega_r \quad (\text{II.14})$$

II.3 Ferrorésonance

II.3.1 Définition

Le phénomène de ferrorésonance, qui est une résonance non linéaire, peut affecter les réseaux électriques. Des niveaux anormaux d'harmoniques ainsi que les surtensions et surintensités transitoires ou permanentes qu'ils engendrent peuvent fréquemment nuire aux dispositifs électriques. On peut attribuer certaines défaillances inexplicables à ce phénomène rare et non linéaire [3] [23].

II.3.2 Ferrorésonance série

On considère un circuit en série qui comprend une résistance, une bobine avec noyau de fer saturable et un condensateur dans la figure II.6 [21] [24] :

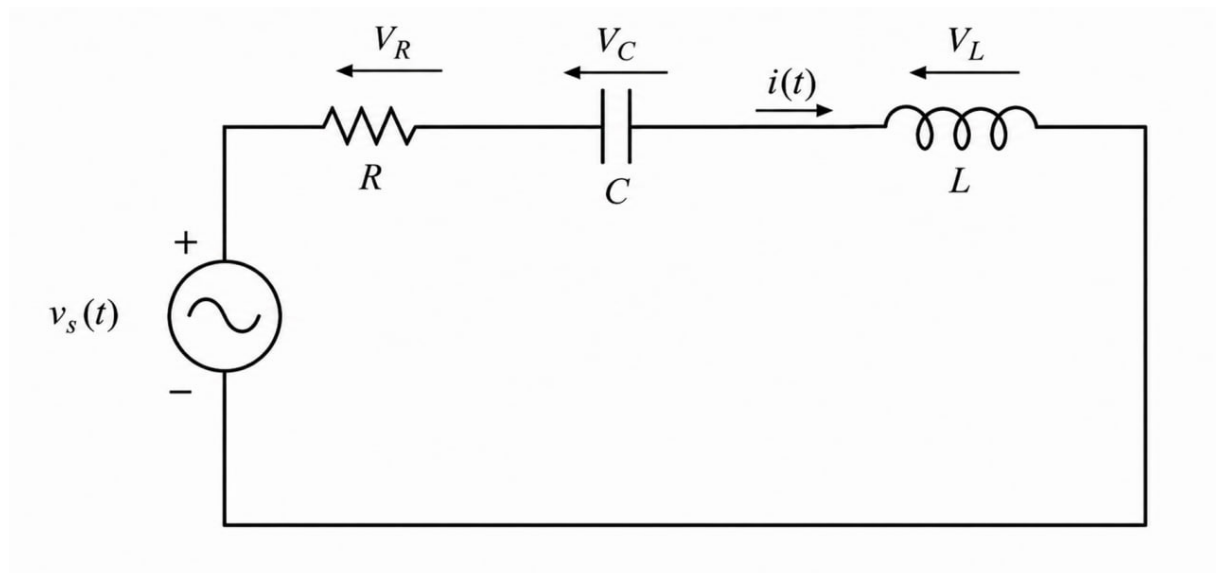


Figure II.6 : Circuit ferrorésonant série.

En appliquant la loi des mailles au circuit série, on obtient l'équation suivante :

$$V_S = Ri + J(V_L - \frac{i}{C}\omega) \quad (\text{II.15})$$

Une manière simple d'interpréter la ferrorésonance série consiste à utiliser une approche graphique. Dans un circuit série composé d'une résistance R , d'une capacité C et d'une inductance saturable, la tension d'alimentation se répartit entre les différentes composantes du circuit.

La tension disponible après la chute de tension résistive est exprimée par la relation suivante :

$$v_d = \sqrt{V_s^2 - R^2 i^2} \quad (\text{II.16})$$

La caractéristique tension-courant de l'inductance saturable est décrite par l'équation suivante :

$$V_l(i) = L(i)\omega V_s \quad (\text{II.17})$$

En saturation, $L(i)$ devient extrêmement faible, La tension résultant de l'association de la capacité et de l'inductance saturable est donnée par l'équation II.18, Le point de fonctionnement du réseau se trouve à la croisée de la courbe (b) dont l'équation II.18 [18] :

$$v = V_L(i) - \frac{i}{c} \omega \quad (\text{II.18})$$

La Figure II.7 présente la résolution graphique du phénomène de ferrorésonance série.

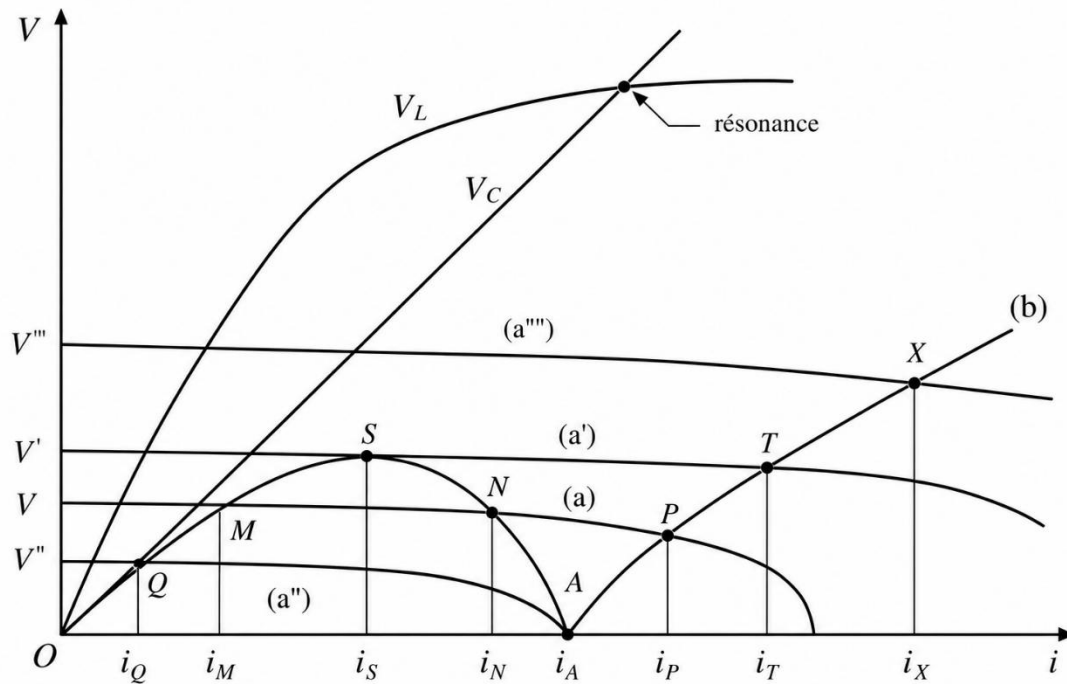


Figure II.7 : Ferrorésonance série - résolution graphique [18].

II.3.3 Ferrorésonance parallèle

On considère un circuit composé d'un condensateur, d'une bobine inductive dotée d'un noyau de fer saturable et d'une résistance disposée en parallèle. On note R la résistance, C la capacité et L l'inductance intrinsèque qui varie en fonction du courant qui passe à travers la bobine et de la tension appliquée au circuit dans la figure II.8 ci-dessous [21], [24] :

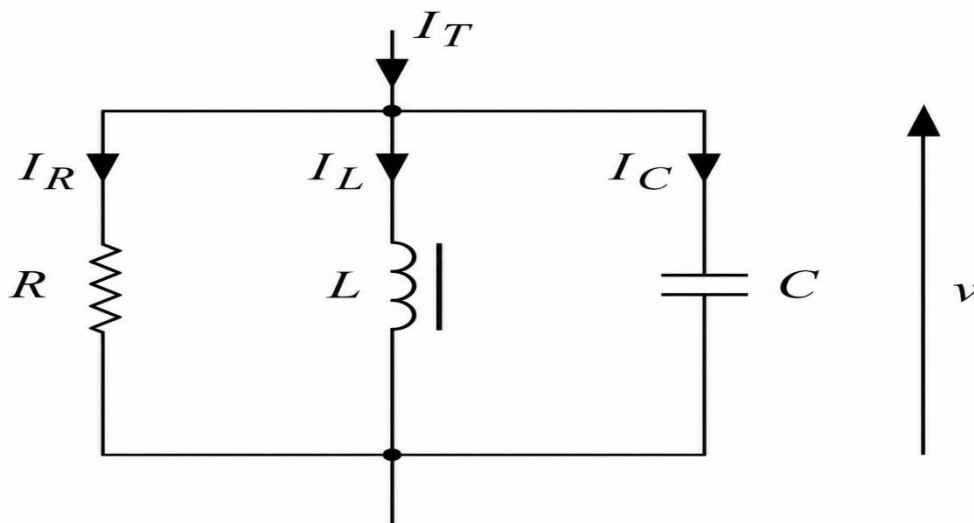


Figure II.8 : Circuit ferrorésonant parallèle.

Le courant total I_T qui circule dans le circuit est donné par l'équation :

$$I_T = \frac{V}{R} + J(C\omega V - I_L) \quad (\text{II.19})$$

On ne peut pas écrire I_L en fonction de V , en raison de la non-linéarité de L .

Les valeurs efficaces du courant total sont exprimées par la relation suivante :

$$I_T^2 = \frac{V^2}{R^2} + J(C\omega V - I_L)^2 \quad (\text{II.20})$$

En combinant les équations précédentes, on obtient l'expression suivante :

$$\sqrt{I_T^2 - \frac{V^2}{R^2}} = |C\omega V - I_L| \quad (\text{II.21})$$

II.4 Différence entre résonance et ferrorésonance

Les principales différences entre la résonance linéaire et la ferrorésonance [27] :

- Son potentiel de résonance à travers une vaste gamme de valeurs de C ,
- La fréquence des ondes de tension et de courant qui peut ne pas correspondre à celle de la source de tension sinusoïdale,
- La présence de multiples états stationnaires stables pour une configuration et des valeurs spécifiques en fonction de la valeur de k , l'amplitude de la tension V_L (qui équivaut à V_C) peut se révéler inférieure ou supérieure à l'amplitude E de la tension d'excitation V_S [3].

Tableau II.1 : Comparaison entre résonance linéaire et ferrorésonance [3].

Critère	Résonance linéaire	Ferrerésonance
Nature du circuit	Circuit linéaire	Circuit non linéaire
Inductance	Constante	Variable avec la saturation magnétique
Condition principale	Égalité $XL = XC$	Interaction capacité–inductance saturable
Fréquence	Déterminée par L et C	Fondamentale, sous-harmonique ou irrégulière
Régime permanent	Généralement unique	Plusieurs régimes possibles
Conditions initiales	Influence faible	Influence très importante
Effets	Surtension ou surintensité	Surtensions, harmoniques, échauffement, chaos
Méthode d'analyse	Calcul direct possible	Analyse graphique ou numérique souvent nécessaire

II.5 Conditions d'apparition de la ferrorésonance

Les études consacrées à la ferrorésonance montrent que plusieurs conditions doivent être présentes pour rendre le phénomène possible. Ces conditions ne déclenchent pas toujours la ferrorésonance, mais elles créent un contexte favorable [3].

Les principales conditions sont [23] :

- La présence d'une source de tension, généralement sinusoïdale, capable d'entretenir les oscillations.
- La présence d'une inductance non linéaire saturable, comme un transformateur de puissance, un transformateur de tension ou une réactance à noyau de fer.
- La présence d'une capacité, provenant d'un câble souterrain, d'une ligne aérienne, d'un condensateur, d'une capacité parasite ou d'une capacité de disjoncteur ouvert.
- De faibles pertes dans le circuit, car les pertes élevées amortissent les oscillations.
- Des conditions initiales favorables, telles qu'un flux rémanent élevé, une charge initiale des capacités ou un instant de commutation défavorable [26].

II.6 Classification des régimes ferrorésonants

Les régimes ferrorésonants sont généralement classés à partir des formes d'ondes en régime permanent. Les principaux régimes sont le régime fondamental, le régime sous-harmonique, le régime quasi-périodique et le régime chaotique. Cette classification peut être réalisée à l'aide du signal temporel, du spectre fréquentiel, du plan de phase ou d'une section de Poincaré.

Les régimes ferrorésonants sont classées comme suite Les Figure II.9, II.10, II.11, II.12 illustre les différents régimes de fonctionnement de la ferrorésonance :

II.6.1 Régime fondamental

Les courants et les tensions présentent des variations périodiques avec une période T qui correspond à la période du système, et peuvent comporter un pourcentage variable d'harmoniques. Le spectre du signal est un spectre disjoint qui comprend la fréquence fondamentale f_0 du système électrique ainsi que ses harmoniques ($2f_0$, $3f_0$, etc.). se réduit à un point distant du point indiquant l'état standard [3].

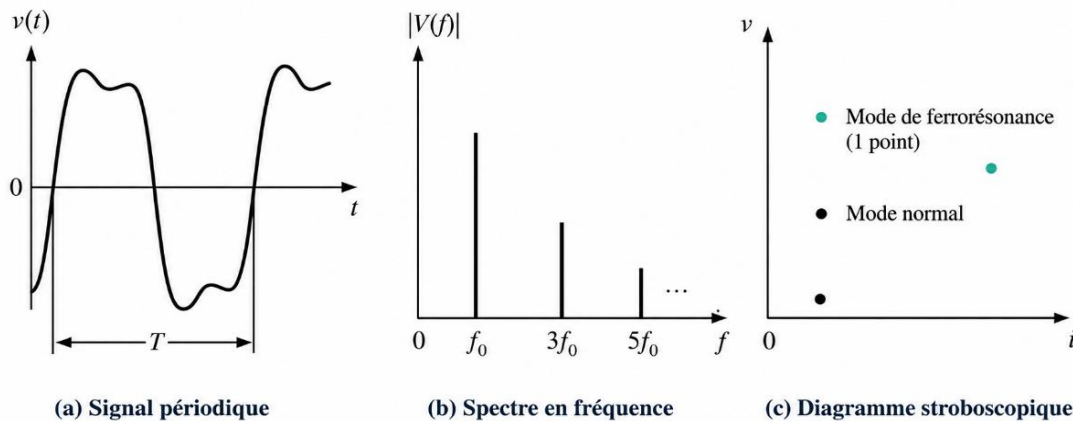


Figure II.9 : Régime fondamental [3].

II.6.2 Régime sous-harmonique

Les signaux sont de nature périodique, avec une période qui est un multiple de nT . On fait référence à cet état en tant que sous-harmonique n ou harmonique $\frac{1}{n}$. Les états ferrorésonants sous-harmoniques sont généralement de nature impaire. Le spectre affiche un élément fondamental équivalent à $\frac{f_0}{n}$ (où f_0 représente la fréquence de la source et n est un entier), ainsi

que ses harmoniques (la fréquence f_0 est donc incluse dans le spectre. Une ligne dessinée de manière stroboscopique dévoile n points [3].

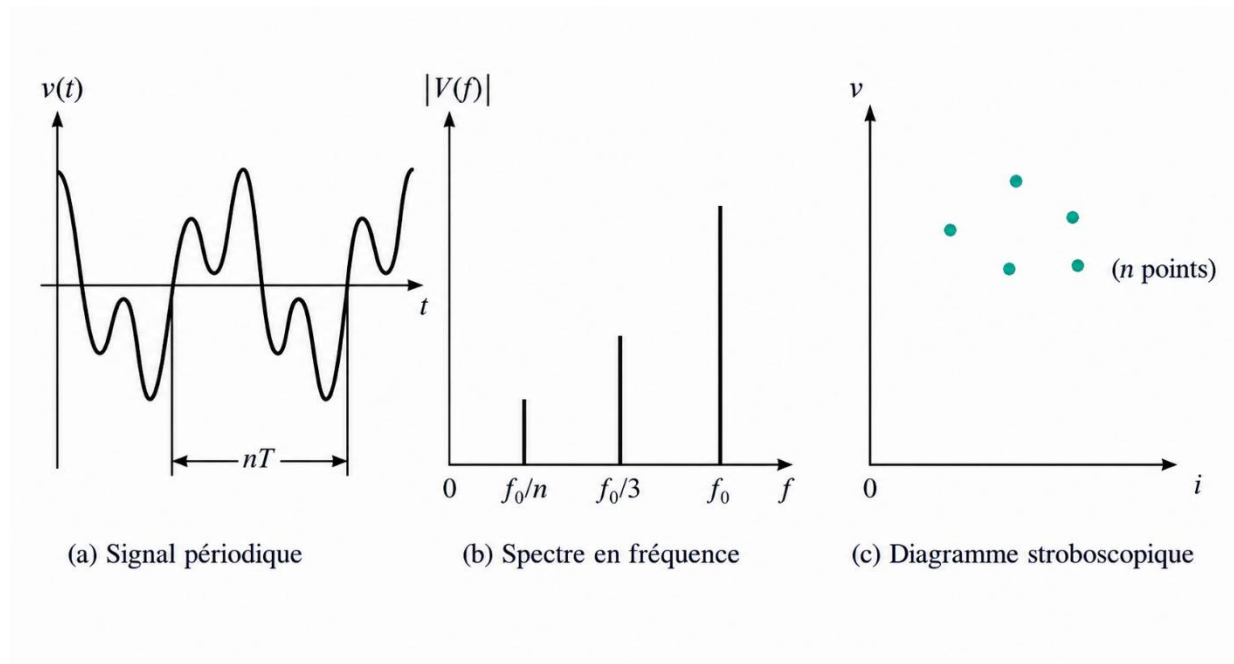


Figure II.10 : Régime sous-harmonique [3].

II.6.3 Régime quasi-périodique

Ce mode, aussi connu sous le terme de pseudopériodique, ne suit pas une périodicité. Le spectre est discontinu et ses fréquences sont représentées sous la forme : $nf_1 + mf_2$, où n et m représentent des entiers et $\frac{f_1}{f_2}$ un nombre réel qui n'est pas rationnel. L'image stroboscopique présente une courbe fermée [3].

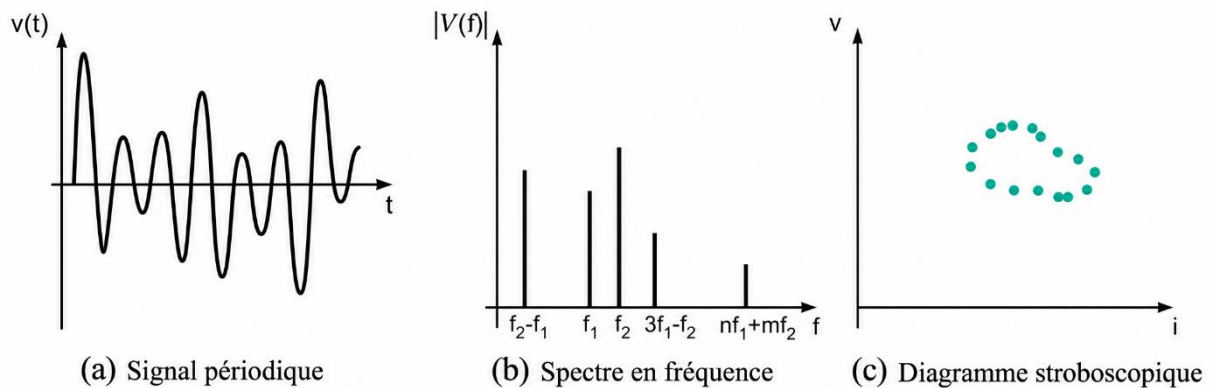


Figure II.11 : Régime quasi-périodique [3].

II.6.4 Régime chaotique

Le spectre associé est continu, ce qui signifie qu'il n'est pas annulé à aucune fréquence. L'image stroboscopique contient des points totalement distincts qui occupent une zone dans le plan v, i , appelée attracteur étrange [3] [26].

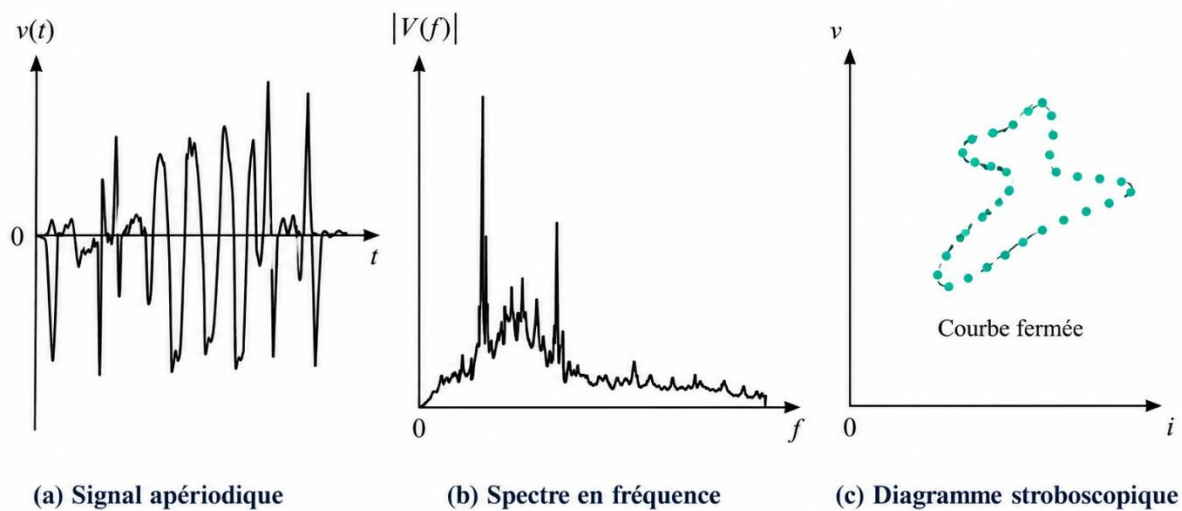


Figure II.12 : Régime chaotique [3].

II.7 Différentes approches pour l'étude de la ferrorésonance

II.7.1 Méthode analytique

L'approche analytique est sans doute la plus ancienne façon d'aborder la ferrorésonance. Elle consiste à traduire le comportement du circuit ferrorésonant en équations différentielles non linéaires, puis à les résoudre mathématiquement à l'aide de méthodes numériques, comme les algorithmes de Runge-Kutta. Ce qui rend cette approche intéressante, c'est qu'elle permet d'identifier les paramètres qui influencent l'apparition des différents régimes ferrorésonants et de délimiter les frontières entre les zones de fonctionnement normal et les zones dangereuses, une information précieuse au stade de la planification d'un réseau. Mais elle a ses limites. Les circuits modélisés sont souvent très simplifiés par rapport à la réalité, les équations impliquées peuvent devenir rapidement très complexes, et les manœuvres de commutation avec leurs transitoires associés sont difficiles à prendre en compte [22].

II.7.2 Simulation analogique

Avant l'ère de l'informatique, lorsqu'on voulait étudier un phénomène électrique complexe comme la ferrorésonance, on construisait une maquette analogique qui reproduisait le comportement du système à une échelle réduite. Des dispositifs tels que l'Analyseur Différentiel Électronique (EDA), l'Ordinateur Analogique (ANACOM) ou l'Analyseur de Réseau Transitoire (TNA) ont ainsi été utilisés pour simuler physiquement les réseaux électriques dans des conditions de tension et de courant sans danger. L'avantage de cette approche était réel : elle offrait une grande flexibilité dans la représentation des composants du réseau et permettait de travailler dans un environnement sûr. Mais ses inconvénients ont fini par la marginaliser. Les équipements analogiques nécessitent un entretien régulier et coûteux, calibration, remplacement des composants et occupent une surface de laboratoire considérable [22] [27].

II.7.3 Essai réel sur le terrain

Cette méthode plonge directement dans la réalité du réseau électrique, avec ses composants réels dans leur état naturel, sans la moindre simplification ni approximation. Ce que l'on observe lors de ces essais reflète exactement ce qui se passe dans un réseau en exploitation. Mais cette proximité avec la réalité a un prix. Soumettre volontairement des équipements en service à des surtensions ferrorésonantes, c'est prendre le risque de les endommager sérieusement. Chaque essai les expose à des contraintes qui peuvent accélérer leur vieillissement prématuré ou, dans le pire des cas, provoquer une défaillance catastrophique irréparable. Et le problème ne s'arrête pas là : les harmoniques générés pendant ces essais ont tendance à se propager vers les circuits voisins et à perturber leur fonctionnement. C'est pourquoi cette approche est aujourd'hui utilisée avec beaucoup de précaution, et réservée le plus souvent à l'analyse d'incidents qui se sont produits accidentellement [22].

II.7.4 Mesures en laboratoire

Elle reproduit la ferrorésonance sur des équipements réels à échelle réduite dans un environnement contrôlé et sécurisé. C'est un bon compromis entre réalisme et sécurité, qui permet de valider les modèles théoriques et de tester les moyens de protection. Sa limite principale reste la difficulté à reproduire fidèlement toute la complexité d'un réseau réel [22].

II.7.5 Simulation numérique

La simulation numérique est aujourd'hui celle qui s'impose dans la grande majorité des études sur la ferrorésonance. Elle repose sur l'utilisation de logiciels spécialisés, tels que MATLAB/Simulink, ATP/EMTP ou PSCAD qui permettent de modéliser avec précision les composants du réseau et de résoudre numériquement les équations différentielles non linéaires qui gouvernent le comportement du système [22] [7]. Ses avantages sont nombreux et décisifs. Elle est économique, ne nécessite aucun équipement physique encombrant, est totalement exempte de risques liés aux tensions dangereuses, et permet de simuler rapidement une grande variété de configurations et de conditions d'exploitation. On peut faire varier librement les paramètres du circuit, observer instantanément les formes d'onde et explorer l'ensemble des régimes ferrorésonants possibles sans jamais mettre en danger le moindre équipement. Son seul point faible réside dans la difficulté à représenter fidèlement, dans les modèles prédéfinis des logiciels, toutes les nuances des composants réels du réseau [22] [26].

II.8 Situations de réseaux électriques favorisant la ferrorésonance

Les Figure II.13, II.14, II.15, II.16 présente les principales situations favorisant l'apparition de la ferrorésonance dans les réseaux électriques

II.8.1 Transformateur de tension alimentée par la capacité d'un ou plusieurs disjoncteurs ouverts

Dans le cadre de l'EHV, certaines actions de commutation (comme le verrouillage d'un coupleur de barre omnibus ou d'un disjoncteur de barre omnibus, la suppression d'un défaut sur une section de barre omnibus, etc.) peuvent provoquer une ferrorésonance sur les transformateurs de tension (TT) connectés entre phases et terre. Le circuit de peut servir d'illustration pour ces configurations. Le phénomène est déclenché par l'ouverture du disjoncteur D, ce qui provoque la décharge de la capacité C via le TT, qui est ensuite amenée à saturation. La source fournit assez d'énergie grâce à la capacité de gradation du disjoncteur Cd pour soutenir l'oscillation. La capacité C fait référence à toutes les capacités au sol du TT ainsi qu'à la connexion offerte par les capacités des disjoncteurs ouverts. La ferrorésonance est classée comme subharmonique [3]. La figure ci-dessous II.13 illustre un exemple de réseau qui favoriser la ferroresonance transformateur de tension connecté en série avec un disjoncteur ouvert.

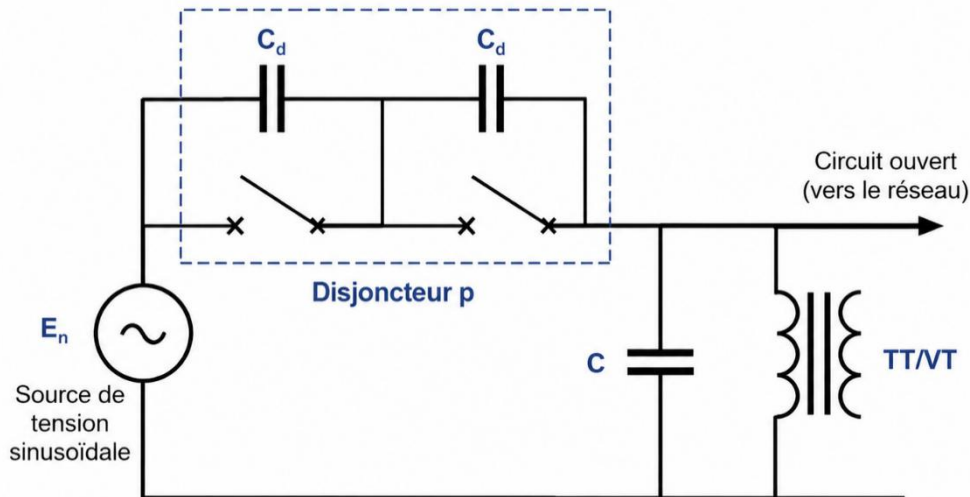


Figure II.13 : Transformateur de tension connecté en série avec un disjoncteur ouvert.

II.8.2 Transformateurs de tension (TT) connectés à un système à neutre isolé :

L'option de ce système de mise à la terre peut être sélectionnée en cas de raccordement d'une source d'urgence à neutre isolé ou en cas de défaillance de la mise à la terre du système. Les transitoires de surtension ou les surcharges dues à des opérations de commutation dans le réseau électrique (déconnexion de charge, suppression d'anomalies...) ou à une mise à la terre peuvent déclencher le phénomène en saturant le cœur de fer d'un ou des deux transformateurs de tension (TT) du circuit parallèle résonant. On observe donc la ferrorésonance tant sur les tensions de phase-terre que sur la tension au point neutre (VN). Le déplacement du point neutre et l'augmentation du potentiel d'une ou deux phases par rapport à la terre peuvent créer l'illusion d'une défaillance monophasée à la terre dans le système. Les surtensions peuvent excéder la tension habituelle phase-à-phase en condition stable, pouvant entraîner la défaillance diélectrique de l'appareil électrique. En fonction des rapports de l'inductance de magnétisation du transformateur et de la capacité C_0 , le phénomène de ferrorésonance peut être fondamental, sous-harmonique ou quasi-périodique [3] [28]. La figure II.14 illustre un exemple de réseau qui favoriser la ferroresonance TT entre phase et terre avec transformateur de source à neutres isolés

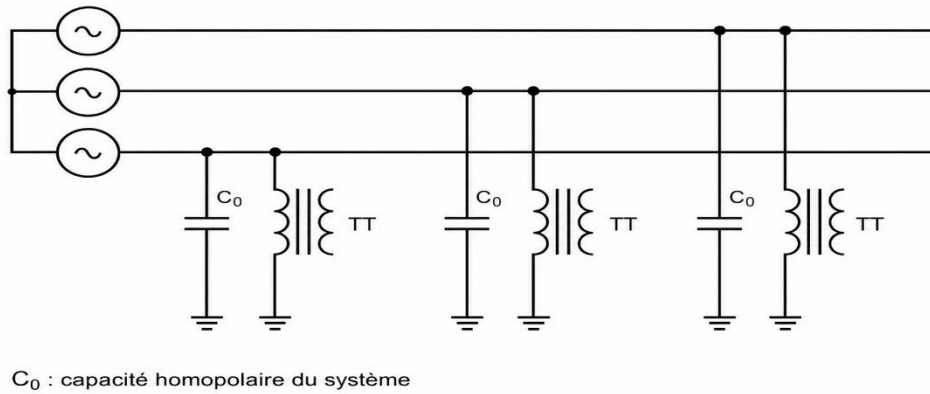


Figure II.14 : Ferrorésonance de TT entre phase et terre avec transformateur de source à neutres isolés.

II.8.3 Transformateur condensateur de tension (TCT)

Une option économique pour passer de la haute à la basse tension consiste à utiliser un diviseur de tension capacitif et un transformateur, ensemble connu sous le nom de transformateur condensateur de tension (TCT) [29].

Cet instrument dispose en lui-même de tous les critères nécessaires à l'émergence de la ferorésonance (condensateurs et composants non linéaires). En outre, l'existence de deux non-linéarités complique la mission du constructeur qui se doit néanmoins de développer un réducteur précis et fiable, donc dénué de régimes résonnants [29]. La figure II.15 présente schéma électrique d'un transformateur condensateur de tension.

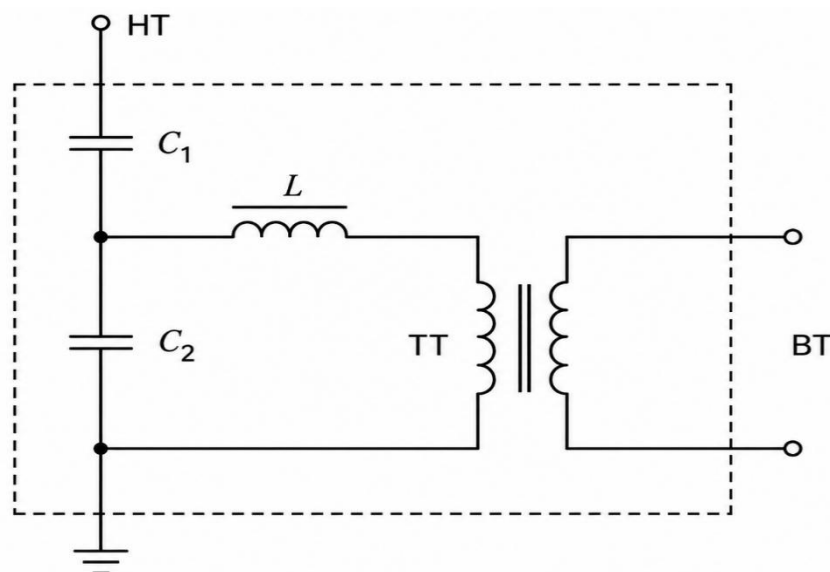


Figure II.15 : Schéma électrique d'un transformateur condensateur de tension.

Pour ces appareils, il s'agit d'une résonance série-monophasée ferorrésonante où les régimes sous-harmoniques sont susceptibles de se stabiliser fréquemment. Ce phénomène se manifeste généralement lors des tests de résistance au court-circuit du secondaire, précisément au moment où le court-circuit est ouvert [29] [30].

II.8.4 Transformateur alimenté accidentellement sur une ou deux phases

Ces situations peuvent survenir lorsque l'une ou deux phases de la source sont défectueuses alors que le transformateur est déchargé ou faiblement chargé, suite à un fusible qui grille dans un réseau électrique MT, une rupture de fil ou encore des travaux sous tension, comme lors de l'installation d'un cubique de coupure télécommandée (ACT). Les capacités peuvent se présenter sous la forme de câble souterrain ou de ligne aérienne alimentant un transformateur dont les enroulements primaires sont reliés en configuration étoilée, illustrations de systèmes déséquilibrés susceptibles à la ferorrésonance, isolé neutre ou mis à la terre, ou connecté en configuration delta. Par exemple, le circuit ferorrésonant en série se compose de la liaison série de la capacité phase-terre (située entre le disjoncteur et le transformateur) de la phase ouverte et de l'impédance magnétique du transformateur [3]. Les modes peuvent être fondamentaux, chaotiques ou sous-harmoniques. La figure II.16 illustre Exemples de systèmes déséquilibrés à risque de ferorrésonance.

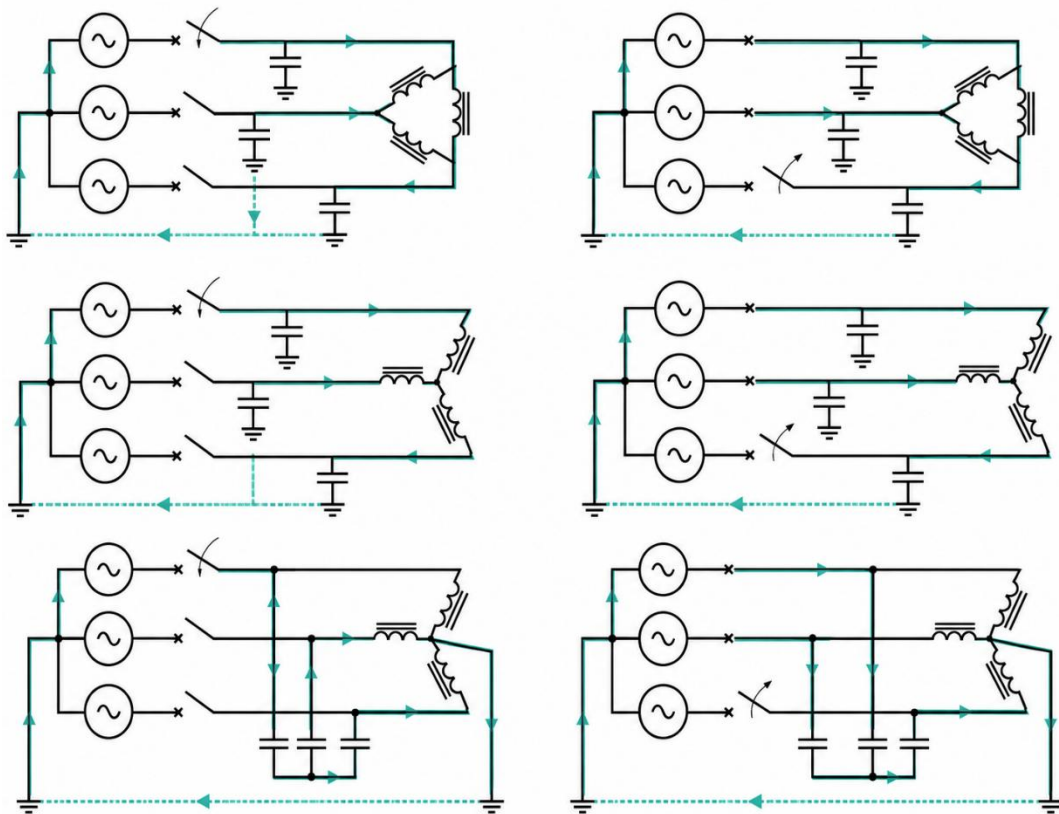


Figure II.16 : Exemples de systèmes déséquilibrés à risque de ferorrésonance.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases théoriques nécessaires pour comprendre le phénomène de ferrorésonance. Nous avons d'abord rappelé le principe de la résonance dans les circuits linéaires, afin de montrer ensuite la différence avec la ferrorésonance, qui apparaît lorsque la capacité du réseau interagit avec l'inductance non linéaire d'un transformateur saturable. Nous avons également étudié les principales conditions qui favorisent son apparition, ainsi que les différents régimes possibles : fondamental, sous-harmonique, quasi-périodique et chaotique. Enfin, nous avons abordé les méthodes d'étude de ce phénomène et les configurations de réseau les plus sensibles, notamment les transformateurs de tension, les réseaux à neutre isolé et les transformateurs faiblement chargés.

Ce chapitre constitue donc une base essentielle pour passer à l'étude par simulation, qui permettra d'observer concrètement le comportement ferrorésonant dans différentes situations.

Chapitre III.

Application et interprétation des résultats.

III.1 Introduction

Dans Les deux chapitres précédents ont posé les fondements théoriques nécessaires à la compréhension de la ferrorésonance. Ce chapitre est consacré à la simulation et l'analyse du phénomène de ferrorésonance dans un réseau triphasé réel. L'étude est réalisée sous MATLAB/Simulink afin d'observer le comportement du réseau en présence de capacités phase-terre et d'un transformateur de tension saturable.

L'étude de ce phénomène repose sur trois cas de simulation, le premier utilise un transformateur linéaire comme référence en variant la capacité de la terre, le second introduit le transformateur saturable a vide, ainsi le transformateur saturable avec une charge nominale.

III.2 Description du logiciel de simulation MATLAB/Simulink

MATLAB/Simulink constitue un environnement de calcul et de simulation formé par l'association de deux logiciels complémentaires. MATLAB constitue un outil mathématique performant qui facilite la représentation graphique de fonctions ainsi que la résolution d'équations numériques complexes. Simulink constitue un logiciel de modélisation et de simulation des comportements des systèmes dynamiques, fondé sur une interface graphique utilisant des diagrammes en blocs [31].

Dans le cadre de cette étude, l'utilisation de Simulink suit cinq étapes essentielles : établir le modèle du circuit en assemblant les blocs de la bibliothèque SimPowerSystems, placer les sources de signaux aux entrées, disposer les instruments de visualisation en sortie, paramétrer et lancer la simulation avec le solveur ode23tb, puis observer et analyser les résultats à l'aide des Scopes et de l'outil FFT intégré dans le bloc Powergui [7] [20].

III.3 Description du transformateur utilisé

III.3.1 Transformateur de potentiel JDZJ-10

Le transformateur utilisé dans cette étude est un transformateur de tension de type **JDZJ-10**. Il s'agit d'un transformateur de tension monophasé destiné aux réseaux moyenne tension, principalement utilisé pour la mesure de tension, le comptage d'énergie et l'alimentation des circuits de protection, [26]. Son rôle principal est d'abaisser une tension élevée du réseau vers une tension secondaire normalisée, plus faible et exploitable par les appareils de mesure, les relais de protection et les systèmes de surveillance [32] [33]. La figure III.1 présente le transformateur du potentiel de type JDZJ-10.

Explication du code modèle [32] :

- J : Transformateur de tension (VT)
- D : Configuration monophasée
- Z : Type de support intérieur (pilier)
- J : Structure d'isolation en résine époxy coulé
- 10 : Classe de tension (kV) : 10 kV

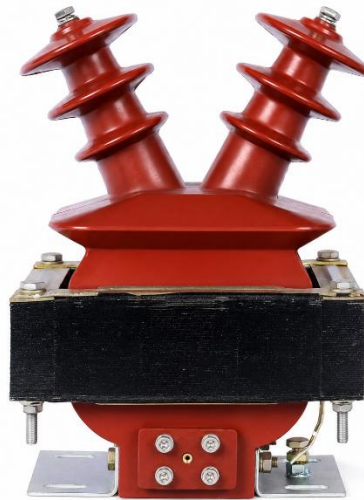


Figure III.1 : Transformateur de potentiel JDZJ-10 [32].

III.3.2 Identification des paramètres du transformateur

III.3.2.1 Données nominales du transformateur [7].

- Puissance nominale P_n : 50 VA.
- Fréquence f : 50 Hz.
- Tension primaire UAC : 10 KV.
- Tension secondaire : 100 V.
- Tension nominale : 5.773 KV.
- Résistance des enroulements (pu) : $R = 0.005$.
- Inductance des enroulements (pu) : $L = 0.008$.

III.3.2.2 Calcul des grandeurs de base

A partir des données nominales, les grandeurs de base nécessaires à la conversion en valeurs réduites (pu) sont calculées selon les formules suivantes [7] :

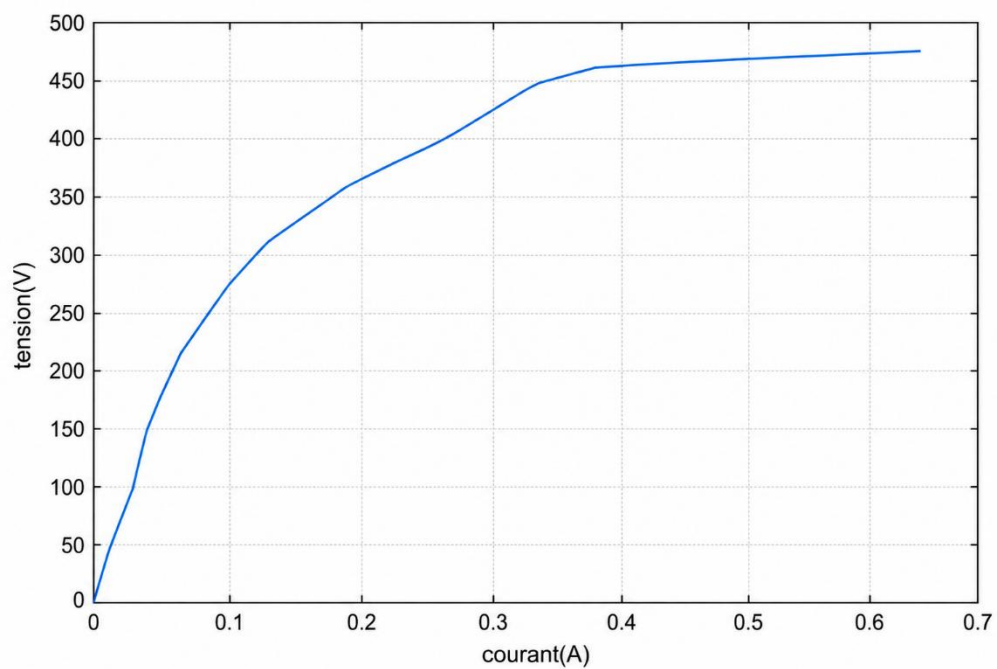
Grandeur de base	Formule	Valeur
Tension de base	$U_{base} = U_{AC} / \sqrt{3}$	5.773 KV
Courant de base	$I_{base} = P_n / \sqrt{2} U_n$	6.1 mA
Résistance de base	$R_{base} = U_n^2 / P_n$	0.677 MΩ
Inductance de base	$L_{base} = R_{base} / 2\pi f$	2123 H
Flux de base	$\varphi_{base} = \sqrt{2} U_n / 2\pi f$	—

III.3.2.3 Caractéristique de saturation du transformateur JDZJ-10

La caractéristique de saturation du transformateur JDZJ-10 est obtenue en appliquant différentes tensions au côté primaire, en mesurant les données de tension et de courant au secondaire, puis en les convertissant vers le côté primaire selon le rapport de transformation. Le flux est ensuite calculé à partir de la relation $U = d\varphi/dt$, puis converti en valeurs réduites selon la valeur de base du flux [7]. Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau III.1 et la figure III.2 :

Tableau III.1: Valeurs de caractéristique de saturation en pu [7].

$i(pu)$	$\varphi(pu)$
0	0
0.0408	0.1681
0.0735	0.3542
0.1225	0.5346
0.2123	0.7076
0.6287	0.8653
2.1066	1.0383
4.1805	1.2114
6.4912	1.3575
10.7778	1.5344

**Figure III.2 :** Courbe caractéristique de saturation du transformateur de tension JDZJ-10 [7].

Cette courbe, représentée sur la Figure III.2, illustre clairement les trois zones caractéristiques du comportement magnétique du noyau : la zone linéaire pour les faibles valeurs de courant, la zone du genou aux alentours de $i \approx 0.63$ pu, et la zone de saturation profonde au-delà de cette valeur, où une augmentation importante du courant ne produit qu'une faible augmentation du flux [7].

III.4 Description du réseau simulé

Le circuit simulé sous MATLAB/Simulink représente un réseau électrique triphasé simplifié, reproduisant les conditions réelles d'apparition de la ferrorésonance dans un réseau à neutre isolé. Comme le montre la Figure III.1, il est constitué de trois sources de tension monophasées A, B, C délivrant une tension de 10 kV à 50 Hz, de trois résistances de ligne R_1 , R_2 , R_3 de 0.1Ω chacune, d'un disjoncteur monophasé S connecté uniquement sur la phase A, de trois capacités à la terre C_1 , C_2 , C_3 représentant les capacités distribuées naturelles des câbles souterrains, et de trois transformateurs de tension monophasés saturables correspondant au modèle JDZJ-10 dont les primaires sont connectés entre chaque phase et la terre [].

Le scénario de simulation repose sur la manœuvre du disjoncteur monophasé S : en régime normal avant $t = 0.1$ s le réseau fonctionne en régime triphasé équilibré. À $t = 0.1$ s, le disjoncteur s'ouvre sur la phase A, créant un défaut monophasé qui élève la tension des phases B et C jusqu'à la tension de ligne et charge les capacités à la terre. Lorsque le défaut disparaît à $t = 0.2$ s et que le disjoncteur se referme, l'énergie stockée dans les capacités se décharge brutalement à travers les enroulements primaires des transformateurs, provoquant leur saturation. C'est à partir de cet instant que la ferrorésonance peut s'établir, selon la valeur de la capacité à la terre [7] [30] [28]. Les figures III.3, III.4, III.5 montre les différents réseaux simulés dans notre étude.

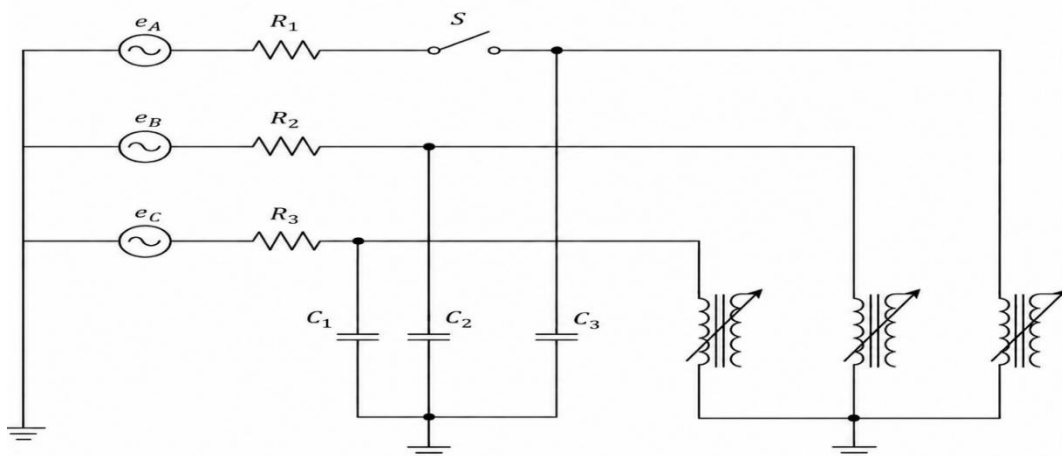


Figure III.3 : Réseau électrique simulé avec des transformateurs saturables.

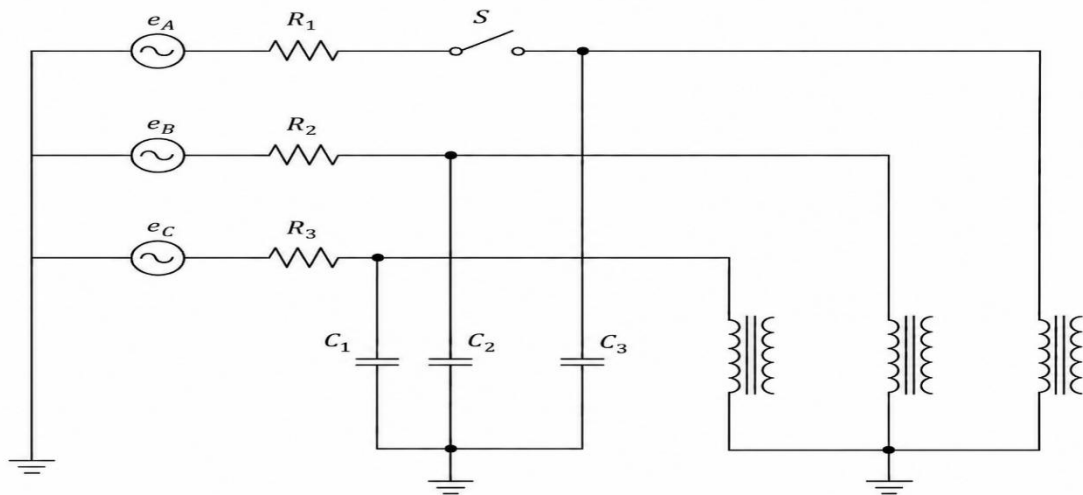


Figure III.4 : Réseau électrique simulé avec des transformateurs linéaires.

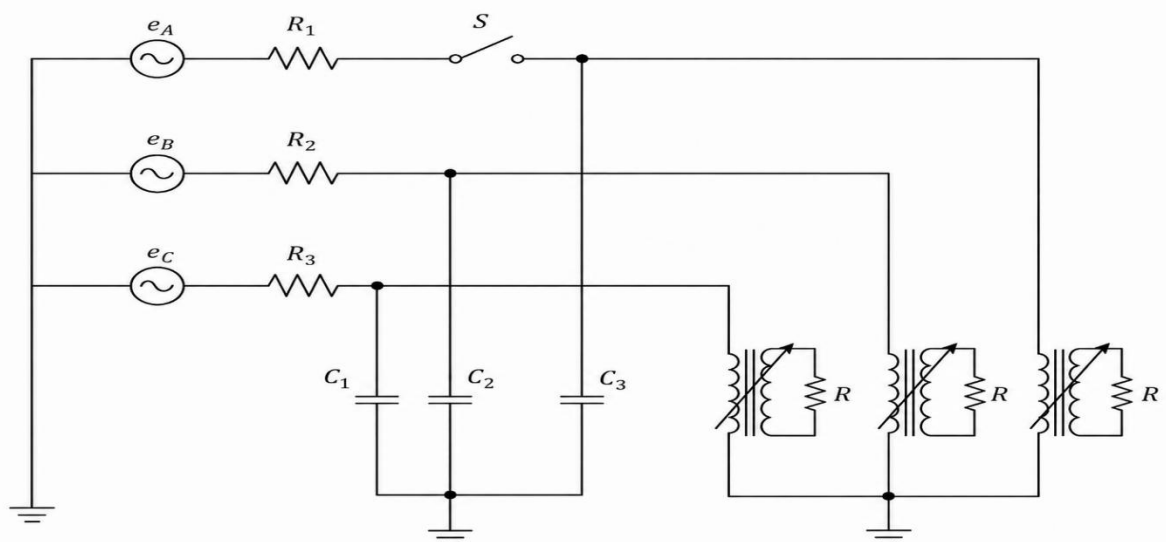


Figure III.5 : Réseau simulé avec des transformateurs saturables avec une charge résistive nominale.

III.5 Simulation et interprétation des résultats

III.5.1 Transformateur linéaire à vide

La Figure III.6 présente le schéma global du système étudié sous MATLAB/Simulink

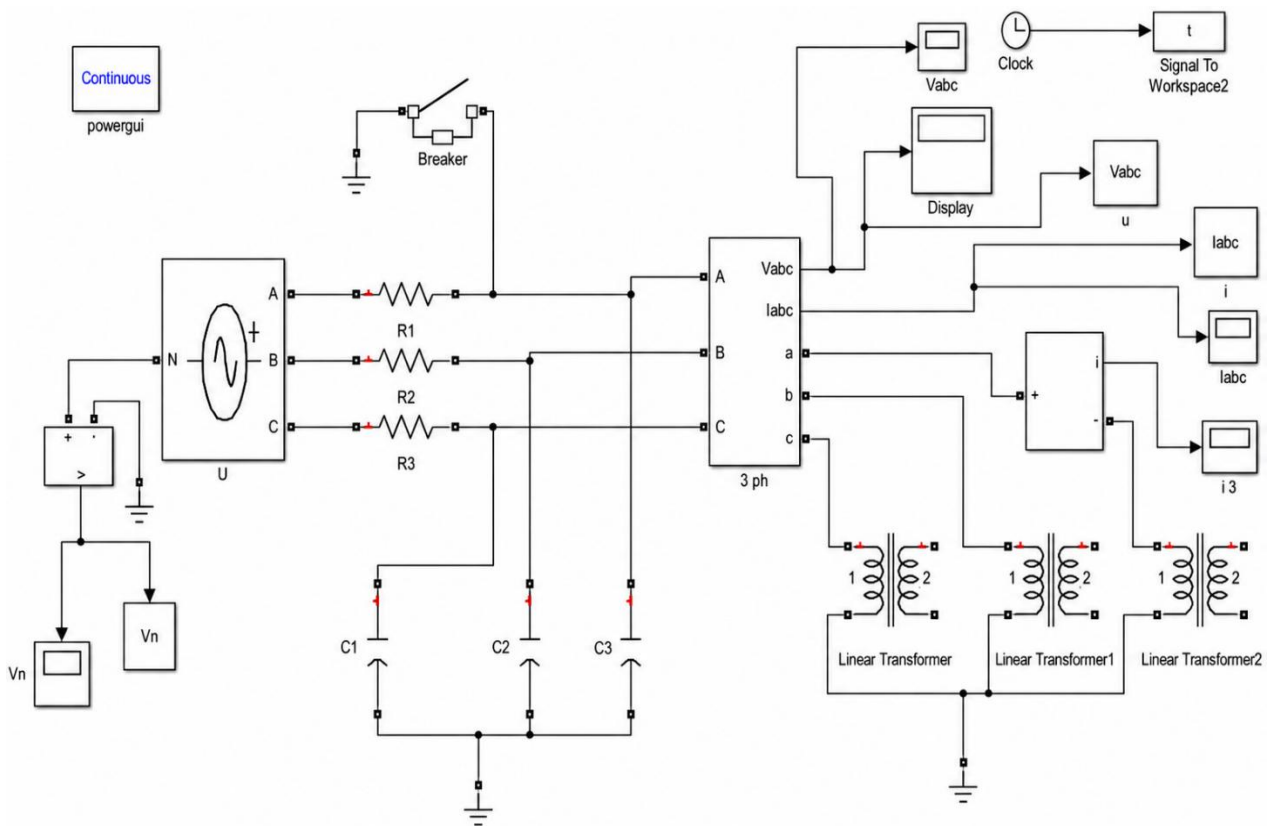


Figure III.6 : Modèle de réseau simulé avec transformateurs linéaires à vide sous MATLAB/Simulink.

Les figures III.7, III.8 représentent les courbes V_{abc} et I_{abc} et V_n lors de la simulation de réseau avec des transformateurs linéaires et l'analyse FFT pour $C_{1,2,3} = 10 \text{ nF}$.

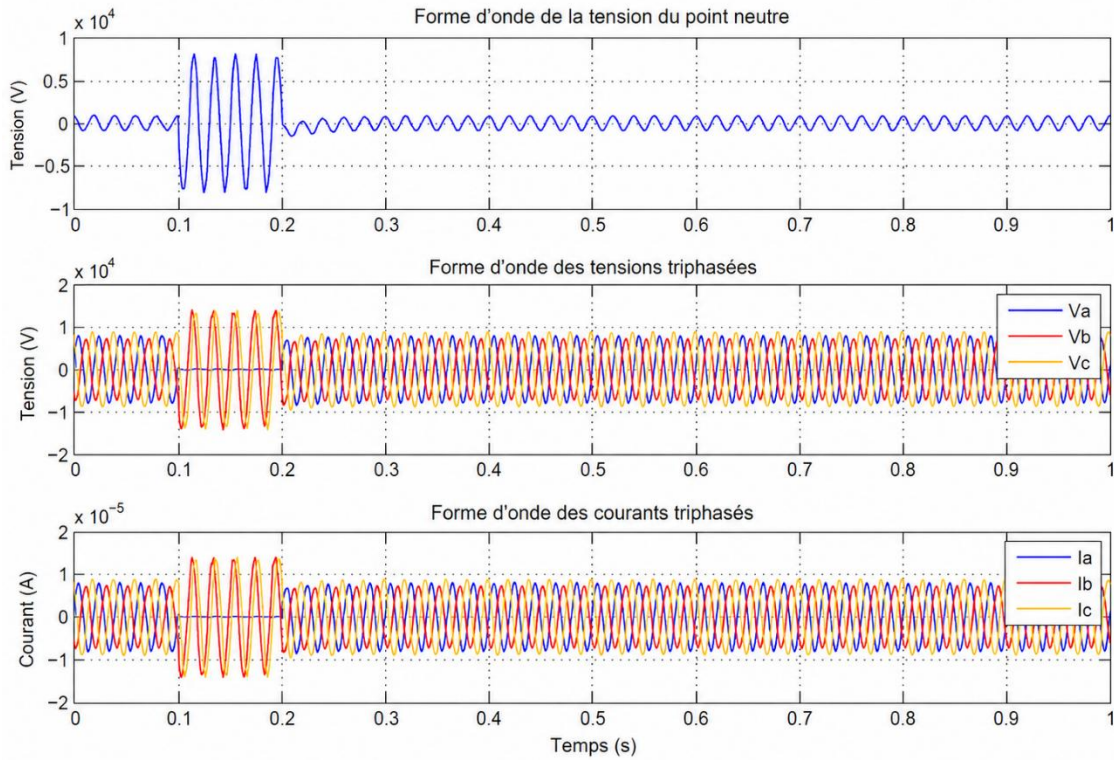


Figure III.7 : Formes d'onde des tensions V_{abc} et , du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$.

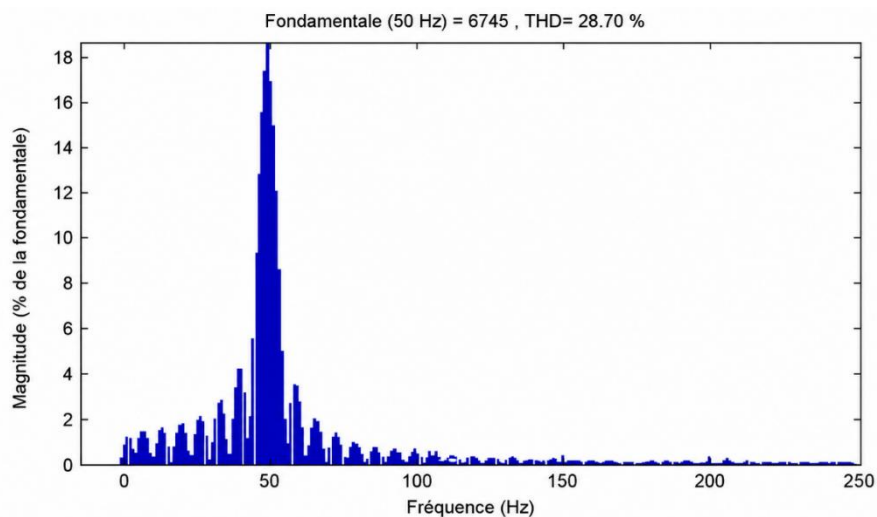


Figure III.8 : Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$.

Pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$, les résultats de la simulation sont présentés dans les figure III.9, III.10 :

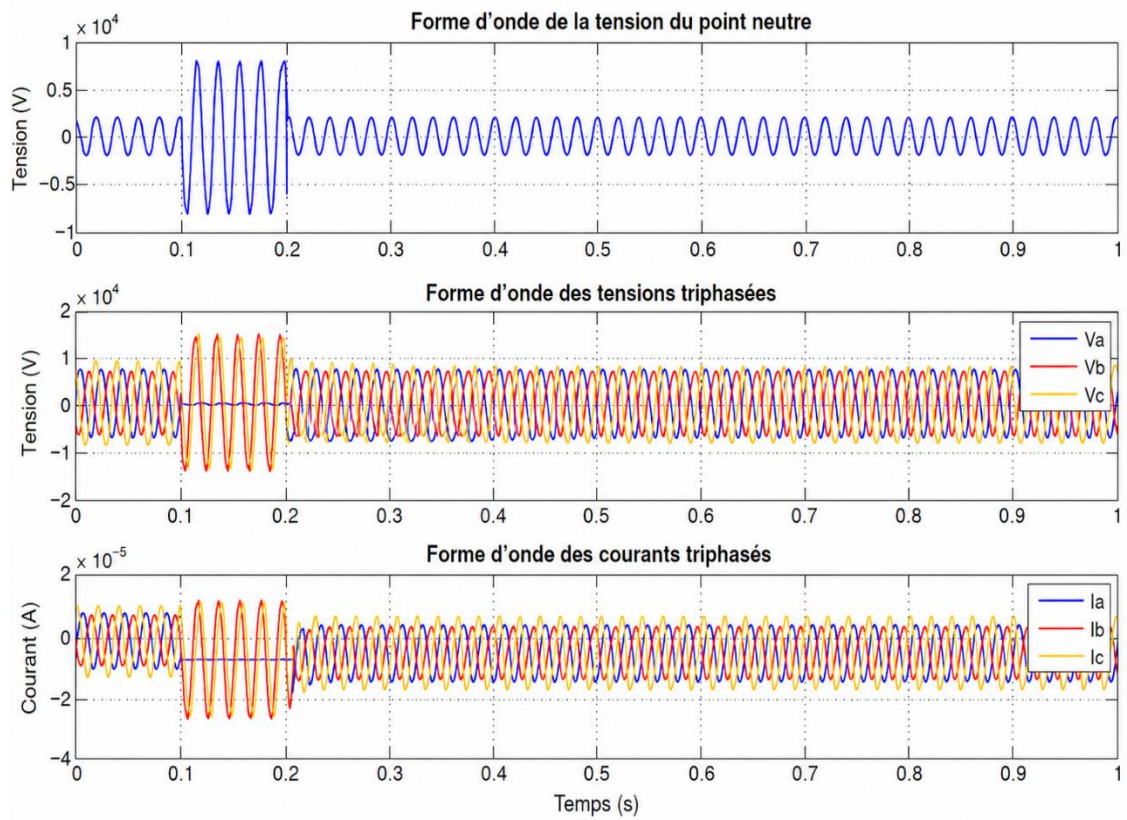


Figure III.9 : Formes d'onde des tensions V_{abc} et , du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$.

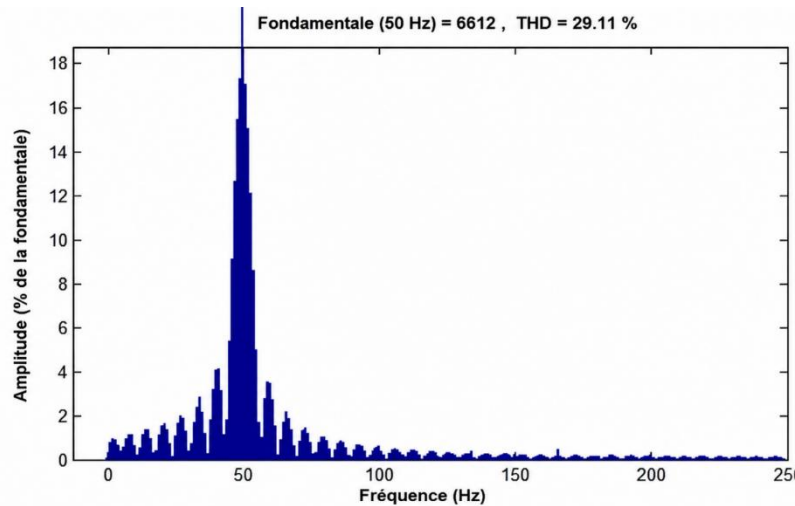


Figure III.10 : Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$.

Pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$, les résultats de la simulation sont présentés dans les figure III.11, III.12 :

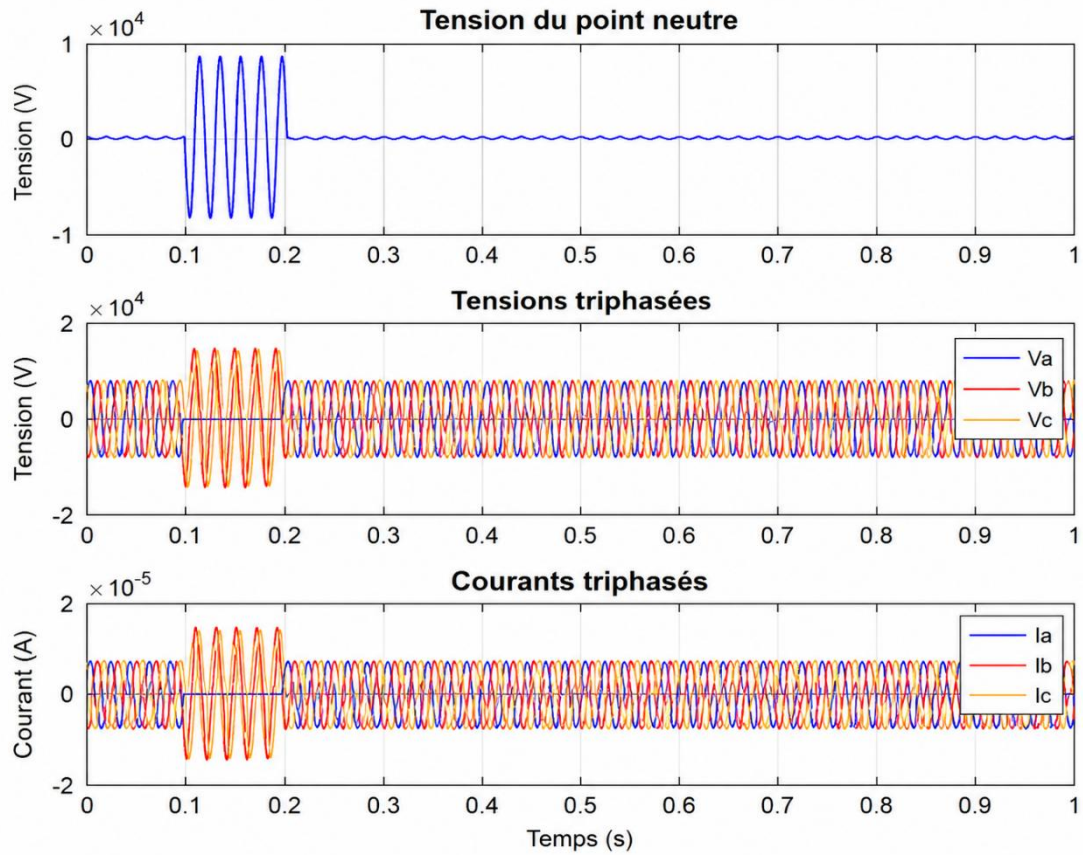


Figure III.11 : Formes d'onde des tensions V_{abc} et , du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$.

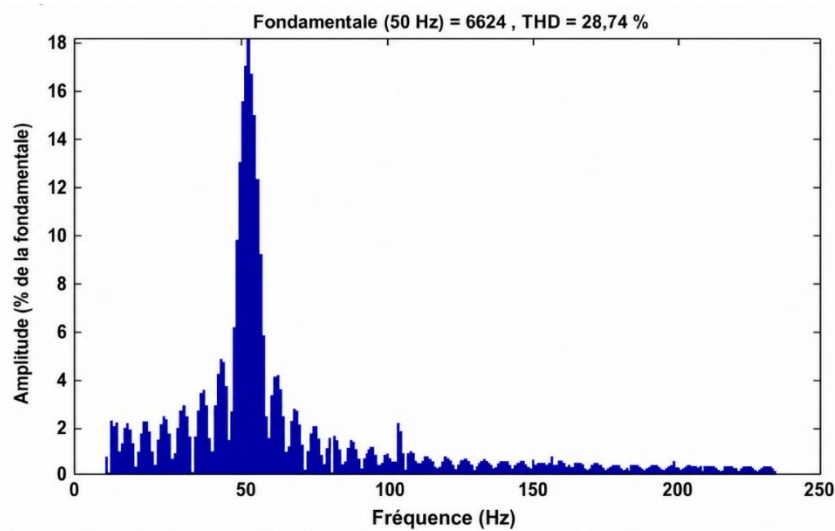


Figure III.12 : Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$.

III.5.1.1 Interprétations des résultats

Les résultats obtenus pour le transformateur linéaire à vide montrent que le réseau est stable avant le défaut. Entre 0 et 0,1s, les tensions et les courants sont périodiques, et la tension du point neutre reste faible. Cela confirme que le système fonctionne normalement avant la perturbation.

Pendant le défaut, entre 0,1s et 0,2s, une élévation nette de la tension du point neutre apparaît. Cette surtension est due au déséquilibre provoqué par l'ouverture de la phase et à l'interaction entre les capacités phase-terre et l'inductance équivalente du transformateur. Les tensions triphasées sont aussi perturbées durant cet intervalle, tandis que les courants restent faibles car le transformateur fonctionne à vide.

Après 0,2s, le défaut disparaît et le réseau revient progressivement vers un régime stable. Les formes d'onde redeviennent quasi sinusoïdales, ce qui montre que, dans le cas linéaire, le phénomène reste principalement transitoire et ne se maintient pas durablement.

La comparaison entre les trois valeurs de capacité ($10\ \mu F$, $4\ \mu F$, $70\ \mu F$) montre que la capacité influence l'amplitude et l'amortissement des oscillations du point neutre. Cependant, dans tous les cas, le système revient à un état stable après le défaut. Les analyses *FFT* montrent une fondamentale dominante à (50Hz), avec un *THD* proche de (29%), ce qui indique la présence d'harmoniques dues à la commutation, mais sans instabilité permanente.

Ainsi, cette première simulation constitue un cas de référence. Elle montre que les capacités phase-terre peuvent provoquer des oscillations transitoires.

III.5.2 Transformateur saturable (non-linéaire) à vide

La figure III.13 le réseau simulé avec des transformateurs saturables à vide sous Matlab/Simulink :

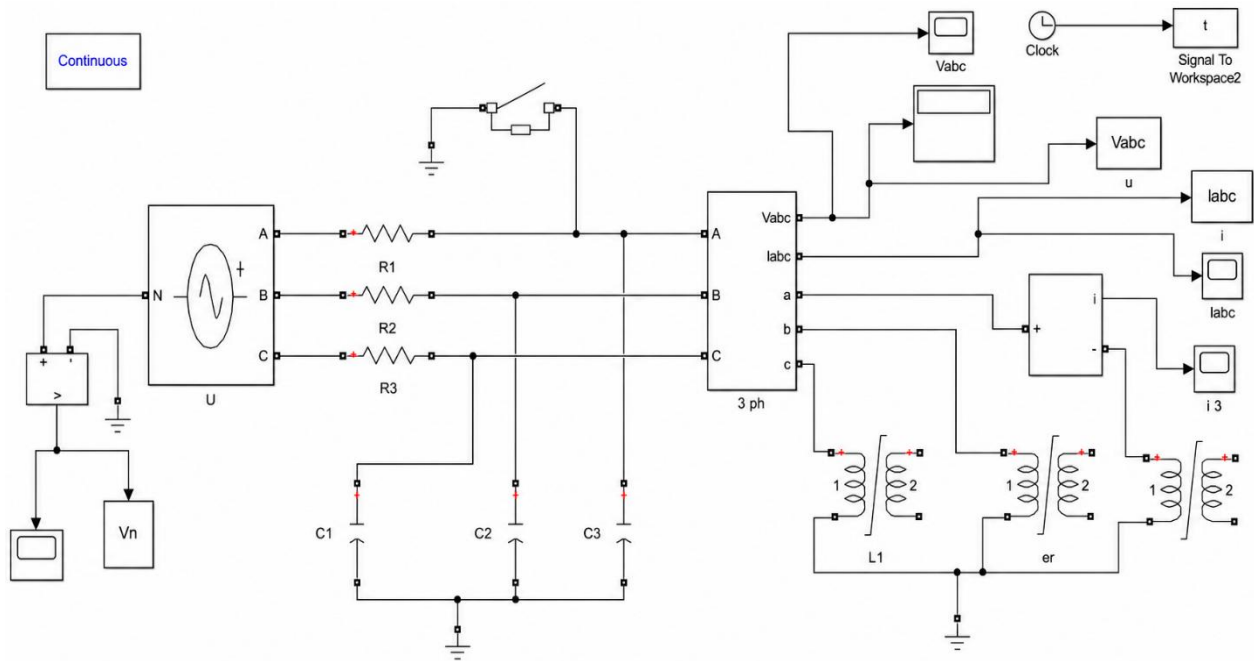


Figure III.13 : Modèle de réseau simule avec transformateurs saturables à vide sous MATLAB/Simulink.

Pour $C_{1,2,3} = 10 \text{ } \mu\text{F}$, les résultats de la simulation sont présentés dans les figure III.14, III.15 :

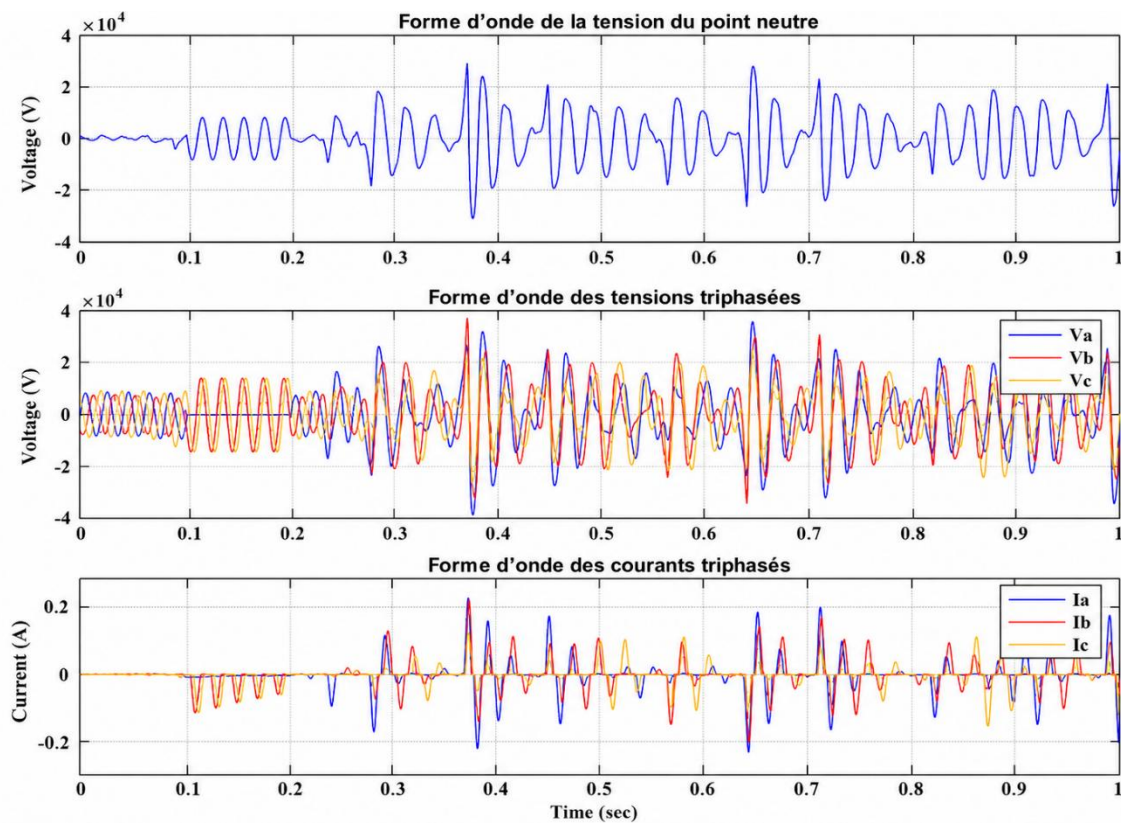


Figure III.14 : Formes d'onde des tensions V_{abc} et , du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 10 \text{ } \mu\text{F}$.

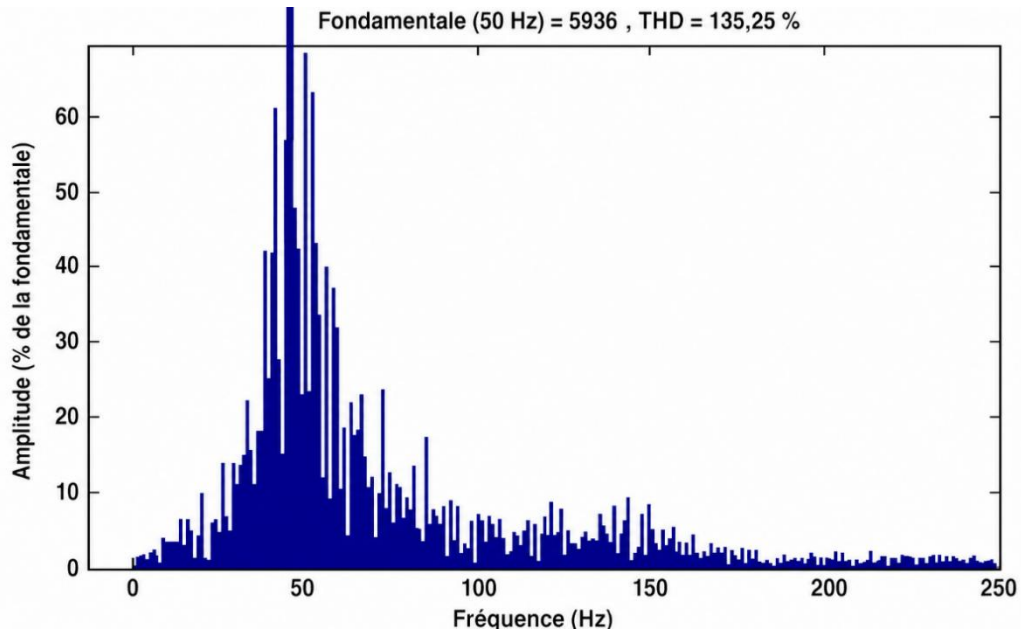


Figure III.15 : Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$.

Pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$, les résultats de la simulation sont présentés dans les figure III.16, III.17 :

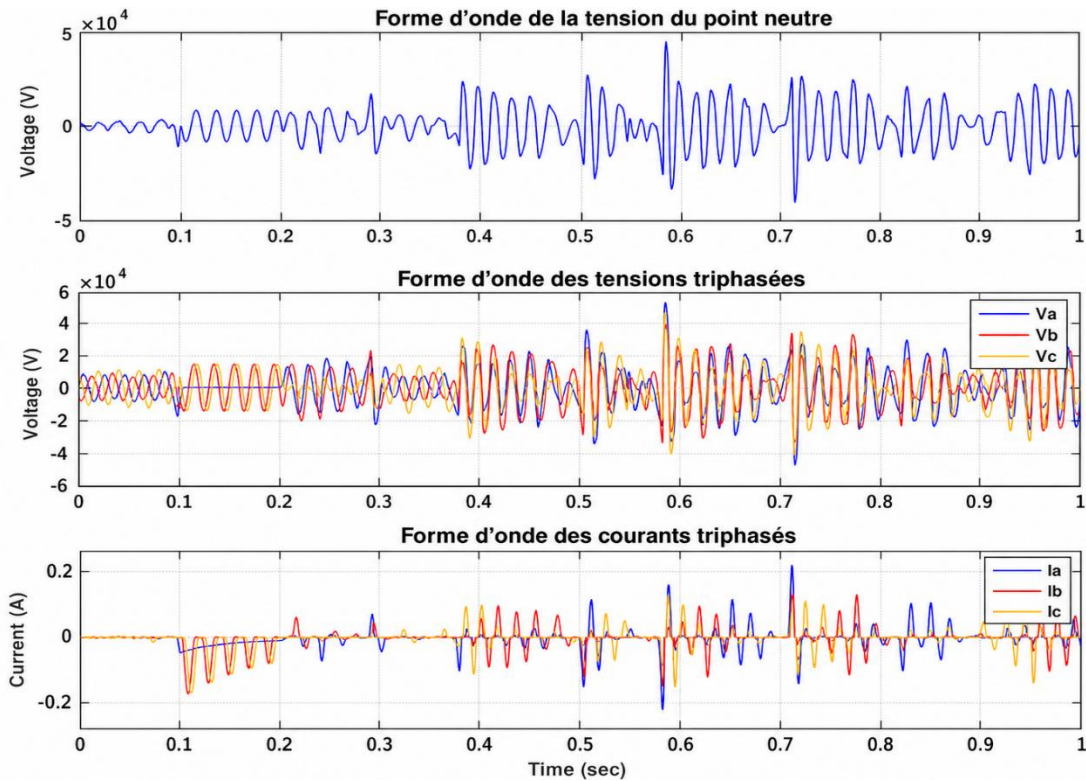


Figure III.16 : Formes d'onde des tensions V_{abc} et , du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$.

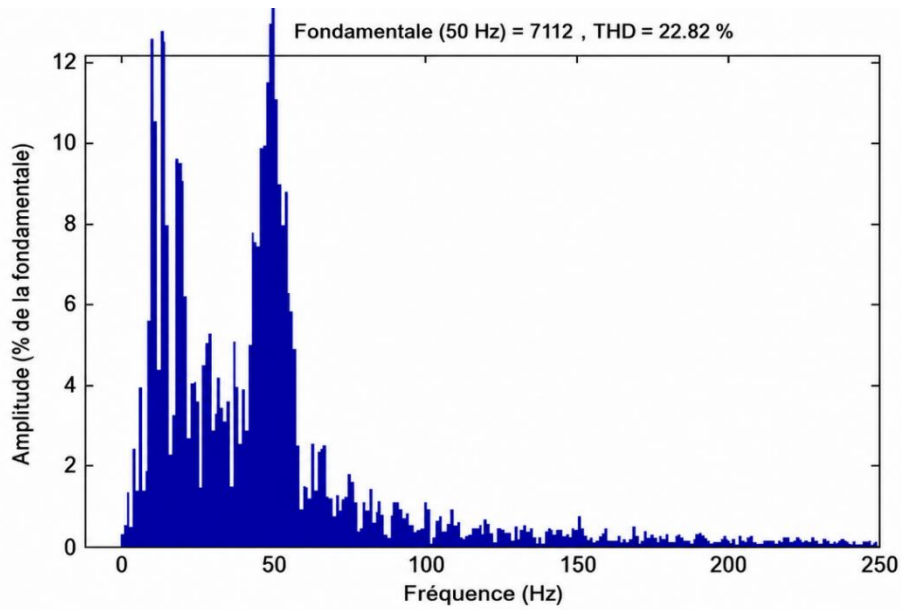


Figure III.17 : Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$

Pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$, les résultats de la simulation sont présentés dans les figure III.18, III.19 :

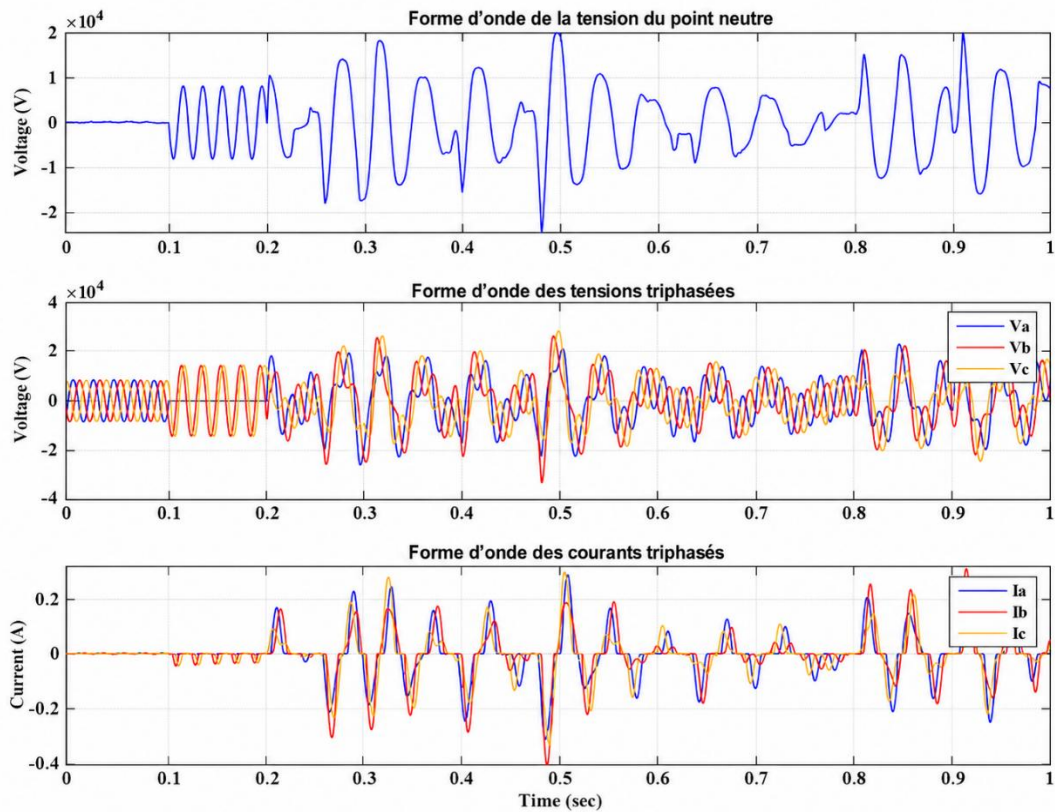


Figure III.18 : Formes d'onde des tensions V_{abc} et , du courant I_{abc} et de la tension et du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$.

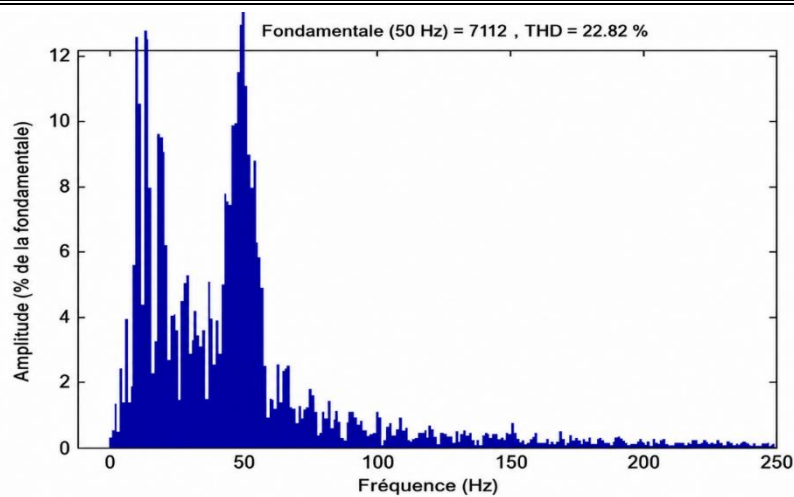


Figure III.19 : Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 70 \eta F$.

III.5.2.1 Interprétations des résultats

Les résultats du transformateur saturable non linéaire à vide montrent l'apparition d'un comportement ferrorésonant. Après le défaut, la tension du point neutre augmente fortement et les formes d'onde deviennent déformées et irrégulières. Ce phénomène est dû à l'interaction entre les capacités phase-terre et l'inductance magnétisante non linéaire du transformateur, qui varie lorsque le noyau entre en saturation.

Les tensions triphasées présentent des surtensions et un déséquilibre visible entre les phases. Les courants, bien que le transformateur soit à vide, deviennent impulsionnels à cause de la saturation magnétique. Cela confirme que le phénomène observé n'est pas un simple transitoire, mais une ferrorésonance provoquée par la non-linéarité du noyau.

Les trois régimes étudiés montrent des comportements différents. Le régime à fréquence fondamentale reste principalement dominé par (50Hz), mais avec une déformation des signaux. Le régime à haute fréquence se caractérise par des oscillations rapides et un contenu harmonique plus important. Le régime à basse fréquence présente des oscillations plus lentes, irrégulières et de grande amplitude.

Les analyses FFT confirment cette déformation : les valeurs élevées du THD, notamment (135,25%) et (273,43%), montrent la présence de nombreuses composantes harmoniques. Le cas avec (THD=22,82%) est moins sévère, mais il reste influencé par la saturation. Ainsi, cette application confirme que la ferrorésonance apparaît lorsque les capacités du réseau interagissent avec le noyau saturable du transformateur.

III.5.3 Transformateur saturable (non-linéaire) avec charge nominale

La figure ci-dessous III.20 le réseau simulé avec des transformateurs saturables avec charge nominale sous Matlab/Simulink :

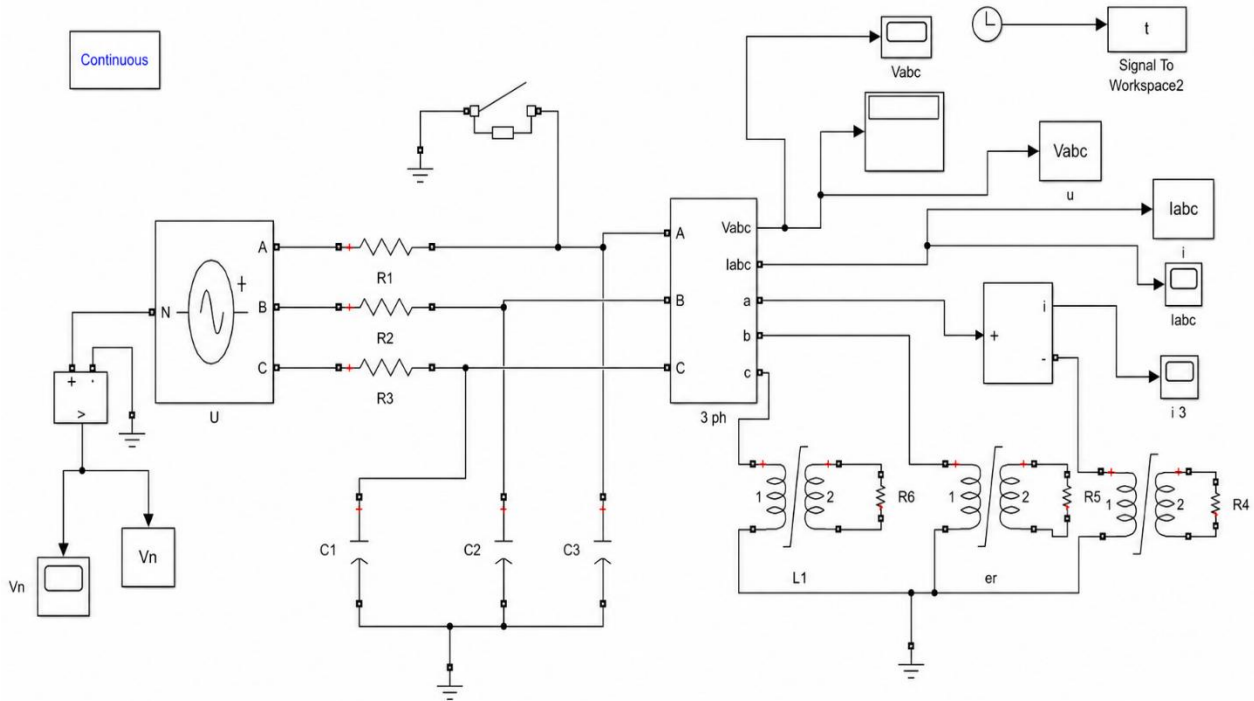


Figure III.20: Modèle de réseau simule avec transformateurs saturables avec un charge nominale sous MATLAB/Simulink.

Calcul de la résistance de charge

- Tension secondaire : 100 V
- Puissance nominale : 50 VA

La résistance de charge est calculée à partir de la tension secondaire nominale et de la puissance nominale selon la relation suivante :

$$R_{charge} = \frac{V^2}{P_n} = 200\Omega \quad (\text{III.6})$$

Pour $C_{1,2,3} = 10 \mu F$, les résultats de la simulation sont présentés dans les figure III.21, III.22 :

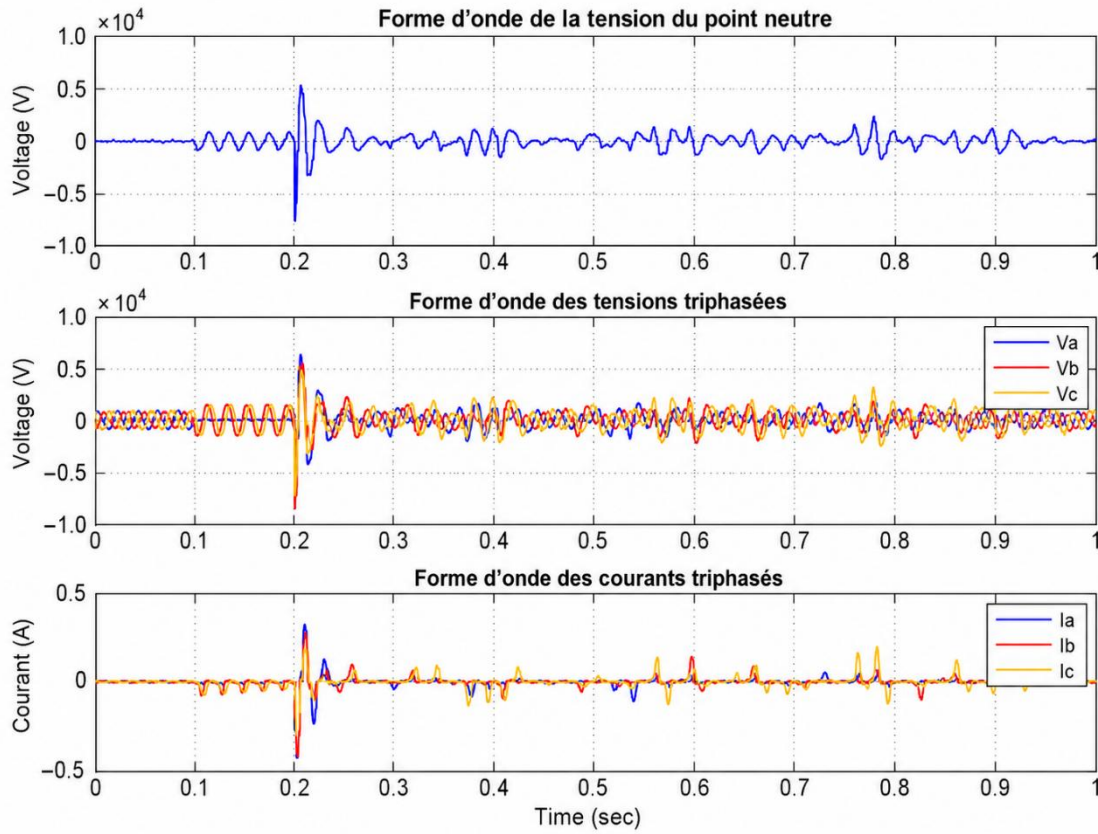


Figure III.21 : Formes d'onde des tensions V_{abc} et , du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$.

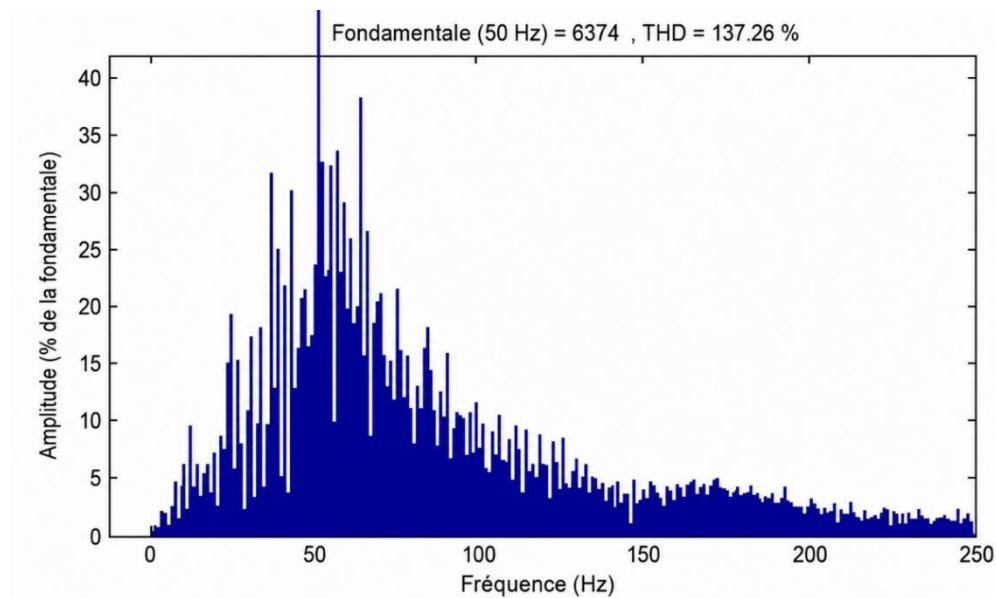


Figure III.22 : Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 10 \eta F$.

Pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$, les résultats de la simulation sont présentés dans les figure III.23, III.24 :

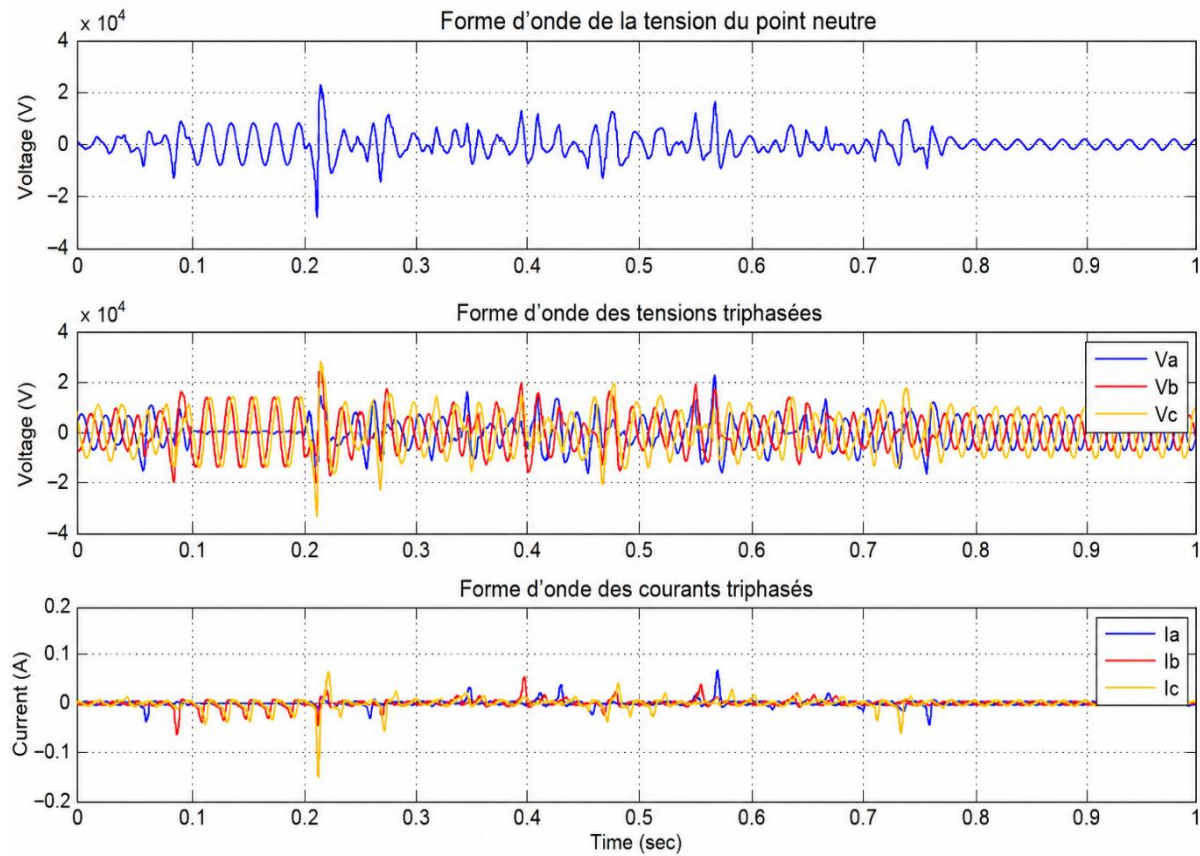


Figure III.23 : Formes d'onde des tensions V_{abc} et , du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 4 \eta F$.

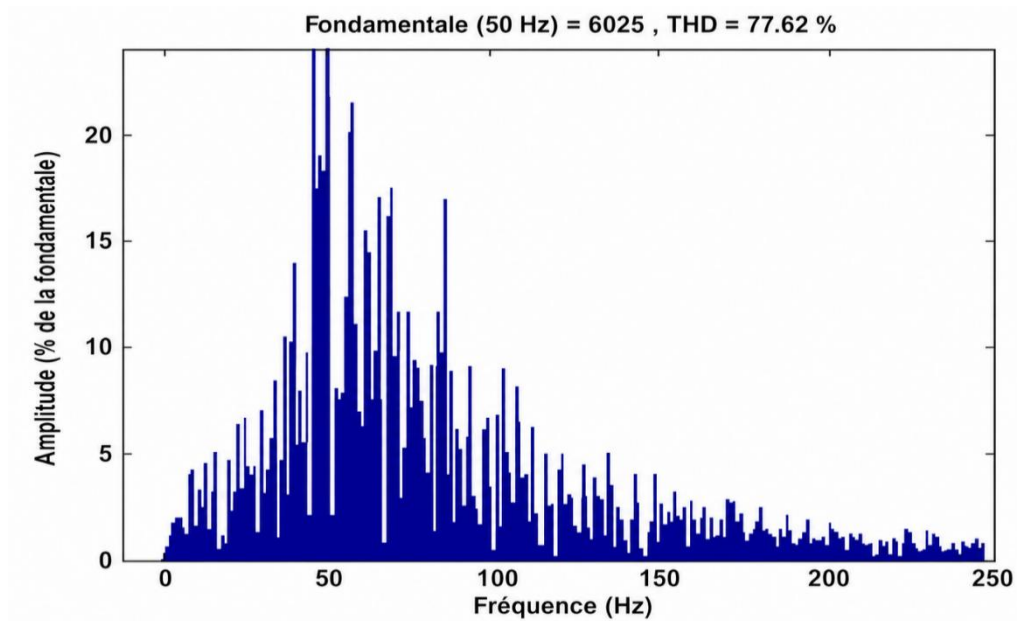


Figure III.24 : Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour

$$C_{1,2,3} = 4 \eta F.$$

Pour $C_{1,2,3} = 70 \text{ } \eta F$, les résultats de la simulation sont présentés dans les figure III.25, III.26 :

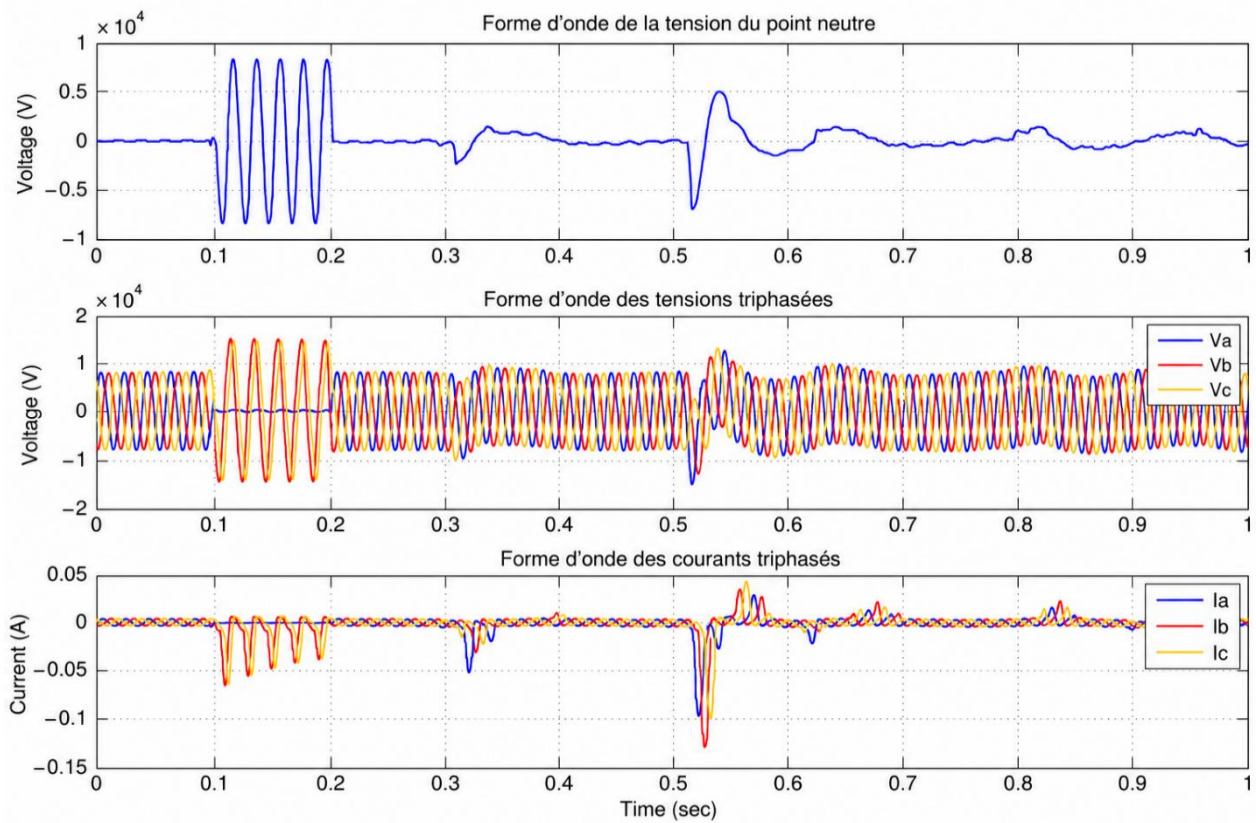


Figure III.25 : Formes d'onde des tensions V_{abc} et , du courant I_{abc} et de la tension du neutre V_n pour $C_{1,2,3} = 70 \text{ } \eta F$.

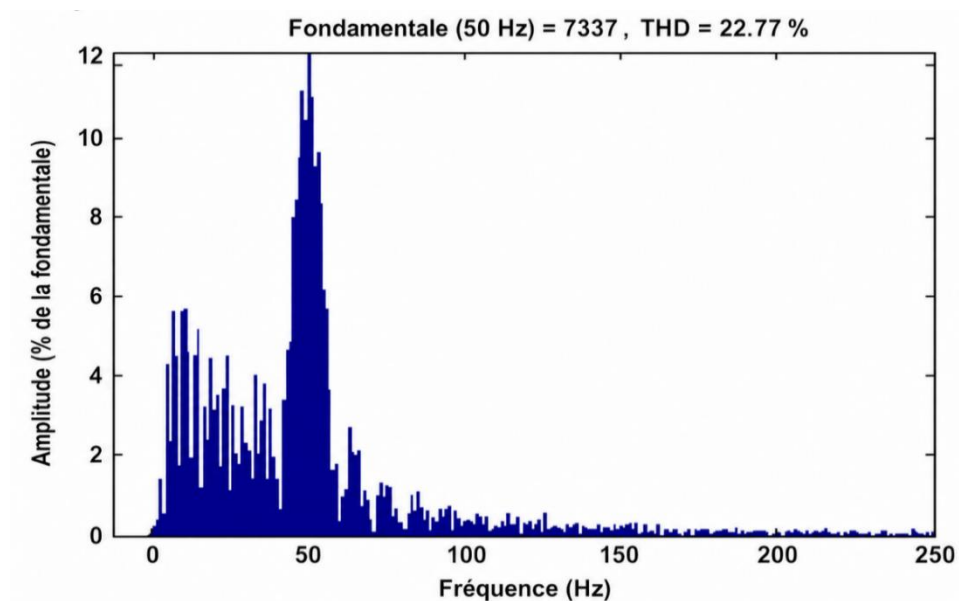


Figure III.26 : Analyse spectrale (FFT) des tensions et des courants pour $C_{1,2,3} = 70 \text{ } \eta F$.

III.5.4 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus avec le transformateur saturable non linéaire en présence d'une charge nominale montrent que la charge modifie sensiblement le comportement ferrorésonant du réseau. Contrairement au cas à vide, la charge raccordée au secondaire introduit un effet d'amortissement qui permet de réduire certaines oscillations, mais elle ne supprime pas complètement le phénomène de ferrorésonance. La tension du point neutre reste perturbée après le défaut, avec des oscillations et des pics de surtension, ce qui confirme que l'interaction entre les capacités phase-terre et l'inductance magnétisante saturable active.

Les tensions triphasées présentent une déformation visible pendant et après le défaut. Cependant, par rapport au fonctionnement à vide, les formes d'onde semblent généralement mieux amorties dans certains cas, car la charge absorbe une partie de l'énergie échangée entre le réseau capacitif et le transformateur. Les courants triphasés deviennent plus significatifs que dans le cas à vide, ce qui est logique puisque la charge impose un courant secondaire. Malgré cela, les courants restent déformés et présentent des pics, traduisant l'influence de la saturation magnétique du noyau.

L'analyse FFT confirme que la charge influence directement la sévérité du phénomène. Pour certains cas, le taux de distorsion harmonique reste élevé, notamment avec un (THD=137,26%) et un (THD=77,62%), ce qui indique une forte présence d'harmoniques et un régime ferrorésonant encore marqué. En revanche, pour d'autres conditions, le (THD) diminue jusqu'à environ (22,77%), ce qui montre que la charge peut atténuer le contenu harmonique et stabiliser partiellement le système.

La capacité phase-terre garde aussi un rôle essentiel dans cette application. Selon sa valeur, elle peut rapprocher ou éloigner le système des conditions favorables à la ferrorésonance. Lorsque l'association entre la capacité et l'inductance saturable devient défavorable, les surtensions, les pics de courant et la distorsion harmonique augmentent. À l'inverse, certaines valeurs de capacité, combinées à l'effet amortissant de la charge, conduisent à une réponse moins sévère.

Ainsi, cette troisième application montre que la charge nominale réduit partiellement l'intensité de la ferrorésonance, mais ne l'élimine pas totalement. Le phénomène reste lié à la non-linéarité du transformateur saturable et à la présence des capacités phase-terre. Les résultats

confirment donc que la charge joue un rôle d'amortissement, tandis que la capacité détermine en grande partie le régime obtenu : plus ou moins déformé, plus ou moins stable, et plus ou moins riche en harmoniques.

III.6 Interprétation générale des résultats

L'ensemble des simulations réalisées dans ce chapitre permet de dresser un bilan clair et cohérent du phénomène de ferorésonance, en mettant en évidence le rôle déterminant de trois facteurs interdépendants : la non-linéarité du noyau du transformateur, la valeur de la capacité à la terre et l'effet de la charge au secondaire.

La première simulation réalisée avec le transformateur linéaire a servi de cas de référence indispensable. Elle a démontré que, en l'absence de saturation, le réseau retrouve son régime sinusoïdal normal après la disparition du défaut, quelle que soit la valeur de la capacité à la terre. Les oscillations observées restent transitoires et s'amortissent naturellement, avec un THD modéré proche de 29 %. Ce résultat confirme que la non-linéarité du noyau est la condition nécessaire à l'apparition de la ferorésonance sans elle, aucun régime ferorésonant persistant ne peut s'établir [2].

La deuxième simulation réalisée avec le transformateur saturable à vide a constitué le cœur de cette étude. L'introduction de la saturation a radicalement transformé le comportement du réseau après le défaut : les formes d'onde sont devenues fortement déformées, les tensions du point neutre ont atteint des valeurs élevées, et les courants ont présenté des pics impulsifs caractéristiques. Les trois valeurs de capacité ont produit trois régimes ferorésonants distincts, confirmant que le rapport entre la réactance capacitive et l'inductance magnétisante non linéaire détermine le type de régime qui s'établit. Les valeurs de THD très élevées atteignant 135.25 % et 273.43 % illustrent la sévérité des distorsions harmoniques générées.

La troisième simulation réalisée avec le transformateur saturable en charge nominale a mis en évidence le rôle amortissant de la charge. En absorbant une partie de l'énergie échangée entre le réseau capacitif et le transformateur, la charge résistive de 200 Ω a atténué sensiblement certains régimes ferorésonants, réduisant le THD jusqu'à environ 22.77 % dans les cas les plus favorables. Cependant, cette atténuation n'est pas suffisante pour éliminer totalement le

phénomène les surtensions et les distorsions harmoniques persistent, confirmant que la charge joue un rôle d'amortisseur mais ne constitue pas à elle seule une solution préventive efficace.

En synthèse, les trois simulations montrent que la ferrorésonance est un phénomène conditionné par la coexistence de trois éléments : une inductance non linéaire due à la saturation du noyau, une capacité à la terre de valeur appropriée, et un niveau de charge insuffisant pour amortir les oscillations. La suppression de l'un de ces éléments en particulier la non-linéarité ou la capacité suffit à prévenir l'apparition du phénomène, ce qui ouvre la voie aux stratégies de protection et de prévention qui pourront faire l'objet d'études futures.

III.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en pratique les bases théoriques établies dans les chapitres précédents, à travers trois simulations réalisées sous MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus ont confirmé de façon évidente que la ferrorésonance est un phénomène directement lié à la non-linéarité du noyau ferromagnétique du transformateur, en absence de saturation, le réseau reste stable et retrouve son régime normal après tout défaut. Dès que la saturation est introduite, le comportement du réseau change complètement, et il se constituent des régimes ferrorésonants qui durent, dont la nature et l'importance dépendent très étroitement de la valeur de la capacité à la terre. L'ajout d'une charge au secondaire a montré un effet d'amortissement réel, diminuant l'intensité du phénomène sans toutefois l'éliminer totalement.

Ces résultats montrent bien la dangerosité de la ferrorésonance pour les réseaux électriques et soulignent la nécessité de prendre en compte ce phénomène dès la conception et l'exploitation des réseaux.

Conclusion générale.

Conclusion générale

Au terme de ce mémoire, nous pouvons conclure que l'étude de la ferrorésonance dans les réseaux électriques représente un sujet important en électrotechnique, car ce phénomène peut provoquer des surtensions dangereuses, des surintensités, une déformation importante des formes d'onde, un déplacement du point neutre et dans certains cas, une détérioration des équipements électriques. La ferrorésonance ne se présente pas comme une simple résonance linéaire classique. Elle est liée principalement à l'interaction entre les capacités du réseau et l'inductance magnétisante non linéaire d'un transformateur, ce qui rend son comportement difficile à prévoir et très sensible aux conditions initiales.

Le travail réalisé dans ce mémoire a été organisé en deux parties complémentaires : une partie théorique et une partie d'application par simulation numérique. La première partie a permis de poser les bases nécessaires à la compréhension du phénomène. Nous avons d'abord présenté les généralités sur les réseaux électriques. Dans cette même partie, nous avons accordé une importance particulière au transformateur, puisqu'il constitue l'élément principal dans l'apparition du phénomène étudié. Cette étude préliminaire était nécessaire, car la ferrorésonance apparaît dans des configurations réelles de réseau, notamment lors des manœuvres, des défauts monophasés, de l'ouverture d'une phase ou du fonctionnement à vide de certains transformateurs.

La partie théorique a ensuite permis d'étudier plus directement la résonance et la ferrorésonance. Ensuite, nous avons montré que la ferrorésonance est plus complexe, car elle fait intervenir une inductance saturable. Cette caractéristique peut conduire à plusieurs régimes possibles pour une même configuration du réseau. Les régimes fondamentaux, sous-harmonique, quasi-périodique et chaotique ont été présentés, ce qui a permis de comprendre que le phénomène peut prendre différentes formes selon les paramètres du circuit et les conditions de commutation.

La deuxième partie du mémoire a été consacrée à l'application et à la simulation sous MATLAB/Simulink. L'objectif était d'observer le comportement d'un réseau triphasé simplifié en présence de capacités phase-terre, d'un disjoncteur monophasé et de transformateurs de tension.

Trois cas principaux ont été étudiés. Le premier cas, basé sur des transformateurs linéaires à vide, a servi de référence. Les résultats ont montré que les perturbations restent limitées et que le système retrouve un régime sinusoïdal après la disparition du défaut. Ce cas a permis de montrer que la présence des capacités phase-terre ne suffit pas, à elle seule, à maintenir un régime ferorésonant si le transformateur est modélisé de manière linéaire.

Le deuxième cas, réalisé avec des transformateurs saturables à vide, a mis en évidence le rôle déterminant de la saturation magnétique. Les résultats obtenus ont montré des surtensions importantes, des formes d'onde fortement déformées, une perturbation de la tension du point neutre et une présence notable d'harmoniques. Ce cas confirme que la non-linéarité du transformateur est une condition essentielle dans l'apparition de la ferorésonance. Il montre également que la valeur de la capacité phase-terre influence directement l'intensité et la nature du régime observé.

Le troisième cas, réalisé avec des transformateurs saturables alimentant une charge nominale, a permis d'analyser l'effet de la charge sur le phénomène. Les résultats ont montré que la charge joue un rôle d'amortissement, car elle absorbe une partie de l'énergie échangée entre les capacités du réseau et l'inductance saturable du transformateur. Cependant, elle ne supprime pas totalement le risque de ferorésonance lorsque les conditions du réseau restent favorables. La charge peut donc limiter les oscillations et réduire certaines surtensions, mais elle ne constitue pas une solution unique et suffisante.

À partir de l'ensemble de cette étude, nous pouvons retenir que la ferorésonance dépend principalement de la présence simultanée d'une capacité de réseau, d'une inductance magnétisante saturable et de conditions initiales favorables [27]. La simulation numérique s'est révélée être un outil très utile pour analyser ce phénomène, car elle permet d'étudier plusieurs configurations sans exposer les équipements réels à des contraintes dangereuses.

Pour limiter ou éviter l'apparition de la ferorésonance, plusieurs solutions peuvent être proposées [25] :

- Éviter le fonctionnement prolongé des transformateurs à vide ou très faiblement chargés.
- Ajouter une charge minimale au secondaire des transformateurs de tension afin d'amortir les oscillations.

- Installer des résistances d'amortissement adaptées pour absorber l'énergie ferrorésonante.
- Utiliser des dispositifs anti-ferrorésonance, surtout dans les réseaux à neutre isolé.
- Éviter les manœuvres monophasées non contrôlées, qui favorisent les déséquilibres du réseau.
- Utiliser des protections contre les surtensions, comme les parafoudres, lorsque les conditions du réseau l'exigent.

En conclusion, ce mémoire a permis de montrer que la ferrorésonance est un phénomène non linéaire complexe, fortement lié au comportement magnétique du transformateur et aux paramètres capacitifs du réseau. La partie théorique a permis de comprendre ses causes et ses régimes possibles, tandis que la partie simulation a permis d'observer concrètement son influence sur les tensions, les courants et le point neutre. Les résultats obtenus confirment l'importance de prendre ce phénomène en considération lors de l'étude, de l'exploitation et de la protection des réseaux électriques, en particulier dans les réseaux moyenne tension comportant des transformateurs de tension et des capacités phase-terre importantes.

Bibliographie.

Références bibliographiques

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [2] K. Miličević, “Ferroresonance: Systems, analysis and modeling,” in *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014, pp. 1–8, doi: 10.1002/047134608X.W4521.pub2.
- [3] P. Ferracci, “Ferroresonance,” *Cahier Technique no. 190*, Schneider Electric, Grenoble, France, 1998.
- [4] M. R. Iravani, A. K. S. Chaudhary, W. J. Giesbrecht, I. E. Hassan, A. J. F. Keri, K. C. Lee, J. A. Martinez, A. S. Morched, B. A. Mork, M. Parniani, A. Sharshar, D. Shirmohammadi, R. A. Walling, and D. A. Woodford, “Modeling and analysis guidelines for slow transients—Part III: The study of ferroresonance,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 255–265, Jan. 2000,
- [5] B. M. Weedy, B. J. Cory, N. Jenkins, J. B. Ekanayake, and G. Strbac, *Electric Power Systems*, 5th ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2012.
- [6] D. A. N. Jacobson, “Examples of ferroresonance in a high voltage power system,” in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Toronto, ON, Canada, Jul. 2003, vol. 2, pp. 1206–1212,
- [7] J. Tao, W. Gan, S. Fang, Y. Liu, X. Zhang, and X. Wen, “A MATLAB GUI teaching application for ferroresonance simulation,” *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 29, no. 6, pp. 1757–1770, Nov. 2021, doi: 10.1002/cae.22421.
- [8] G. Rami, "Contrôle de tension auto-adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution," Thèse de doctorat, Specialite: " Genie electrique", dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, France, Nov. 2006.
- [9] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, 5th ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2011.
- [10] T. Gönen, *Electric Power Distribution Engineering*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.
- [11] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 1991.
- [12] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. Umans, *Electric Machinery*, 6th ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2003.
- [13] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.

- [14] International Electrotechnical Commission, *Instrument Transformers—Part 3: Additional Requirements for Inductive Voltage Transformers*, IEC Standard 61869-3:2011, Geneva, Switzerland: IEC, 2011.
- [15] IEEE, IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers, IEEE Std C57.13-2016, New York, NY, USA: IEEE, 2016.
- [16] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers*. San Diego, Academic Press, 1998.
- [17] A. Rezaei-Zare, M. Sanaye-Pasand, H. Mohseni, S. Farhangi, and R. Iravani, “Analysis of ferroresonance modes in a power transformer using Preisach-type hysteretic magnetizing inductance,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 919–929, Apr. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.877087.
- [18] A. Yahiou, H. Mellah, and A. Bayadi, “Effects of inrush current on the hysteresis loop and load influences on the transient current of a single-phase transformer,” *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 12, no. 5, pp. 9258–9264, Oct. 2022, doi: 10.48084/etasr.5205.
- [19] A. Yahiou, « Contribution à l’étude et à la simulation des régimes transitoires dans les transformateurs de puissance », Thèse de doctorat, Spécialité: " Genie electrique", Université Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif, Algérie, 2021.
- [20] B. A. Mork, F. Gonzalez, D. Ishchenko, D. L. Stuehm, and J. Mitra, “Hybrid transformer model for transient simulation—Part I: Development and parameters,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 248–255, Jan. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.883000.
- [21] C. Prévé and R. Jeannot, *Guide de conception des réseaux électriques industriels*. Schneider Electric, no. 6 883 427/A, Feb. 1997.
- [22] S. P. Ang, « Ferroresonance simulation studies of transmission systems », thèse de doctorat, Spécialité : " ingénierie et sciences physiques", École de génie électrique et électronique, Université de Manchester, Manchester, Royaume-Uni, nov. 2010.
- [23] S. K. Chakravarthy and C. V. Nayar, “Series ferroresonance in power systems,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 267–274, Aug. 1995, doi: 10.1016/0142-0615(95)00045-R.
- [24] R. Gagnon, « Étude de la ferrorésonance dans le réseau compensé série et shunt », thèse de doctorat, Spécialité: " Genie electrique", Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, QC, Canada, mai 1997.
- [25] J. R. Marti and A. C. Soudack, “Ferroresonance in power systems: Fundamental solutions,” *IEE Proceedings C—Generation, Transmission and Distribution*, vol. 138, no. 4, pp. 321–329, Jul. 1991, doi: 10.1049/ip-c.1991.0040.

- [26] S. Mozaffari, M. Sameti, and A. C. Soudack, "Effect of initial conditions on chaotic ferroresonance in power transformers," *IEEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 5, pp. 456–460, Sep. 1997, doi: 10.1049/ip-gtd:19971459.
- [27] B. Chen, C. Guo, J. Dai, K. Lu, H. Zhou, and X. Yang, "A fault identification method for ferroresonance based on a Gramian angular summation field and an improved cloud model," *Symmetry*, vol. 17, no. 3, Art. no. 430, Mar. 2025, doi: 10.3390/sym17030430.
- [28] V. Valverde, A. J. Mazón, I. Zamora, and G. Buigues, "Ferroresonance in voltage transformers: Analysis and simulations," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 5, pp. 465–471, Mar. 2007.
- [29] C. Kieny et A. Sbaï, « Ferrorésonance dans les réseaux », Article scientifique, *Techniques de l'Ingénieur*, Réseaux électriques et applications, Réf. D4745, 10 mars 1996.
- [30] J. J. Winders, Jr., *Power Transformers: Principles and Applications*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2002.
- [31] MathWorks, MATLAB and Simulink Documentation, disponible sur: <https://www.mathworks.com>
- [32] Thomas Electric, "JDZ & JDZJ Series Single Phase Epoxy Resin Voltage Transformers (3–10kV)," *Duoma Tech*. Accessed: Jun. 10, 2026. <https://duomatech.com/jdz-jdzj-series-single-phase-epoxy-resin-voltage-transformers/>
- [33] Jinbo Marine, "JDZJ-10 Voltage Transformer," Jinbo Marine, Chongqing Jinbo Marine Equipment Import & Export Co., Ltd. <https://www.jinbomarine.com/jdzj-10-voltage-transformer.html>.